

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201199

基于高频暂态稀疏测量的复杂直流配电网故障定位

高冰, 崔泽坤

(国网河北省电力有限公司衡水供电分公司, 河北 衡水 053000)

摘要: 为了解决直流配电网中高速通信测量点不足、故障特征复杂等导致的故障定位精度差的问题, 提出了一种适用于复杂直流配电网的新型直流极间短路故障定位算法。首先, 根据高频瞬态电流环路, 构建含有电平转换器和DC/DC转换器的高频阻抗等效模型为故障过程提供稳定的阻抗值。其次, 利用BCS理论推导与稀疏测量点对应的节点高频暂态电压方程。最后, 结合节点高频瞬态电压方程和贝叶斯压缩感知理论, 求解节点高频瞬态电流稀疏矢量实现故障定位。实验结果表明: 所提算法对测量点的数量要求较低, 不需要严格同步地测量数据, 且不受转换器的控制策略和过渡电阻影响, 具有较高的故障定位准确性。

关键词: 直流配电网; 高频暂态电流; 极间短路故障; 故障定位

Fault location of a complex DC distribution network based on high-frequency transient sparse measurement

GAO Bing, CUI Zekun

(Hengshui Power Supply Branch, State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Hengshui 053000, China)

Abstract: To solve the problem of poor fault location accuracy caused by insufficient high-speed communication measurement points and complex fault characteristics in DC distribution networks, a new DC two-pole short-circuit fault location algorithm is proposed. First, a high-frequency impedance equivalent model containing a level shifter and a DC/DC converter is constructed to provide a stable impedance value for the fault process according to the high-frequency transient current loop. Secondly, the BCS theory is used to derive the high-frequency transient voltage equation of the node corresponding to the sparse measurement point. Finally, the node's high-frequency transient current sparse vector is determined to achieve fault location, combining the node's high-frequency transient voltage equation and Bayesian compressive sensing theory. The experimental results show that the proposed algorithm has a low requirement for the number of measurement points, does not need to measure data strictly synchronously, and is not affected by the control strategy and transition resistance of the converter, and has high fault location accuracy.

This work is supported by the Key Research Project of Hebei Provincial Science and Technology Department (No. SCG2017442) and the Science and Technology Project of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd. (No. SGHEHS00FCJS1900440).

Key words: DC distribution network; high frequency transient current; short circuit fault between poles; fault location

0 引言

柔性直流配电网有利于分布式发电和直流负载的多点访问^[1], 但柔性直流配电网存在分支机构多、测试节点少等问题, 且由于测量点主要安装在换流站中, 给故障定位带来了较大困难^[2-5]。另外, 直流故障的特性受转换器控制策略影响, 可能会降低故

障定位的准确性^[6]。

目前, 关于柔性直流配电网中故障定位的相关研究较少, 大多数研究尚集中在直流线路保护上^[7-9]。文献[10]提出了一种基于行波方法的故障定位策略, 通过记录第一和第二反向行波间的到达时间差计算故障距离, 该方法能够准确地计算故障距离, 但由于限制了测量点的数量和位置, 导致位置精度受DC配电网的多个分支的影响较大。文献[11]针对含分布式电源的复杂配电网故障区段定位的问题, 提出一种基于虚拟阻抗的故障定位方法, 以区

基金项目: 河北省科技厅攻关项目资助(SCG2017442); 国网河北省电力有限公司科技项目资助(SGHEHS00FCJS1900440)

段为单元识别畸变节点的故障信息, 采用尝试赋值法校正畸变节点的故障信息, 利用区段端节点过流信息初步判定故障位置, 将故障区段端节点间的虚拟导纳值用 0 表示, 非故障区段端节点间虚拟导纳用 1 表示, 进而形成能反映节点间连通性的节点虚拟阻抗矩阵, 根据故障电流的流通过程最终确定故障区段位置。文献[12]分析了直流电网中广泛存在的多类故障影响, 提出了基于电流、电流变化率等特征的神经网络模型的实时故障诊断方法, 在混合式双极性直流断路器上利用反时限过流保护策略, 隔离故障区域。文献[13]提出了一种基于有源注入法的故障定位策略, 通过在线路两端安装探头电源单元, 构建二阶振荡电路, 获得探头电流的衰减常数, 从而计算出故障点的位置。该方法不受故障瞬变影响, 且具有良好的故障定位可靠性, 但当直流配电网中分支机构的结构较为复杂时, 容易出现错误的故障定位结果, 且容易受外界噪声影响。文献[14]提出了一种基于 Prony 算法的故障定位方法, 通过 Prony 算法提取极间短路故障特征, 并采用组合放电等效电路获得故障距离并精确故障位置, 从而形成故障回路方程。文献[15]提出了一种基于直流微电网的单端稳态状态谐波故障定位方法, 运用故障与直流配电网故障特性的关联特性实现故障位置的精准定位, 但该方法故障定位精度受变流器控制策略的影响较大, 当应用于高可靠性直流配电网的故障定位时, 其死区结构较为复杂。文献[16]提出了一种基于正序方法的故障定位策略, 通过故障正序分量形成节点电压方程, 并提出压缩感知理论 (Compressed Sensing, CS) 解决欠定方程, 从而获得故障定位的最佳重构结果, 但由于 DC 系统中没有正序分量, 因此该方法仅适用于交流配电网。

综上所述, 针对复杂直流配电网故障定位难的问题, 提出了一种基于高频暂态电压稀疏测量的故障定位方法。首先, 在发生极间短路故障时, 通过高频瞬变电流环路构建电平转换器 (Module Multilevel Converter, MMC) 和 DC/DC 转换器的高频阻抗等效模型; 其次, 利用 BCS 理论推导与稀疏测量点相对应的节点高频暂态电压方程, 得到节点高频暂态电流的稀疏重构结果, 通过稀疏的测量电压实现精准故障定位。最后, 通过仿真实验验证所提方法的有效性。

1 MMC 和 DC/DC 转换器的高频阻抗等效模型

在直流配电网中, 瞬态过程的等效阻抗是随时间动态变化的, 在直流故障期间难以分析^[17-18]。因

此, 本文通过高频瞬态电流环路构建转换器的等效阻抗模型, 从而使转换器的开关行为线性化, 并避免了转换器的不同控制策略的影响。

1.1 故障高频信号的产生原理

当直流配电网发生极间短路故障时, 故障点的直流母线电压将从额定电压下降到故障低压。尽管在多数情况下, 由于故障电阻的存在, 电压不会完全下降到零, 但阶跃变化始终存在。当发生直流故障时, 可采用阶跃信号来模拟电压降, 单位阶跃信号及其傅里叶变换如式(1)所示^[19-20]。

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} 1, t \geq 0 \\ 0, t < 0 \end{cases} \xrightarrow{\text{fourier}} E(\omega) = \pi\delta(\omega) + \frac{1}{j\omega} \quad (1)$$

式中, $\delta(\omega)$ 为脉冲函数的傅里叶变换。根据式(1), 故障瞬态(阶跃信号)的频谱分析如图 1 所示^[21]。由图可知, 阶跃信号具有完整的频域信息, 且在高频范围内频谱密度较高。因此, 将具有高频谱密度的瞬态信息用于故障定位, 能够获得更好的信噪比和准确的故障定位结果。

