

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190399

# 基于高频测试信号注入的配电网故障节点在线识别方法

戚振彪, 凌松, 刘文烨, 刘志祥, 俞飞

(国网安徽省电力有限公司, 安徽 合肥 230022)

**摘要:** 为准确识别带电网络中的故障, 提出了一种适用于多层复杂配电网故障节点的在线识别和定位方法。该方法将高频测试信号注入电网, 通过智能电表向中心单元提供的电网信息获取阻抗参数, 并根据阻抗特性和电网高频测试信号下的响应结果检测是否存在故障节点。采用该方法对45节点三层配电网进行多种条件下仿真, 接着对8节点低压网络模型进行测试, 讨论模数转换分辨率和测量误差公差对检测精度的影响。仿真和测试的结果发现, 故障节点处高频接收信号电压与估计电压差值最大, 表明该方法能够准确识别配电网中的故障节点。

**关键词:** 智能电网; 故障识别与定位; 故障节点; 高频信号注入; 阻抗特性

## On-line fault node identification method for distribution network based on high frequency test signal injection

QI Zhenbiao, LING Song, LIU Wenye, LIU Zhixiang, YU Fei

(State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230022, China)

**Abstract:** In order to accurately identify faults in multi-layer complex distribution network, an on-line fault node identification and location method is proposed. This method injects the high frequency test signal into the power grid, obtains the impedance parameters from the grid information provided by smart meters to the central unit, and detects whether there are fault nodes according to the impedance characteristics and the response results under the high frequency test signal of the power grid. The method is used to simulate 45-node 3-layer distribution network under various conditions, then the 8-node low-voltage network model is tested. The influence of analog-to-digital conversion resolution and measurement error tolerance on detection accuracy is discussed. The simulation and test results show that the difference between the received signal voltage of high frequency and the estimated voltage at the fault node is the largest, indicating that the method can accurately identify the fault node in the distribution network.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51767008), Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. PDB17201800040), and Fund of China Electric Power Research Institute (No. PD83-17-006).

**Key words:** smart grid; fault identification and location; faulty node; high frequency signal injection; impedance characteristics

## 0 引言

电网故障是一种不可预测的情况, 可能导致整个系统运行不平衡<sup>[1-3]</sup>。由于各种原因, 配电网各区域之间可能会出现故障节点(Faulty Node, FN)<sup>[4-7]</sup>。非法接入电网窃取电能极有可能导致接入点成为故

障节点, 这将导致电力系统出现不可预知的技术问题<sup>[8-9]</sup>。此外由于这部分非法接入未核算用电量, 从经济的角度来看该问题将严重影响电力公司收益<sup>[10]</sup>。

文献[11-12]提出了含分布式电源的智能电网故障定位方法。文献[13]提出了一种基于自动抄表的非法用电检测方法, 但不能对故障节点进行局部化, 且对校准电表质量要求较高。文献[14]提出了一种适用于高压配电网的远程简单故障节点定位方法, 但该方法不适用于短距离或多层配电网。

本文提出了一种在三相低压复杂配电网中故障

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51767008); 国家电网公司科技项目资助(PDB17201800040); 中国电科院基金项目资助(PD83-17-006)

节点识别定位方法。该方法是根据智能电表向中心单元提供的信息, 将测试信号注入电网以获取网络阻抗参数。相对于前面提到的其他方法, 该方法可应用于多层复杂配电网, 且无需对用户断电。仿真和实际网络测试结果显示本文所提方法可以精确地完成故障节点的定位。

### 1 智能电网结构

智能电网基础设施对电网自动化具有重要的推动作用, 将显著提高现有电网的可靠性, 提高智能电网的能源输送效率是智能电网的发展方向<sup>[15]</sup>。在智能电网基础设施中, 可以通过用户和电网之间的在线双向连接来显示电能的使用方式、时间以及地点<sup>[16]</sup>。低压侧智能电网框图如图 1 所示。

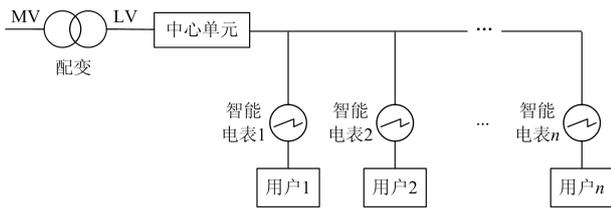


图 1 智能电网低压侧拓扑图  
Fig. 1 LV side smart grid topology

智能电网的两个重要组成部分是智能电表和中心单元。每个智能电表都有一个独立的高频电压测量单元来测量接收到的信号电压<sup>[17-18]</sup>, 中心单元具有一个额外的电流注入单元。用户与中心设备可通过电力线载波、ZigBee 或 GSM 进行通信<sup>[19-20]</sup>。