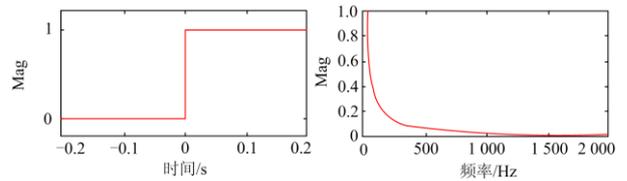


图 1 故障瞬态的频谱分析图

Fig. 1 Spectrum analysis diagram of fault transient

1.2 MMC 的高频阻抗等效模型

当发生故障时, MMC 的高频瞬态电流环路如图 2 所示。其中, SM 为不同的子模块; ①至③分别代表 A 相上臂的分支、A 相下臂的分支和交流侧高频瞬态电流; L_0 为桥臂电感; R_s 为等效电阻; L_s 为交流侧的等效电感; C_0 为 SM 的电容; U_{dc} 为直流母线电压。

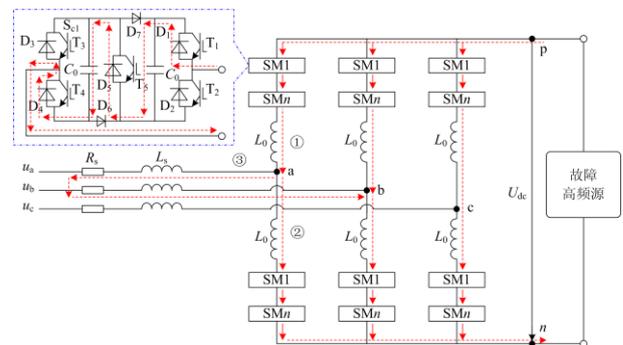


图 2 MMC 的高频瞬态电流环路

Fig. 2 High-frequency transient current loop of MMC

考虑到 MMC 桥臂输入 SM 的数量变化, 存在两种极端工作状态(即高频瞬态电路的最大对称工作条件), 以 A 相和 B 相的桥臂为例, 两种极限工作状态如图 3 所示^[22]。

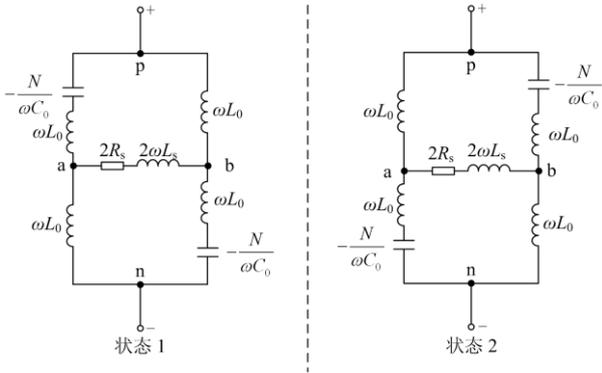


图 3 两种极端运行状态

Fig. 3 Two extreme operating states

状态 1: A 相上臂中的 SM 完全输入, B 相下臂中的 SM 完全输入;

状态 2: A 相下臂中的 SM 完全输入, B 相上臂中的 SM 完全输入。

在图 3 中, N 为上桥臂和下桥臂在任何时候处于导通状态时 SM 的总数, $\omega = 2\pi f$, f 是特定的高频。从图 3 可以看出, 当桥臂的容抗和感抗满足式(2)时, $Z_{pa} \approx Z_{pb}$ 和 $Z_{an} \approx Z_{bn}$, 可以忽略分支 ab。因此, 在图 2 中忽略了分支③(即图 3 中的 ab 分支)的影响。极端情况可以表示为

$$\omega L_0 \gg \frac{N}{\omega C_0} \quad (2)$$

式中: $N=5$; $L_0=15 \text{ mH}$; $C_0=0.5 \text{ mH}$ 。通过式(2)可计算出 ω 的最小值为 816.4, 其中 $f \gg 130 \text{ Hz}$ 。由此可知, 所研究的频带(1~1.5 kHz)能够满足 MMC 的等效值阻抗模型。

因此, MMC 可简化为高频阻抗模型, 简化模型如图 4 所示。其中, n_{ap} 和 n_{an} 分别为放入 A 相上桥臂和下桥臂导通状态 SM 的数量; n_{bp} 和 n_{bn} 分别为输入到 B 相上臂和下臂即时状态 SM 的数量; n_{cp} 和 n_{cn} 为输入到 C 相上臂和下臂导通状态 SM 的数量。

由图 4(b)可知, 当直流侧发生极间短路故障时, MMC 高频阻抗模型如式(3)所示。

$$Z_{\text{MMC}} = j \frac{1}{3} \left(2\omega L_0 - \frac{N}{\omega C_0} \right) \quad (3)$$

通常, 直流负载和光伏发电通过 DC/DC 转换器连接到直流配电网。对于完全控制的 DC/DC 转

换器, 如图 5 所示为开关 g_{11} 处于接通状态时的高频瞬态电流环路, 从图中可以看出在高频域下电感的电抗被进一步放大。

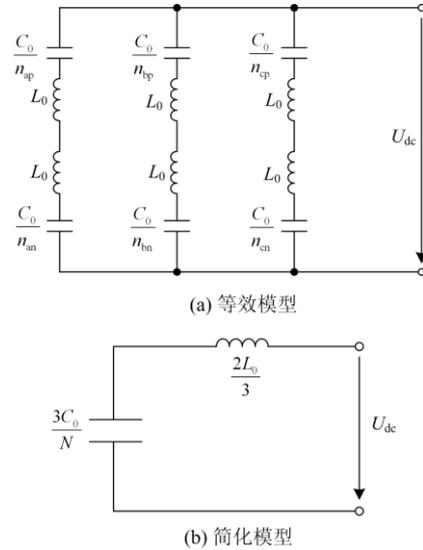


图 4 MMC 的简化模型

Fig. 4 Simplified model of MMC

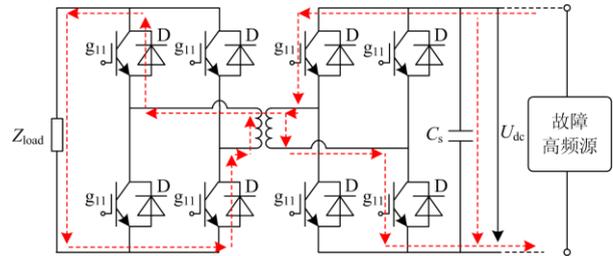


图 5 DC/DC 转换器的高频瞬态电流环路

Fig. 5 High-frequency transient current loop of DC/DC converter

图 6 为 DC/DC 转换器的高频阻抗模型。其中, L_1 为低压侧到高压侧的变压器等效电感, L_2 为高压的自感, L_{12} 为互感, C_s 为高压侧的支撑电容, Z_{load} 为直流负载。

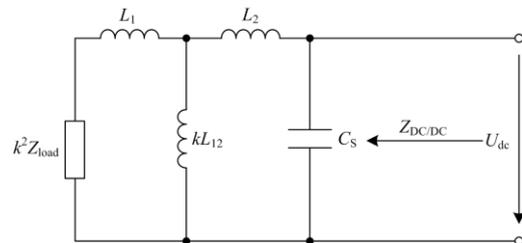


图 6 DC/DC 转换器的高频阻抗模型

Fig. 6 High-frequency impedance model of DC/DC converter

其中, $Z_{DC/DC}$ 的数学表达式如式(4)所示。

$$Z_{DC/DC} = (k^2 Z_{load} + j\omega L_1 + j\omega L_2) \parallel (1/j\omega C_0) = \frac{1}{1/(\frac{1}{k^2 Z_{load} + j\omega(L_1 + L_2)} + j\omega C_0)} = \frac{1}{1/(\frac{1 + j\omega C_0 \times (k^2 Z_{load} + j\omega(L_1 + L_2))}{k^2 Z_{load} + j\omega(L_1 + L_2)})} = \frac{1}{1/(\frac{1 - \omega C_0 \times \omega(L_1 + L_2) + j\omega C_0 \times k^2 Z_{load}}{k^2 Z_{load} + j\omega(L_1 + L_2)})} = \frac{k^2 Z_{load} + j\omega(L_1 + L_2)}{1 - \omega^2(L_1 + L_2)C_0 + j\omega k^2 Z_{load}} \quad (4)$$