#### 1.1 智能电表

智能电表的正常运行需要通用智能电表和调解器两个元件。通用智能电表用于获取计算各节点阻抗所需的数据, 还能够将数据存储到外部内存中, 并通过物理层将其发送到主机。为了计算电力线在低频下的阻抗, 每台电表向主机单元发送 6 项数据: 有功功率( $P$ )、无功功率( $Q$ )、视在功率( $S$ )、电压有效值( $V_{rms}$ )、电流有效值( $I_{rms}$ )和线路频率( $f$ ), 然后计算每个节点的用电量并将其传输到主单元。解调器将数据发送到指定的节点, 可以根据电力线载波和无线通信等多种通信技术设计解调器单元。

#### 1.2 电流注入单元

电流注入单元由可编程电流源、功率放大器 and 高压耦合器组成, 安装在中央单元。为了确定预测与实测电力线阻抗模型之间的差异, 可编程电流源将恒定电流注入网络。主馈线的注入电流信号对各个节点施加特定电压, 通过注入电流信号的频率确定各节点最大允许峰间互调电压。EN50065-1 标准规定了允许施加在各个节点上的最大峰间电压<sup>[21]</sup>,

根据该标准所要求的频率( $a$  波段), 最大调峰电压等于 1 V。维持设定的限制电压需要精确的电力线阻抗估计值, 阻抗值可由统计数据或在线阻抗测量确定。电流注入单元装置框图如图 2 所示。

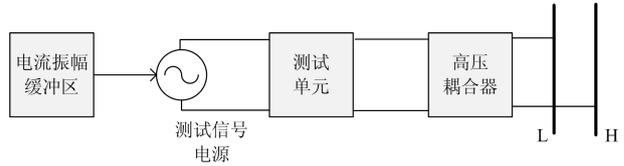


图 2 测试信号注入单元

Fig. 2 Test signal injection unit

### 2 电网模型

本文方法依赖于 PLC 频率下电力系统的潮流分析, 需要确定负载的高频阻抗。高频负载阻抗可以直接在 PLC 频率测量, 也可以先在输电频率下测量, 然后利用负载模型由智能电表转换成 PLC 频率。智能电表在确定负载阻抗后, 将信息周期性地传输到中央单元用于高频潮流分析。测量周期是固定的, 假定在这些测量周期内负载阻抗是恒定的。

#### 2.1 低频网络阻抗模型

检测和定位故障节点位置需要网络阻抗模型, 该模型由节点的负载和各馈线段的阻抗模型组成。每个节点测得的有功功率和无功功率决定了低频下节点负载阻抗基本模型, 利用智能电表测量的视在功率和有功功率可以确定阻抗值阻抗的实部和虚部。低压侧智能电网阻抗模型如图 3 所示。

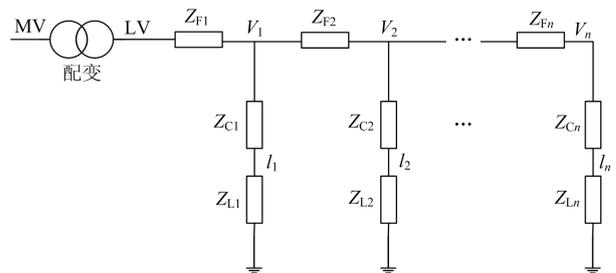


图 3 智能电网低压侧阻抗模型

Fig. 3 Smart grid impedance model in LV side

网络中有  $n$  个节点,  $Z_{Fi}$  是馈线在截面  $i$  上的阻抗,  $Z_{Ci}$  是连接第  $i$  个用户的电缆阻抗,  $f$  是频率,  $Z_{Li}$  是负载阻抗, 包含有电阻分量  $R_{Li}$  和电感分量  $L_{Li}$ 。由式(2)、式(3)所示的能耗信息得到参数  $R_{Li}$  和  $L_{Li}$ 。

$$Z_{Li} = R_{Li} + j2\pi f L_{Li} \quad (1)$$

$$R_{Li} = \frac{P_i}{I_{i,rms}^2} \quad (2)$$

$$L_{Li} = \frac{\sqrt{S_i^2 - P_i^2}}{2\pi f_L I_{i_{rms}}}, \quad i = [1, 2, 3, \dots, n] \quad (3)$$

式中:  $Z_{Fi}$  和  $Z_{Ci}$  是馈线参数;  $P_i$ 、 $S_i$  和  $I_{i_{rms}}$  分别是第  $i$  个节点的有功功率、视在功率和 RMS 电流。