式(4)中, k 为转化率。

在一般工业转换器中, 内部控制回路电流环的响应时间为十到几十毫秒, 外部控制回路电流环的响应时间为几百毫秒^[23-24]。因此, 控制频率带宽在几百赫兹范围内, 表明理论上故障特征频带的阻抗不受控制策略影响。

2 基于高频暂态电流的故障定位算法

2.1 故障定位算法

根据不同故障位置, 系统故障可分为节点故障和节点间故障^[25]。根据上述提出的转换器高频等效阻抗模型, 利用故障瞬变产生的高频信息, 构建高频网络, 如图7所示。

与节点故障不同, 当发生节点间故障时, 无法直接得到节点高频瞬态电压方程, 这种情况下可通过将节点间故障等效于双节点故障进行解决^[26]。

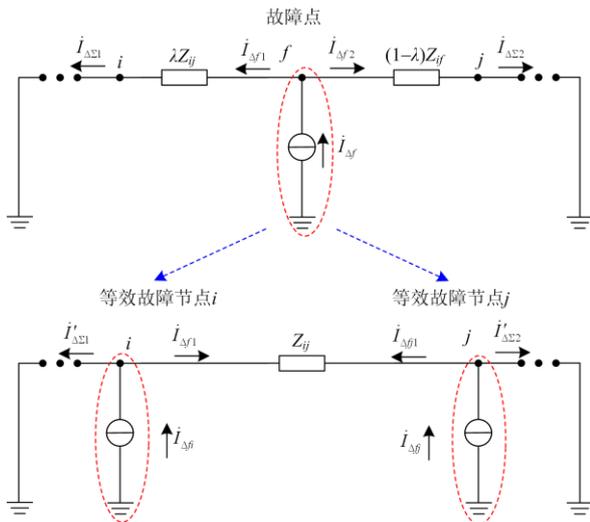


图7 节点间故障的高频信息示意图

Fig. 7 Schematic diagram of high-frequency information of faults between nodes

图7中: Z_{ij} 为节点 i 与节点 j 间的线路阻抗; λ 为故障位置系数; $i_{\Delta f}$ 为初始高频瞬变电流源; $i_{\Delta fi}$ 和 $i_{\Delta fj}$ 分别为节点 i 和节点 j 的等效高频瞬变电流源; $i_{\Delta f1}$ 为从故障点到节点 i 的原始高频瞬变电流; $i_{\Delta f2}$ 为从故障点到节点 j 的原始高频瞬变电流; $i_{\Delta\Sigma 1}$ 为从节点 i 到其他节点的原始高频瞬变电流之和; $i_{\Delta\Sigma 2}$ 为从节点 j 到其他节点的原始高频瞬变电流之和; $i_{\Delta fi}$ 为从故障节点 i 到故障节点 j 的等效高频瞬变电流; $i_{\Delta fj}$ 为从故障节点 j 到故障节点 i 的等效高频瞬变电流。

根据外线电流在等效前后保持不变的原理, 电流间的关系如式(5)所示。

$$\begin{cases} i_{\Delta f} = i_{\Delta f1} + i_{\Delta f2} \\ i_{\Delta fi} = i'_{\Delta\Sigma 1} + i_{\Delta fi} \\ i_{\Delta fj} = i'_{\Delta\Sigma 2} + i_{\Delta fj} \\ i'_{\Delta\Sigma 1} = i_{\Delta\Sigma 1} \\ i'_{\Delta\Sigma 2} = i_{\Delta\Sigma 2} \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可推导出式(6)等效前后的高频瞬态电流源关系。

$$i_{\Delta fi} + i_{\Delta fj} = i_{\Delta f} \quad (6)$$

节点 i 和节点 j 之间的电势差为

$$\begin{cases} \dot{U}_{\Delta ij} = -\lambda Z_{ij} i_{\Delta f1} + (1-\lambda) Z_{ij} i_{\Delta f2} \\ \dot{U}_{\Delta ij} = Z_{ij} (i_{\Delta f1} - i_{\Delta\Sigma 1}) \end{cases} \quad (7)$$

结合式(5)一式(7), 可计算出 $i_{\Delta fi}$ 和 $i_{\Delta fj}$, 如式(8)所示。

$$\begin{cases} i_{\Delta fi} = (1-\lambda) i_{\Delta f} \\ i_{\Delta fj} = \lambda i_{\Delta f} \end{cases} \quad (8)$$

每个节点注入的高频瞬态电流的数学表达式如式(9)所示。

$$i_{\Delta m}(\omega) = \begin{cases} 0, \text{节点 } m \text{ 是非故障节点} \\ i_{\Delta fi}(\omega), \text{节点 } m \text{ 是等效故障节点 } i \\ i_{\Delta fj}(\omega), \text{节点 } m \text{ 是等效故障节点 } j \end{cases} \quad (9)$$

根据系统的结构特点, 可通过将式(10)中的节点高频导纳矩阵求反, 得到节点高频阻抗矩阵。

$$Z_{N \times N}(\omega) = Y_{N \times N}^{-1}(\omega) = \begin{bmatrix} Z_{11}(\omega) & Z_{12}(\omega) & \cdots & Z_{1N}(\omega) \\ Z_{21}(\omega) & Z_{22}(\omega) & \cdots & Z_{2N}(\omega) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{N1}(\omega) & Z_{N2}(\omega) & \cdots & Z_{NN}(\omega) \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: $Z_{mm}(\omega)$ 为节点 m 的高频自阻抗 ($m=n$) 或节点 m 与节点 n 之间的高频互阻抗。

节点高频暂态电流列向量为

$$\dot{U}_{\Delta N \times 1}(\omega) = Z_{N \times N}(\omega) \dot{I}_{\Delta N \times 1}(\omega) \quad (11)$$

式中: $U_{\Delta N \times 1}$ 为节点高频瞬变电压列向量; $I_{\Delta N \times 1}$ 为节点高频瞬变电流列向量。

由于故障瞬变引起的节点高频瞬变电流列矢量是稀疏的, 假设配备电压测量单元的节点数为 $M (M \ll N)$, 去除不具有测量单元的节点高频瞬态电压和节点高频阻抗矩阵中相应行的阻抗。稀疏节点高频瞬态电流列向量的数学表达式如式(12)所示^[27]。

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{\Delta 1}(\omega) \\ \dot{U}_{\Delta 2}(\omega) \\ \vdots \\ \dot{U}_{\Delta M}(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11}(\omega) & Z_{12}(\omega) & \cdots & Z_{1N}(\omega) \\ Z_{21}(\omega) & Z_{22}(\omega) & \cdots & Z_{2N}(\omega) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{N1}(\omega) & Z_{N2}(\omega) & \cdots & Z_{NN}(\omega) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \dot{I}_{\Delta fi}(\omega) \\ \dot{I}_{\Delta fj}(\omega) \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

将式(12)代入式(13)中, 计算节点 h 的高频瞬态电压。

$$\dot{U}_{\Delta h}(\omega) = Z_{hi}(\omega) \dot{I}_{\Delta fi}(\omega) + Z_{hj}(\omega) \dot{I}_{\Delta fj}(\omega) \quad (13)$$

式中, $h=1, 2, \dots, M$ 。由于高频条件下, 线路的实际阻抗远小于虚部。因此, 可通过式(14)获得节点高频瞬态电压的绝对值。

$$|\dot{U}_{\Delta h}(\omega)| \approx |Z_{hi}(\omega) \dot{I}_{\Delta fi}(\omega)| + |Z_{hj}(\omega) \dot{I}_{\Delta fj}(\omega)| \quad (14)$$