## 2.2 高频网络阻抗模型

智能电表测量的是电源频率(50 Hz)上的视在功率和有功功率, 电源频率的阻抗测量值在高频时转换为电流注入。利用测得的低频阻抗可以确定高频阻抗参数, 然后构造多项式映射传递函数用于频率转换, 传递函数随负载和工作频率的变化而变化。高频模型的定义如式(4)所示。

$$Z_{LH}(f) = H(f)Z_L \quad (4)$$

式中:  $Z_{LH}(f)$  是在工作频率  $f$  上的复阻抗;  $Z_L$  是低频阻抗;  $H(f)$  是多项式映射的复传递函数, 其一般形式如式(5)所示。

$$H(f) = (a_d + jb_d)f^d + (a_{d-1} + jb_{d-1})f^{d-1} + \dots + (a_0 + jb_0) \quad (5)$$

式中:  $a_n$  和  $b_n$  是要表示的  $H(f)$  的  $d$  次多项式系数; 多项式系数是根据国内典型负荷的阻抗幅值和相位变化来确定的。

虽然可以计算负载的转换比, 但直接测量高频阻抗更为精确。为了测量电流和电压信号的高频部分, 电流传感器和电压传感器应具有较宽的带宽。在高频电压和电流测量的基础上确定负载阻抗, 所测得的高频负载阻抗通过各个智能电表传送到中央单元。中心单元存有预先确定的网络信息, 包括节点数量和各个节点之间的阻抗, 其中节点间的阻抗是基于节点间电力电缆的高频阻抗, 表 1 显示了 90 kHz 时典型的电力线阻抗特性<sup>[21]</sup>。

表 1 90 kHz 电力线路典型阻抗值

Table 1 Power line impedance characteristics at 90 kHz

Al/Fe/mm <sup>2</sup>	电阻/(Ω/km)	电抗/(Ω/km)
25.0	5.55	540.0
35.0	5.66	179.8
50.0	4.95	503.1

中心单元每次从智能电表采集高频负载阻抗时将构造新的导纳矩阵。在网络架构中, 有  $2n+2$  个节点数, 包括接地节点和中心单元节点。设接地处为节点 0, 仪表与节点 0 之间的阻抗为负载。两个节点(节点  $i$  和节点  $k$ )之间的导纳为

$$y_{ik} = \frac{1}{A_{ik} + jB_{ik}} \quad (6)$$

式中,  $A_{ik}$  和  $B_{ik}$  分别为节点间阻抗的实部和虚部。网络中的导纳矩阵可以表示为

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_{2n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1(2n+1)} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2(2n+1)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{(2n+1)(2n+1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_{2n+1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$[V_1, V_2, \dots, V_{2n+1}]$  矩阵具有单独的节点电压,  $[I_1, I_2, \dots, I_{2n+1}]$  矩阵表示进入各个节点的电流。每个节点的对角元素称为自导纳, 是连接到该节点的所有导纳之和, 如式(8)所示。

$$Y_{ii} = \sum_{k=0}^{2n+1} y_{ik}, \quad i \neq k \quad (8)$$

非对角元素即互导纳, 等于节点之间的导纳的负值, 如式(9)所示。

$$Y_{ik} = -y_{ki} \quad (9)$$

对于给定的高频注入电流, 利用构造的阻抗矩阵对各节点的电压进行负载流分析。高频下唯一的注入信号电源是可编程电流源。因此, 除了第一个节点电流  $I_1$  外其他所有节点电流  $I_i$  均为零。将单个节点电压记录在矩阵  $V_{bus}$  中。

## 2.3 高频测试信号的网络响应

为了确定真实的电网络特性, 在馈线起点注入高频测试信号。测试信号设定为可编程电流源, 由注入信号在高频时的峰间电压限制确定最大注入电流。

本文提出两种不同的电流大小调整方法。第一种在一段时间内, 用显示基线侧总净阻抗平均值的统计数据来设置电流。另一种方法是自适应电流调整, 该方法对高频电压进行连续监测, 注入电流大小根据单个节点的测量电压进行调整。第二种方法的可控性虽然比第一种方法更优, 但需要更多的处理时间<sup>[22]</sup>。利用高频信号测量单元对被测信号的特性进行测定, 该装置由高压耦合器、带通滤波器和高频 RMS 电压表组成。采用高压耦合器将高频测试信号从高压电力线中分离出来, 该耦合器的结构基于 LC 带阻滤波器, 在测试信号范围内具有较高阻抗。为了减小噪声对接收信号的影响, 采用带通滤波器且只通过 EN50065-1 标准范围内的测试信号<sup>[24-25]</sup>。设备之间的通信可以基于电力线载波或无线通信。