改进节点高频瞬态电压方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{\Delta 1}(\omega) \\ \dot{U}_{\Delta 2}(\omega) \\ \vdots \\ \dot{U}_{\Delta M}(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11}(\omega) & Z_{12}(\omega) & \cdots & Z_{1N}(\omega) \\ Z_{21}(\omega) & Z_{22}(\omega) & \cdots & Z_{2N}(\omega) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{N1}(\omega) & Z_{N2}(\omega) & \cdots & Z_{NN}(\omega) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ (1-\lambda)|\dot{I}_{\Delta fi}(\omega)| \\ \lambda|\dot{I}_{\Delta fj}(\omega)| \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

2.2 可靠性分析

由于高频暂态电流列向量中的值随故障条件而变化, 导致故障定位结果难以确定。因此, 可采用式(16)所示的可靠性分析公式。

$$I(i) > K_{rel} \cdot \max(I) \quad (16)$$

式(16)中: K_{rel} 为可靠性系数, 取值范围为 $[0, 1]$; $\max(I)$ 为节点高频瞬态电流列向量中的最大值。

为准确识别节点故障和节点间故障, 并区分噪声对定位结果的影响, 选取 1 000 组节点故障和节点间故障, 通过试凑法发现当 K_{rel} 约为 0.12 时, 故障定位精度最高。若仅有一个值满足式(16), 则节点故障发生在相应的节点处; 若有两个值满足式(16), 则节点故障发生在两个相应节点之间。

3 压缩感知理论

目前, 压缩感知理论(CS 理论)广泛应用于图像重建领域, 包括单像素相机、医学和分布式网络等^[28-30]。CS 理论的核心价值是具有良好的稀疏解性能, 能够很好地重建稀疏信息。此外, CS 理论可以以较低的采样频率获得离散信号样本, 并通过非线性重建算法完美地重建信号^[31]。本文结合节点高频暂态电流定位算法, 将 CS 理论用于求解欠定方程(15), 以得到最优解。

3.1 信号的稀疏表示

CS 理论的数学模型为

$$y = \Phi x + e \quad (17)$$

式中: y 为 $M \times 1$ 维度观测向量; Φ 为 $M \times N (M \ll N)$ 个维度感知矩阵; x 为重构的 $N \times 1$ 维稀疏矢量; e 为 $N \times 1$ 维高斯白噪声。由式(17)可知, 该方程具有无限解或无解, 表明 CS 理论充分利用了重构信号 x 的稀疏性, 引入了稀疏约束, 并通过式(18)中的范式正则化公式找到了最佳稀疏解。

$$\hat{x} = \arg \min_x \left\{ \|y - \Phi x\|_2^2 + \rho \|x\|_1 \right\} \quad (18)$$

3.2 基于贝叶斯算法的 CS 理论

与广泛使用的基于范式正则化公式的算法相比, 基于贝叶斯算法的 CS (Bayesian Compressed Sensing, BCS) 理论具有较好的抗噪能力^[32]。同时, BCS 理论更适合处理列相关性强, 且易于获得最优解的感知矩阵。由于节点高频阻抗矩阵的列具有很强的相关性, 因此通过使用 BCS 重建算法求解, 更容易获得最优的稀疏解, 从而更准确地定位故障点^[32]。

在 BCS 方法中, 拉普拉斯先验广泛用于稀疏向量的先验选择。对于 x 中的每个元素, 可以在式(19)中获得稀疏矢量 x 的先验分布。

$$p(x|a, b) = \prod_{i=1}^N \int_0^{\infty} N(x_i | 0, \alpha_i^{-1}) \Gamma(\alpha_i | a, b) d\alpha_i \quad (19)$$

式中: α_i 为高斯密度函数的精度; 积分项满足 t 分布。选择适当的参数可使 t 分布的峰值 x_i 接近于 0。通过给定测量信号, 可计算出感知矩阵 Φ 以及重建后 \mathbf{x} 的后验概率, 多元高斯分布的均值和方差为

$$\begin{cases} \mu = \sigma^{-2} \Sigma \Phi^T \mathbf{y} \\ \Sigma = (\sigma^{-2} \Phi^T \Phi + \mathbf{A})^{-1} \end{cases} \quad (20)$$

式中, $\mathbf{A} = \text{diag}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N)$ 。

通过期望最大化算法得到

$$\begin{cases} \alpha_i^{\text{new}} = \frac{\gamma_i}{\mu_i^2}, i \in \{1, 2, \dots, N\} \\ \frac{1}{\beta^{\text{new}}} = \frac{\|\mathbf{y} - \Phi \mathbf{x}\|_2^2}{M - \sum_i \gamma_i} \end{cases} \quad (21)$$

式中: μ_i 为第 i 个元素; $\gamma_i = 1 - \alpha_i \sum_{ii}$ 且 \sum_{ii} 是第 i 个对角线元素。在循环计算过程中, α 的大多数值都接近无穷大, 且相应的 x_i 接近于 0, 但 α 的其余值往往是有限值, x_i 不为 0。

3.3 基于 BCS 理论的测量点分布

根据 BCS 理论的分析, 为获得准确的重建结果, 有必要合理分配测量单元的位置和数量, 测量单元的位置由网络拓扑和电压暂降监控的基础确定。电压暂降监控的要求是: 当发生故障时至少有一个测量单元会收集每个分支的故障信息。为使所监视的信息反映整个网络的故障特征, 需在具有换流站和网络分支末端的节点处设置测量单元。

测量单元的数量由可以反映总体特征的最小数量确定, 如果该数目小于定义的值, 则难以执行整体重建。定义值的数学表达为

$$r \geq v \ln \frac{1}{v} \quad (22)$$

式中: r 为测量单元的数量; v 为重构信号的稀疏性; l 为重构信号的长度。

3.4 故障定位过程

根据节点高频瞬态信号的稀疏特性, 结合 BCS 重构算法, 提出故障定位算法的流程, 如图 8 所示。

1) 根据多节点直流配电网, 形成节点高频导纳矩阵, 并通过执行逆运算获得感知矩阵。

2) 在提取高频信号前后, 读取测量点的电压数据, 并以固定长度的窗口计算观测信号。

3) 将步骤 1) 和步骤 2) 中获得的感知矩阵和观察信号作为参数, 放入 BCS 重建算法中, 计算稀疏矢量。

4) 在下一时刻读取感知矩阵, 并重复执行步骤 3), 直到读取所有窗口。

5) 对在重构的稀疏矢量中, 满足前两个最大值相对应的节点进行计数, 定位故障点。

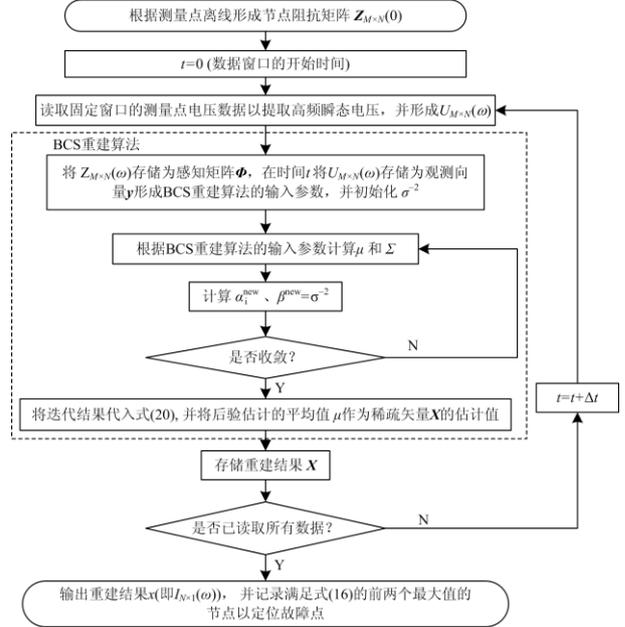


图 8 结合 BCS 理论的新算法流程图

Fig. 8 Flow chart of the new algorithm combined with BCS theory

4 仿真分析与验证

基于原始 IEEE33 节点配电网的结构和参数, 在 PSCAD/EMT DC 中创建了 32 节点直流配电网的仿真模型, 如图 9 所示。图 9 中, 直流配电网的额定电压为 ± 10 kV, 总容量为 20 MW, 共包括 31 条分支(实线)和 4 条连接线(虚线), 用于故障恢复和断开连接以避免正常操作条件下的闭环操作。黑色圆圈表示直流负载节点, 带有红色虚线圆圈的节点表示测量单元的安装位置, 红色圆圈表示将集中式光伏电池通过 DC/DC 转换器连接到网络的节点。红