## 3 故障诊断

基于提出的阻抗模型对测试信号注入进行仿真得到的节点电压阵列  $V_{bus}$ , 由注入测试信号在节点处测量到的高频接收信号电压的阵列为  $V_{meas}$ 。检测单元根据两个输入矩阵在每次迭代时运行特性, 检

测网络上是否存在故障节点。测量电压阵列与估计电压阵列的差值为

$$\Delta V = V_{\text{meas}} - V_{\text{bus}} \quad (10)$$

在没有故障节点的情况下  $\Delta V$  为零。将数组中的每个元素与阈值进行比较, 可表示为

$$\forall x \in [\Delta V]: \text{if } x \geq V_T, \Rightarrow x \in FNA \quad (11)$$

式中:  $x$  是  $\Delta V$  中元素的集合;  $V_T$  是阈值电压。

异常的矩阵元素显示了存在故障节点的区域, 故障节点区域(FNA)内元素的峰值显示了网络中离故障位置最近的故障节点。FN 的定义如下:

$$\forall x \in FNA: \text{if } x_i \geq x_k, k \neq i \Rightarrow x_i = FN \quad (12)$$

该方法可以检测 FN 的存在以及确定 FN 的位置, 检测定位方法流程图如图 4 所示。

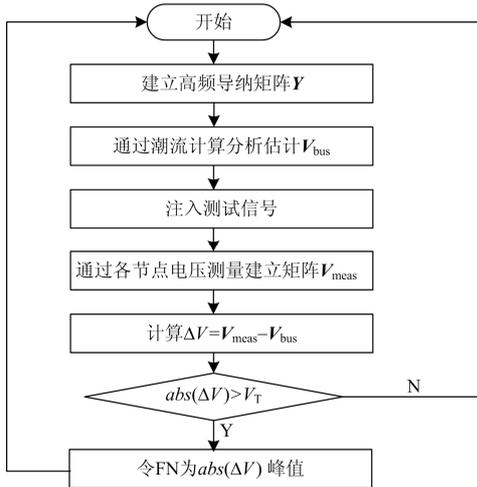


图 4 故障节点检测定位方法流程图

Fig. 4 Detecting and localizing the FN procedure flow diagram

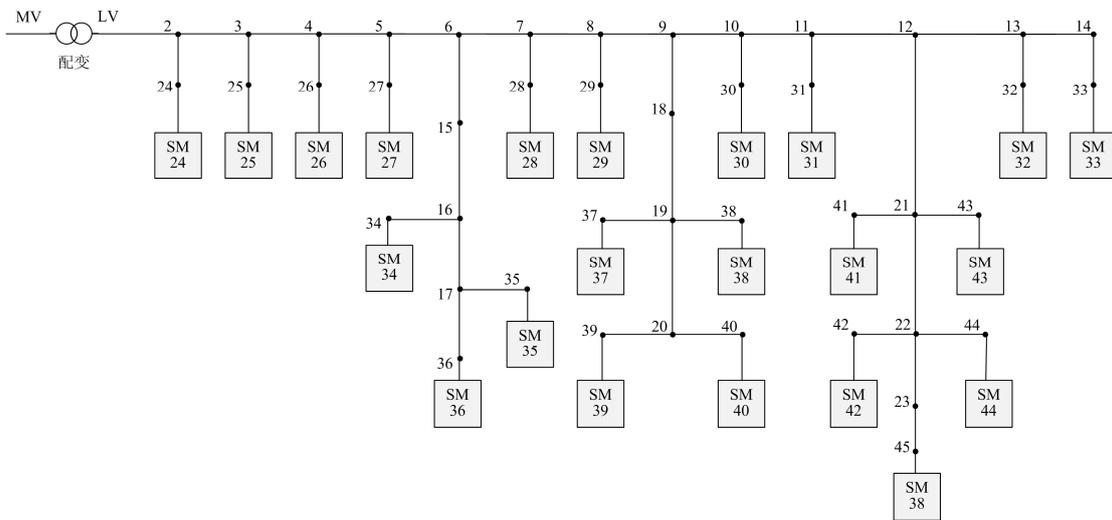


图 5 含 22 个智能电表的三层电网模型

Fig. 5 Three-layer power line network model with 22 smart meters

## 4 算例分析

通过不同的实例验证了该方法在仿真网络和实际网络中的有效性。首先对一个三层配电网在三种不同的场景下进行仿真分析, 然后对一个 8 节点实际网络进行了测试。

### 4.1 网络仿真

仿真选择的三层配电网网络如图 5 所示, 该网络有 45 个节点 (1, 2, ..., 45), 且只有其中 22 个节点 (节点 24~45) 有智能电表。设定了三种情况: 在第一种情况下, 网络中没有故障节点; 在第二和第三种情况下, 每个故障节点位于不同的位置。负荷特性考虑了典型的居民负荷模式, 感性负载和阻性负载都被考虑在内。在该模型中, 每段馈线都被建模为分流介质传输线。根据  $25 \text{ mm}^2$ , Al/Fe 电缆模型, 根据表 1 中得到了馈线和电缆的特性, 可表示为

$$\begin{cases} Z_{Fi} = R_{Fi} + j2\pi f_H L_{Fi} \\ Z_{Ci} = R_{Ci} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $Z_{Fi}$  是第  $i$  段馈线的阻抗;  $Z_{Ci}$  是连接馈线和第  $i$  个负荷的电缆阻抗;  $f_H$  是注入信号的频率; 馈线电阻  $R_{Fi}$  为  $100 \text{ m}\Omega$ ; 馈线电感  $L_{Fi}$  为  $16 \mu\text{H}$ 。由于连接馈线到每个负载的电缆长度很短, 因此只使用电阻元件对其进行建模, 即  $R_{Ci} = 0.5 \Omega$ 。  $R_{Li}$  取值范围为  $3 \sim 10 \Omega$ ,  $L_{Li}$  取值范围为  $0 \sim 20 \text{ mH}$ 。测试信号频率选择为  $90 \text{ kHz}$ 。

该方法验证考虑了三种不同的情况。第一种是网络正常运行, 在电网中没有非法接入或故障节点的情况下  $\Delta V$  约为零。

第二种情况认为 FN 接近节点 40 且与 2 Ω 电阻负载相连, ΔV 在距离 FN 最近的节点 40 处有一个峰值, 如图 6 所示。

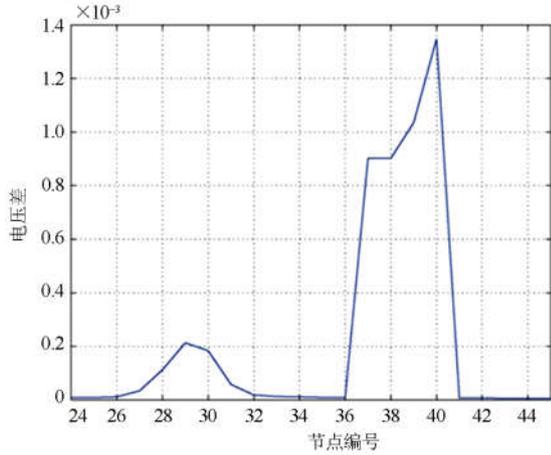


图 6 FN 接近第 40 个节点时各节点电压差 ΔV 值  
Fig. 6 ΔV for each node where FN is close to node 40

对于第三种情况, FN 的阻抗与第二种情况相同, FN 靠近节点 16。由于节点 34 是 FN 附近距离最近的智能电表, 因此节点 34 附近 ΔV 取值最大, 如图 7 所示。

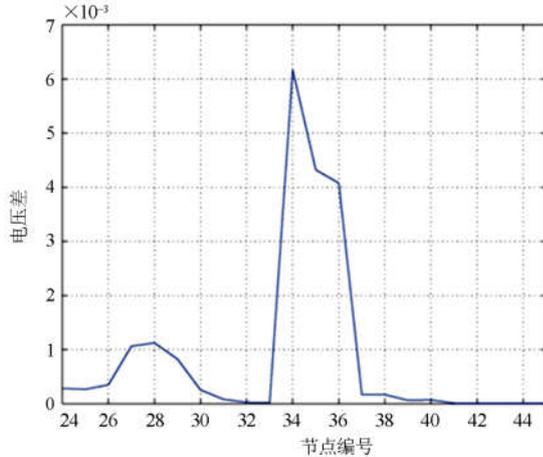


图 7 FN 接近第 34 个节点时各节点电压差 ΔV 值  
Fig. 7 ΔV for each node where FN is close to node 34

可以得出结论, 该算法能够准确地检测网络中的 FN。FNA 是 ΔV 中大于 V<sub>T</sub> 的元素, 可以看出 FNA 依赖于阈值电压 V<sub>T</sub>, 因此应选择合适的 V<sub>T</sub>, 使 FNA 的识别更具准确性。在第三种场景中, 令 V<sub>T</sub> 为 3×10<sup>-3</sup> V 可以准确识别故障节点。

影响故障节点识别精度的因素很多, 主要因素是模数转换器分辨率的截断效应、功率模型的不准确、电力线阻抗矩阵模型的不准确以及负载模型的非线性。故障节点处的电压大小要比网络中任何其

他节点上的电压大得多, 将故障节点检出率 ζ<sub>FNDR</sub> 定义为故障节点处 ΔV 值与网络中其余任意节点中最大 ΔV 的比值, 如式(14)所示。

$$\zeta_{\text{FNDR}} = \frac{\Delta V(\text{FN})}{\max(\Delta V(i)|_{i=1}^n, i \neq \text{FN})} \quad (14)$$