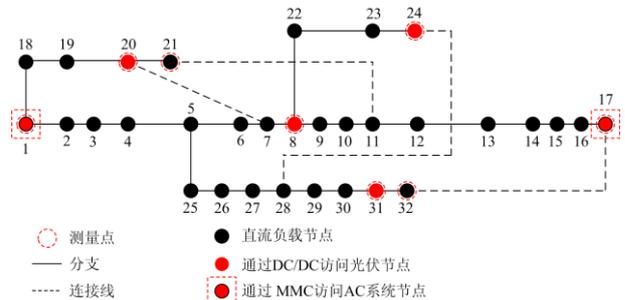


图 9 32 节点直流配电网的仿真模型

Fig. 9 Simulation model of 32-bus DC distribution network

色虚线框表示 AC 系统，其节点通过 MMC 连接到网络。

4.1 转换器高频等效模型的仿真

考虑到当 MMC 开关频率变化到 5 kHz 以下时，恒定的直流电压控制策略和有功功率控制策略间的等效阻抗差值较小^[33]。当开关频率大于 5 kHz 时，二者间的等效阻抗差值将出现较大的增幅，因此为尽可能降低等效阻抗差值，本文选定的开关频率应不超过 5 kHz。图 10 为四种不同开关频率下 MMC

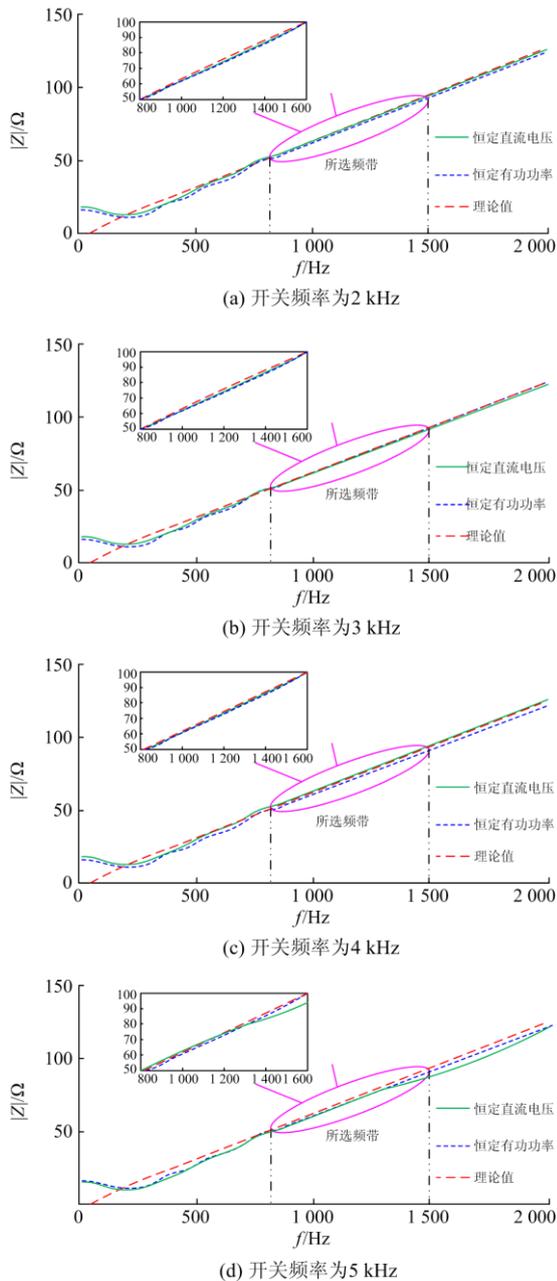


图 10 不同控制策略的 MMC 高频阻抗模型仿真
Fig. 10 MMC high-frequency impedance model simulation of different control strategies

的控制策略对高频等效阻抗值影响的验证结果，从图可以看出，此在四种不同开关频率下，MMC 的高频等效模型在 1~1.5 kHz 的频率范围内最为准确。

表 1 和表 2 为不同 MMC 控制策略和开关频率下 MMC 高频等效阻抗的恒定直流电压和恒定有功功率最大误差。由表 1 可知，在恒定直流电压控制策略下，高频等效阻抗的最大误差为 3.87%，在恒定有功功率控制策略下为 3.53%，表明所提出 MMC 高频等效阻抗模型具有良好的有效性。

表 1 恒定直流电压最大误差

控制策略	恒定直流电压			
开关频率/kHz	2	3	4	5
最大误差/%	2.72	1.08	2.75	3.87

表 2 恒定有功功率最大误差

控制策略	恒定有功功率			
开关频率/kHz	2	3	4	5
最大误差/%	1.80	2.25	1.58	3.53

图 11 为 DC/DC 转换器控制策略对高频等效阻抗值影响的仿真结果。由图可知，在两种控制策略下，DC/DC 转换器的高频等效阻抗差值较小，单相移控制策略下的最大误差为 4.72%，双相移控制策略下的最大误差为 5.21%，表明本文所提 DC/DC 转换器的高频等效阻抗模型具有较高的准确性。

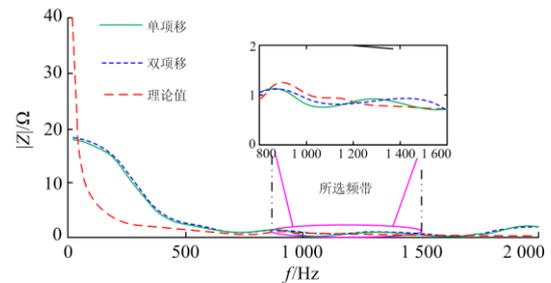


图 11 DC/DC 转换器的高频阻抗模型仿真验证
Fig. 11 Simulation verification of the high-frequency impedance model of the DC/DC converter

4.2 节点故障发生时的仿真分析

为了验证所提算法的准确性，本文分别在直流配电网中设置了从节点 1 到节点 32 的 32 对极短路故障。根据图 10 和图 11 所示的转换器的阻抗估计性能，将 1~1.5 kHz 的频率信息用于故障定位。复杂的直流配电网中节点众多，以节点 13 为例，对定位结果进行分析。

图 12 为不同故障场景的仿真结果。从图 12(a) 可以看出, 当节点 13 发生故障时, 节点 13 的重构高频瞬态电流远高于其他节点的重构结果(其值约为 0), 因此该节点可以检测到故障并将其定位在节点 13 处。图 12(b) 显示, 当节点 13 发生具有 60Ω 过渡电阻的波极故障时, 节点 13 的重建结果为 0.0175, 其他节点的重建结果为 0, 小于 $K_{rel} \max(I)$, 这证明了本文所提出的定位方法的准确性。