模数转换器的分辨率对 ζ<sub>FNDR</sub> 影响的分析如图 8 所示, ζ<sub>FNDR</sub> 应大于 1 才能检测到故障节点, 且随着 ζ<sub>FNDR</sub> 值的增大, 检测质量随之提高。高频网络模型是基于节点功率测量和由低频到高频的线性负载转换, 功率测量的公差将导致网络模型估算误差。在进行潮流分析之前, 通过向最终网络模型中注入随机误差来对容错进行建模。认为总误差是指当故障节点的位置从第一个节点变化到最后一个节点时的错误识别次数, 公差百分比与总误差的关系如图 9 所示, 公差百分比越大, 总误差越大。

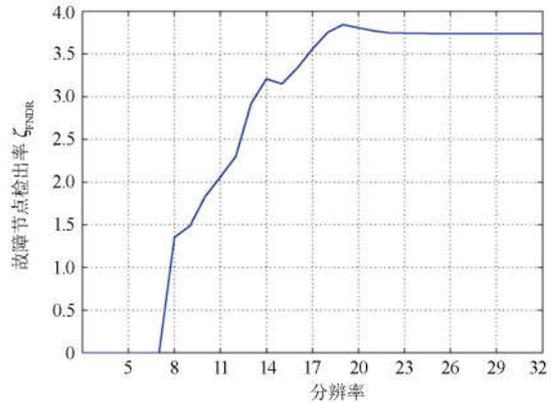


图 8 数模转换器分辨率对 ζ<sub>FNDR</sub> 的影响  
Fig. 8 Analog to digital converter resolution versus ζ<sub>FNDR</sub>

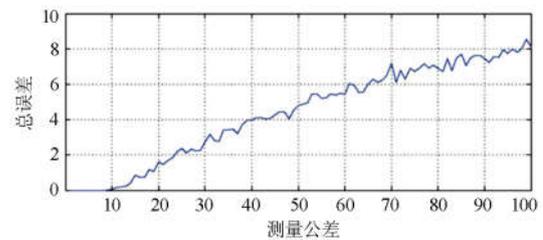


图 9 测量公差与总误差关系示意图  
Fig. 9 Measurement tolerance versus total error

#### 4.2 实际网络测试

在实验室中搭建了一个 8 节点网络, 采用本文所提方法在该网络中的进行性能测试, 实际网络模型如图 10 所示。与低阻抗特性相比, 更高的负载阻抗增加了故障节点检测程序的复杂性。为了反映最坏的情况, 选取节点阻抗在 40 ~ 80 Ω 之间。

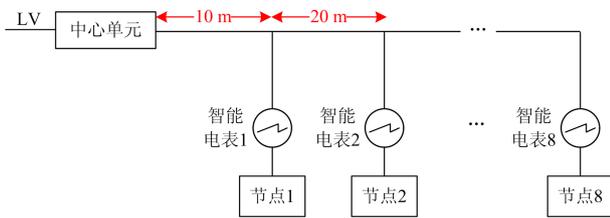


图 10 实际测试网络模型

Fig. 10 Implemented experimental network

注入装置向电网注入电流，每个节点都有一个解耦网络来测量该节点的注入信号效果。实验室搭建的耦合/解耦电路如图 11 所示，包含一个阻止 60 Hz 信号的高通滤波器，用于保护低压电流注入和电压测量电路不受网络中较高电平的影响。在试验中，电流注入遵循 EN50065 -1 标准，注入到馈线的电流振幅为 142 mA，注入电流的幅值是根据每个节点的最大允许峰间加电压(1 V)来设置的，注入信号波形如图 12 所示。

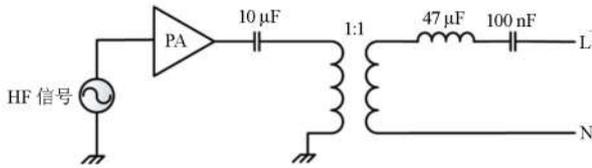


图 11 耦合/解耦电路图

Fig. 11 Coupler/decoupler circuit

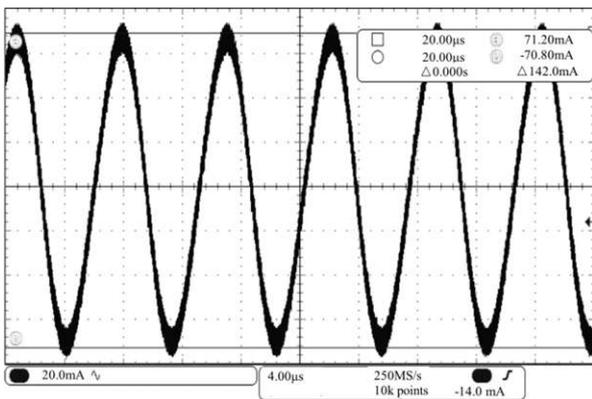


图 12 注入测试信号波形

Fig. 12 Injected test signal waveform

将故障节点连接到节点 4 进行测试，根据 142 mA 电流数据采集各节点的电压电流信息，将各节点的高频阻抗与预定的电缆阻抗相结合，形成高频阻抗网络。对注入电流进行了高频负载流分析，将负载流分析得到的实测电压和估计的节点电压进行比较计算  $\Delta V$ ，测量和估计的节点电压如表 2 所示。在故障节点检测算法中采用电压矩阵，根据本文所提

方法，将靠近故障发生位置的节点识别为故障节点。从表 2 可以看出， $\Delta V$  的绝对值在节点 4 处达到峰值，即故障节点。

表 2 有无 FN 情况下的测量和估计节点电压

Table 2 Simulated and measured nodes voltage without and with FN

节点	无FN(估计值)	有FN(测量值)	$\Delta V$
1	1.022	0.989	0.033
2	0.603	0.536	0.067
3	0.525	0.397	0.128
4	0.376	0.242	0.134
5	0.244	0.176	0.068
6	0.157	0.121	0.036
7	0.141	0.095	0.046
8	0.149	0.097	0.052

测量精度会影响检测程序的性能，为了得到程序性能对测量精度的敏感性，测量数据中加入了测量误差，误差容忍度在总测量值的 0~20% 范围内。图 13 给出了故障节点电压与其他节点电压在测量误差容忍度方面的最小电压差，误差公差越小，电压差越大。因此，为了有足够的电压差来检测故障节点，测量值和低频到高频的转换矩阵应具有好的精度。在测量或转换矩阵中存在较大误差时，故障节点检测的准确度会下降。

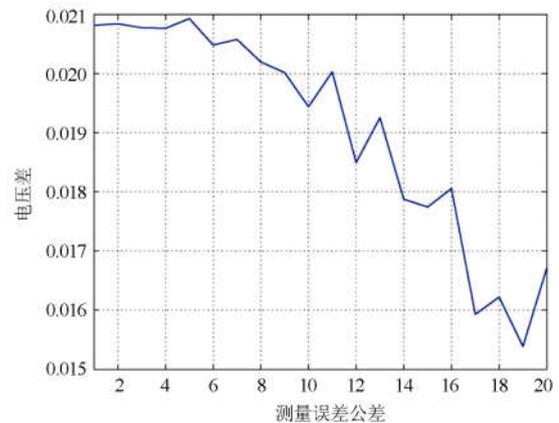


图 13 FN 电压对其他节点电压的最小偏差与测量误差的关系

Fig. 13 Minimum voltage deference of FN voltage to other node voltages versus measurement error tolerance

## 5 结论

本文提出了一种在低压电网中检测和定位故障节点的新方法。该方法根据电网特性和电网对高频测试信号的响应而设计的，可在无干扰的带电网

络中运行。通过对三种不同场景的仿真,确定了模数转换对故障节点定位的截断效应,模拟了该方法对智能电表分辨率的依赖性。通过实验网络进行了验证,结果该方法表明有效地识别和定位故障节点。