另外, 噪声的随机性和丰富的低频信息会导致重构的高频瞬态电流幅度发生变化, 由于噪声对定位结果有一些影响, 该结果取决于图 12(c) 中整个数据窗口的最大值。由图 12(c) 可知, 最大重构值在节点 13 位置, 节点 14 处的值也满足, 即证明了节点 13 和

14 为故障点。由图 12(d) 可知, 节点 13 处的最大重构值为 0.034, 并且其他值小于 $K_{rel} \max(I)$, 表明在节点 13 处发生节点故障, 且重构结果的分布不变。

当分析所有 32 个节点故障时, 结合不同故障条件(如过渡电阻、噪声和分布电容等), 故障定位结果如表 3—表 5 所示。由表 3 可知, 当从节点 1 到节点 32 连续设置无默认值, 且过渡电阻从 20Ω 增加到 350Ω 时, 分别准确地定位了 32 个节点, 表明所提故障定位算法基本上不受过渡电阻影响, 因为过渡电阻被视为高频瞬态电流源的内部电阻。

表 4 为噪声的定位结果, 当节点故障从节点 1 到节点 32 连续设置, 且噪声信噪比从 50 dB 变为 30 dB 时, 可准确定位 32 个节点。由于整个数据窗口的前两个最大值满足式(16)的需求, 因此噪声对重构结果的幅度影响很大, 但对故障定位方法的效率影响很小。同时, BCS 理论已经针对噪声进行了算法优化。

由于直流配电线为短线, 因此配电电容通常较小, 则节点自导纳和节点间互阻抗中分布电容的比例也较小, 导致分布电容对节点导纳矩阵中每个值的影响可以忽略。表 5 为具有分布式电容的故障定位结果, 当从点 1 到点 32 连续发生极间短路故障时,

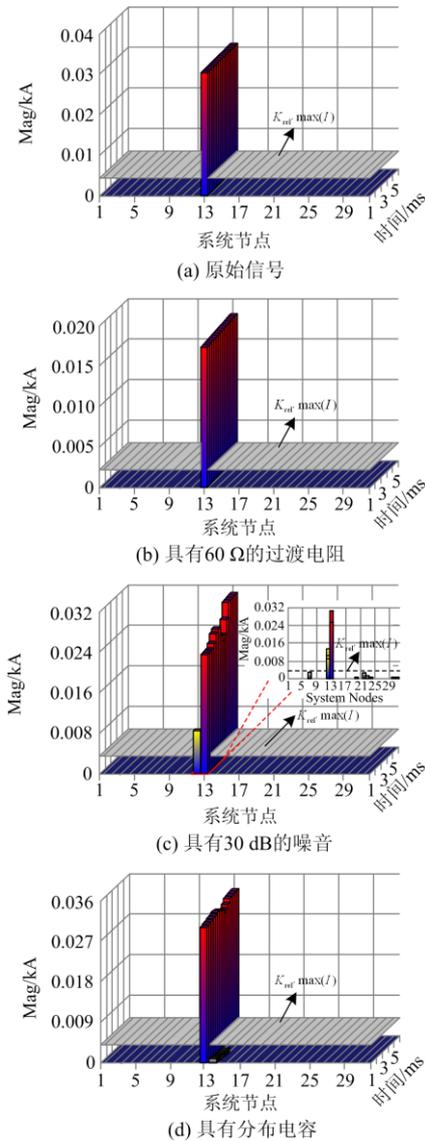


图 12 节点 13 的故障定位结果

Fig. 12 Fault location result of node 13

表 3 具有过渡电阻的定位结果

Table 3 Positioning results with transition resistance

定位结果	故障场景						
	无过渡电阻	过渡电阻/ Ω					
	电阻	20	40	60	100	200	350
准确定位	32	32	32	32	32	32	32
位置偏差	0	0	0	0	0	0	0
定位精度/%	100	100	100	100	100	100	100

表 4 噪声的定位结果

Table 4 Location results of noise

定位结果	故障场景			
	无噪声	有噪声/dB		
		50	40	30
准确定位	32	32	32	32
位置偏差	0	0	0	0
定位精度/%	100	100	100	100

表 5 具有分布式电容的定位结果

Table 5 Positioning results with distributed capacitors

定位结果	故障场景	
	无分布式电容	有分布式电容
准确定位	32	32
位置偏差	0	0
定位精度/%	100	100

具有分布电容的点可以精确定位这 32 个点,表明了所提故障定位方法具有出色的故障定位性能。

4.3 节点间故障发生时的仿真分析

本节分别在分支机构中设置了 31 个极间短路故障,并选择分支 13,即节点 13 和节点 14 间的线进行仿真分析,仿真结果如图 13 所示。由图 13 可知,重建结果中只有两个非零最大值满足式(16)要求,即表明节点间故障和双节点故障之间的等效方法是准确的。因此,当发生节点间故障时,节点高频暂态电流稀疏矢量的重建结果中,存在两个非零值,而其他值均小于 $K_{rel} \max(I)$ 。

比较图 13(a)和图 13(b)可知,重建结果的值分布不变,因为两个非零最大值位于节点 13 和 14 处,其他值不能满足式(16)的等式要求,由此可将节点

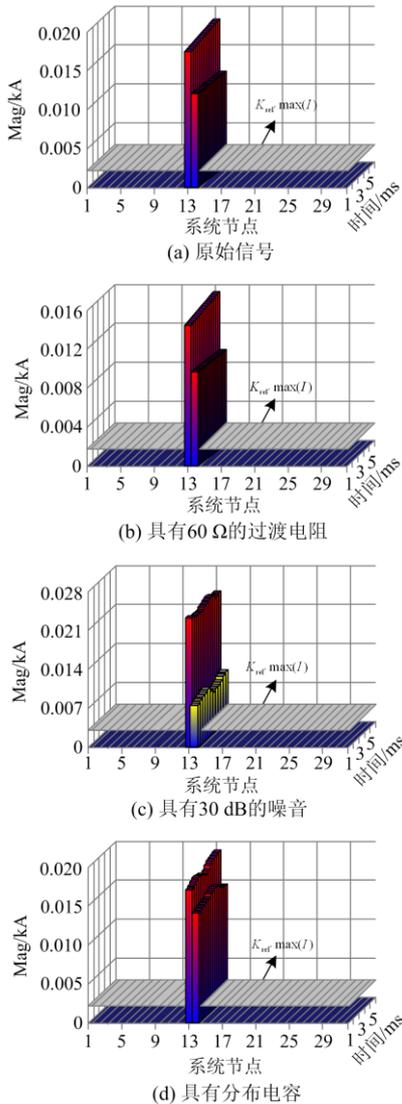


图 13 节点 13 和 14 间的故障定位结果

Fig. 13 Fault location results between nodes 13 and 14

间故障定位在节点 13 和 14 位置处。由图 13(b)和图 13(d)可知,振幅随着过渡电阻的增加而减小,类似于节点故障,节点间故障的定位结果不受过渡电阻和分布电容的影响。

类似地,当出现多个节点间故障时,节点高频暂态电流稀疏矢量的重建结果中将会出现多个非零值,而其他值均小于 $K_{rel} \max(I)$ 。以节点 8、节点 22 和节点 23 为例,当两段节点间均出现故障时,此时非零最大值将位于三个节点处,如图 14 所示。需要注意的是,在得到重建结果后需要参照 IEEE33 节点配电网的结构图来区分是节点故障还是节点间故障。例如当重建结果中在节点 6、节点 11 和节点 12 出现非零值时,通过结合 IEEE33 节点配电网的结构图可知节点 6 为节点故障,节点 11 和节点 12 为节点间故障。换言之,在 IEEE33 节点配电网的

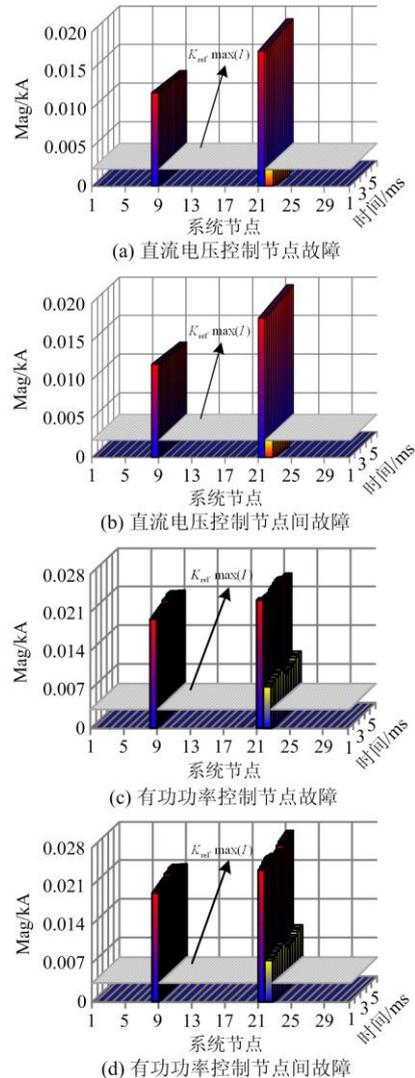


图 14 多节点间的故障定位结果

Fig. 14 Fault location results among multiple nodes

结构图中若出现相邻节点为非零值则为节点间故障, 否则为节点故障。

4.4 不同控制策略和测量点数的仿真分析

根据前文所述, MMC 的不同控制策略对重建结果的影响很小。图 15 为不同 MMC 控制策略下的故障定位结果。比较图 15(a)和图 15(c)可知, 采用恒定直流电压控制策略的非零值为 0.032, 采用恒定有功功率控制策略的非零值为 0.027 和 0.004, 远小于 $K_{rel} \max(I)$ 。表明无论节点 13 发生故障时采用哪种控制策略, 故障点都在节点 13 处。图 15(b)和图 15(d)显示了在节点 13 和节点 14 间发生节点间故障时的定位结果。当采用恒定 DC 电压控制策略时, 满足式(16)等式要求的非零结果在节点 13 和节点 14 处; 当采用恒定有功功率控制策略时, 定位结果中前两个最大值的分布也位于节点 13 和节点 14 处。

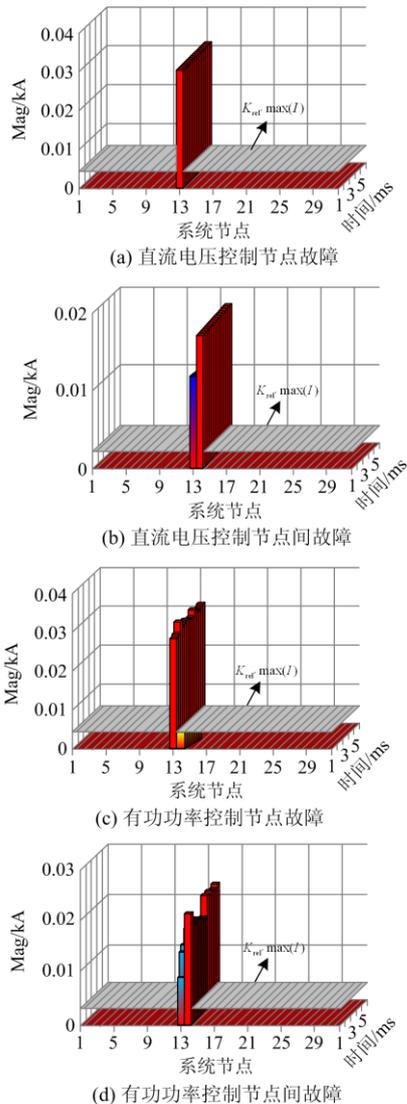


图 15 节点间故障的故障定位结果

Fig. 15 Fault location results of faults between nodes

表 6 和表 7 为不同控制策略和测量点数的节点故障和节点间故障定位结果。在表 6 中, r 是测量点的数量。在本文研究的直流配电网中, $v=2, l=32$, 根据式(22)可以计算出 $r \geq 5.55$ 。结合第 3.3 节中分析的测量点的位置要求, 最小测量点数为 $r \geq 8$ 。由此可知, 本文所提方法能够在测量点数满足 $r \geq 8$ 时准确地检测和定位所有节点故障和节点间故障。

表 6 节点故障定位结果

定位结果	节点故障			
	直流电压		有功功率	
	$r=7$	$r=8$	$r=7$	$r=8$
准确定位	21	32	19	32
位置偏差	11	0	13	0
定位精度/%	65.63	100	59.38	100

表 7 节点间故障定位结果

定位结果	节点间故障			
	直流电压		有功功率	
	$r=7$	$r=8$	$r=7$	$r=8$
准确定位	19	32	22	32
位置偏差	13	0	10	0
定位精度/%	59.38	100	68.75	100

5 结论

通过分析直流配电网中变换器(MMC 和 DC/DC)的高频阻抗等效模型, 以及故障瞬变产生的高频信号特性, 提出了一种基于节点高频瞬态电压方程和 BCS 理论的新型故障定位算法, 并通过仿真实验得出以下结论:

- 1) 所提故障定位算法不受分布电容和过渡电阻影响, 并具有良好的稳定性和抗噪声能力。
- 2) 所提故障定位算法具有较高的定位精度, 适用于发生极间短路故障的复杂直流配电网。
- 3) 本文所提方法能够在测量点数满足 $r \geq 8$ 时, 准确地检测和定位所有节点故障和节点间故障。当然在实际工程中可能存在测量点数不足 8 个, 针对这一问题, 后续将重点研究如何在减少测量点情况下尽可能地提高故障定位精度。

参考文献

- [1] 陈燕擎, 刘涛, 韩文建, 等. 考虑配电网分布式零序电流关系的单相接地故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 118-126.

CHEN Yanqing, LIU Tao, HAN Wenjian, et al. Single-phase-to-earth fault location in distribution networks considering the distributed relations of the zero-sequence

- currents[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(22): 118-126.
- [2] 李卫国, 刘柏岑, 卢广旗. 含分布式电源的配电网单相接地故障精确定位方法[J]. *供用电*, 2020, 37(9): 58-63.
LI Weiguo, LIU Baicen, LU Guangqi. A method for precise location of single-phase grounding fault in distribution network with distributed generation[J]. *Distribution & Utilization*, 2020, 37(9): 58-63.
- [3] 张健磊, 高湛军, 孙旭日, 等. 基于 NSGA-II 算法的有源配电网故障定位方法研究[J]. *电测与仪表*, 2020, 57(9): 33-39.
ZHANG Jianlei, GAO Zhanjun, SUN Xuri, et al. Active distribution network fault location method based on the NSGA-II algorithm research[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(9): 33-39.
- [4] XIE L, LUO L, Li Y, et al. A traveling wave-based fault location method employing VMD-TEO for distribution network[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2020, 35(4): 1987-1998.
- [5] 赵乔, 王增平, 董文娜, 等. 基于免疫二进制粒子群优化算法的配电网故障定位方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(20): 83-89.
ZHAO Qiao, WANG Zengping, DONG Wenna, et al. Research on fault location in a distribution network based on an immune binary particle swarm algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(20): 83-89.
- [6] COURTHEY, DAVID, LITTLER, et al. Localised fault location on a distribution network-case studies and experience[J]. *The Journal of Engineering*, 2018(15): 885-890.
- [7] 何锐, 韩涛, 顾泽玉, 等. 基于行波折反射特征的单相接地故障区段定位方法[J]. *智慧电力*, 2018, 46(1): 77-82.
HE Rui, HAN Tao, GU Zeyu, et al. Single-phase to ground fault section location based on characteristics of traveling wave refraction and reflection[J]. *Smart Power*, 2018, 46(1): 77-82.
- [8] 和敬涵, 李猛, 罗国敏, 等. 面向韧性提升的异构多源交直流配电网保护与故障恢复方法研究综述[J]. *供用电*, 2019, 36(7): 2-7, 12.
HE Jinghan, LI Meng, LUO Guomin, et al. Review of protection and restoration methods for heterogeneous multi-source AC/DC distribution network facing resilience improvement[J]. *Distribution & Utilization*, 2019, 36(7): 2-7, 12.
- [9] 李盈含, 高亮, 陈蒙蒙. 柔性直流配电系统控制策略与保护技术研究综述[J]. *电测与仪表*, 2020, 57(9): 8-16, 39.
LI Yinghan, GAO Liang, CHEN Mengmeng. Summary of Research on control strategy and protection technology of flexible DC distribution system[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(9): 8-16, 39.
- [10] FAN W, LIAO Y. Wide area measurements based fault detection and location method for transmission lines[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2019, 4(1): 53-64. DOI: 10.1186/s41601-019-0121-9.
- [11] 倪良华, 历馨, 吕干云, 等. 基于虚拟阻抗的复杂配电网故障区段定位新方法[J]. *电网与清洁能源*, 2019, 35(2): 1-8, 14.
NI Lianghua, LI Xin, LÜ Ganyun, et al. New approach of fault section location in complicated distribution network based on virtual impedance[J]. *Power System and Clean Energy*, 2019, 35(2): 1-8, 14.
- [12] 蒋原, 李擎, 冯茜, 等. 基于 BP 神经网络的直流电网故障定位与保护方法[J]. *高压电器*, 2020, 56(8): 23-28.
JIANG Yuan, LI Qing, FENG Qian, et al. Fault location and protection method for DC power grid based on BP neural network[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(8): 23-28.
- [13] 李泽兰, 曹一家, 彭寒梅, 等. 基于流形理论与 L1+L2 约束的智能电网故障定位[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(18): 48-58.
LI Zelan, CAO Yijia, PENG Hanmei, et al. Smart grid fault location based on manifold theory and L1+L2 constraints[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(18): 48-58.
- [14] 徐铭铭, 肖立业, 王海风, 等. 一种基于 Prony 算法的直流配电网电缆故障定位方法[J]. *电工电能新技术*, 2015, 34(4): 1-5.
XU Mingming, XIAO Liye, WANG Haifeng, et al. Novel method of locating cable fault in DC distribution based on Prony algorithm[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2015, 34(4): 1-5.
- [15] 孙刚, 时伯年, 赵宇明, 等. 基于 MMC 的柔性直流配电网故障定位及保护配置研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(22): 127-133.
SUN Gang, SHI Bonian, ZHAO Yuming, et al. Research on the fault location method and protection configuration strategy of MMC based DC distribution grid[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(22): 127-133.
- [16] 童晓阳, 张绍迅. 基于灰色关联度的配电网故障区段定位与类型识别方法[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(4): 113-118.
TONG Xiaoyang, ZHANG Shaoxun. Grey relational degree based fault section and type recognition method for distribute network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(4): 113-118.
- [17] 高伟, 陈伟凡, 杨耿杰. 基于奇异值分解和多级支持向量机的配电网故障类型识别[J]. *电子测量与仪器学报*, 2018, 32(2): 62-71.
GAO Wei, CHEN Weifan, YANG Gengjie. Fault type

- identification for distribution network based on singular value decomposition and multi-level support vector machine[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2018, 32(2): 62-71.
- [18] 杨启洪, 秦川, 刘杰荣, 等. 基于对比歧化和深度置信网络的配电网故障类型识别[J]. *电网与清洁能源*, 2019, 35(2): 52-57.
YANG Qihong, QIN Chuan, LIU Jierong, et al. Fault identification of distribution network based on contrast disproportionate algorithm and deep belief network[J]. *Power System and Clean Energy*, 2019, 35(2): 52-57.
- [19] USMAN M. Validation of a PMU based fault location identification method for smart distribution network with photovoltaics using real data[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2018, 12(21): 5824-5833.
- [20] 赵智, 王艳松, 鲍兵, 等. 基于小波神经网络的配电网故障类型识别[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2007, 19(6): 93-96.
ZHAO Zhi, WANG Yansong, BAO Bing, et al. Fault type identification in distribution network based on wavelet neural network[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2007, 19(6): 93-96.
- [21] 戚振彪, 凌松, 刘文烨, 等. 基于高频测试信号注入的配电网故障节点在线识别方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(4): 110-115.
QI Zhenbiao, LING Song, LIU Wenye, et al. On-line fault node identification method for distribution network based on high frequency test signal injection[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(4): 110-115.
- [22] OROZCO HENAO C, BRETAS A S, HERRERA OROZCO A R, et al. Towards active distribution networks fault location: contributions considering DER analytical models and local measurements[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2018, 99: 454-464.
- [23] 孙玉伟, 刘亚东, 方健, 等. 分布式光伏接入对配电网线路故障定位的影响分析[J]. *智慧电力*, 2020, 48(9): 102-107.
SUN Yuwei, LIU Yadong, FANG Jian, et al. Influence of distributed photovoltaic access on fault location in distribution network lines[J]. *Smart Power*, 2020, 48(9): 102-107.
- [24] LIANG R, PENG N, YANG Z, et al. A novel single-phase-to-earth fault location method for distribution network based on zero-sequence components distribution characteristics[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2018, 102: 11-22.
- [25] YANG H, LIU X, GUO Y, et al. Fault location of active distribution networks based on the golden section method[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 21(18): 1-9.
- [26] WU H, YANG J, WANG Q, et al. Overview of distribution network fault location[J]. *Energy and Power Engineering*, 2019, 11(5): 209-219.
- [27] TASHAKKORI A, WOLFS P J, ISLAM S, et al. Fault location on radial distribution networks via distributed synchronized traveling wave detectors[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2019, 35(3): 1553-1562.
- [28] 陈燕擎, 刘涛, 韩文建, 等. 考虑配电网分布式零序电流关系的单相接地故障定位[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(22): 118-126.
CHEN Yanqing, LIU Tao, HAN Wenjian, et al. Single-phase ground fault location considering the distributed zero-sequence current relationship in distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(22): 118-126.
- [29] IZUDIN, JABR R A, HENSELMEYER S, et al. Fault location in distribution networks through graph marking[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(2): 1345-1353.
- [30] SUN H, YI H, ZHUO F, et al. Precise fault location in distribution networks based on optimal monitor allocation[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2020, 35(4): 1788-1799.
- [31] 胡珏, 韦钢, 谢素娟, 等. 基于人工鱼群算法的主动配电网故障定位[J]. *智慧电力*, 2020, 48(6): 112-118, 124.
HU Jue, WEI Gang, XIE Sujuan, et al. Active distribution network fault location method based on artificial fish swarm algorithm[J]. *Smart Power*, 2020, 48(6): 112-118, 124.
- [32] SHI S, ZHU B, LEI A, et al. Fault location for radial distribution network via topology and reclosure-generating traveling waves[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(6): 6404-6413.
- [33] JIA K, FENG T, ZHAO Q, et al. High frequency transient sparse measurement-based fault location for complex DC distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 11(1): 312-322.

收稿日期: 2020-10-03; 修回日期: 2021-01-25

作者简介:

高冰(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统科技环保管理工作; Email: 2432166443@qq.com

崔泽坤(1996—), 男, 本科, 助理工程师, 主要研究方向为变电检修工作。E-mail: chui_1987@163.com

(编辑 姜新丽)