### 参考文献

- [1] 边莉, 边晨源. 电网故障诊断的智能方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 146-153.  
BIAN Li, BIAN Chenyuan. Review on intelligence fault diagnosis in power networks[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 146-153.
- [2] 王惠杰, 张家宁, 王雷雨, 等. 基于模糊分析与信息熵的大型机组故障诊断基准值研究[J]. 热力发电, 2018, 47(3): 32-37.  
WANG Huijie, ZHANG Jianing, WANG Leiyu, et al. Research on fault diagnosis benchmark of large scale unit based on fuzzy analysis and information entropy[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(3): 32-37.
- [3] 刘健, 张志华, 张小庆, 等. 配电网故障处理若干问题探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 1-6.  
LIU Jian, ZHANG Zhihua, ZHANG Xiaoqing, et al. Investigation on fault processing for electric power distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 1-6.
- [4] 王守鹏, 赵冬梅. 基于免疫克隆约束多目标优化方法的电网故障诊断[J]. 电网技术, 2017, 41(12): 4061-4068.  
WANG Shoupeng, ZHAO Dongmei. Power grid fault diagnosis based on immune clonal constrained multi-objective optimization method[J]. Power System Technology, 2017, 41(12): 4061-4068.
- [5] 李辉, 贾晓风, 李利娟, 等. 基于元胞自动机的电网隐性故障传播模型关键线路识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 16-23.  
LI Hui, JIA Xiaofeng, LI Lijuan, et al. An approach for critical lines identification of power grid hidden fault propagation model based on cellular automata[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 16-23.
- [6] 张志华, 乔红, 邵文权, 等. 配电网线路相间故障重合前无故障识别方法研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(2): 66-71.  
ZHANG Zhihua, QIAO Hong, SHAO Wenquan, et al. Non-fault detection in phase-to-phase faults before reclosing in distribution network[J]. Smart Power, 2018, 46(2): 66-71.
- [7] 张雪松, 徐琛, 马啸, 等. 不依赖时间同步的多支配网故障精确定位方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(2): 56-63.  
ZHANG Xuesong, XU Chen, MA Xiao, et al. Research on the precise fault location scheme for distribution network with multiple branches independent of time synchronization[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2): 56-63.
- [8] HAGH M T, RAZI K, TAGHIZADEH H. Fault classification and location of power transmission lines using artificial neural network[C] // 2007 International Power Engineering Conference (IPEC 2007), December 3-6, 2007, Singapore, Singapore: 1109-1114.
- [9] PASDAR A, MIRZAKUCHAKI S. A solution to remote detecting of illegal electricity usage based on smart metering[C] // 2007 2nd International Workshop on Soft Computing Applications, August 21-23, 2007, Oradea, Romania: 163-167.
- [10] CHEN H, CANIZARES C A, SINGH A. ANN-based short-term load forecasting in electricity markets[C] // Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference, 2001: 411-415.
- [11] 陈炜, 李妍, 陈峰, 等. 计及主动技术的配电网经济效益分析[J]. 电气技术, 2017(5): 6-11.  
CHEN Wei, LI Yan, CHEN Feng, et al. Economic benefits analysis of distribution network considering active technologies[J]. Electrical Engineering, 2017(5): 6-11.
- [12] 张磐, 张愉, 丁一, 等. 基于微扰法的低压有源配电网故障定位方法[J]. 中国电力, 2018, 51(12): 63-71.  
ZHANG Pan, ZHANG Yu, DING Yi, et al. Fault location for low voltage active distribution network based on perturbation method[J]. Electric Power, 2018, 51(12): 63-71.
- [13] MIKROPOULOS P, ZAGKANAS V. Threshold inception conditions for positive DC corona in the coaxial cylindrical electrode arrangement under variable atmospheric conditions[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(1): 278-286.
- [14] 雷倩, 吉兴全, 文福栓, 等. 利用暂态分量的含分布式电源配电系统故障诊断[J]. 电力建设, 2016, 37(2): 42-49.  
LEI Qian, JI Xingquan, WEN Fushuan, et al. Fault diagnosis of distribution system with distributed generation employing transient component[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(2): 42-49.
- [15] CAVDAR I H. A solution to remote detection of illegal electricity usage via power line communications[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(4): 1663-1667.
- [16] DA SILVA M, COURY D V, OLESKOVICZ M, et al. Combined solution for fault location in three-terminal lines based on wavelet transforms[J]. IEEE Transactions on Generation, Transmission, Distribution, 2010, 4(1):

- 94-103.
- [17] 林宇锋, 钟金, 吴复立. 智能电网技术体系探讨[J]. 电网技术, 2009, 33(12): 8-14.  
LIN Yufeng, ZHONG Jin, WU Felix. Discussion on smart grid supporting technologies[J]. Power System Technology, 2009, 33(12): 8-14.
- [18] BENNETT C, HIGHFILL D. Networking AMI smart meters[C] // IEEE Energy 2030 Conference, 2008.
- [19] 何培东, 蒲丽娟, 杜斌, 等. 基于 RFID 的智能电表快速定位系统设计与实现[J]. 电测与仪表, 2018, 55(增刊 1): 98-101, 107.  
HE Peidong, PU Lijuan, DU Bin, et al. Design and implementation of intelligent electric meter rapid positioning system based on RFID[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(S1): 98-101, 107.
- [20] 王思彤, 周晖, 袁瑞铭, 等. 智能电表的概念及应用[J]. 电网技术, 2010, 34(4): 17-23.  
WANG Sitong, ZHOU Hui, YUAN Ruiming, et al. Concept and application of smart meter[J]. Power System Technology, 2010, 34(4): 17-23.
- [21] 曹军威, 万宇鑫, 涂国煜, 等. 智能电网信息系统体系结构研究[J]. 计算机学报, 2013, 36(1): 143-167.  
CAO Junwei, WAN Yuxin, TU Guoyi, et al. Information system architecture for smart grids[J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(1): 143-167.
- [22] 张勇. 智能电网调度控制系统实时监控与预警功能规范解读[J]. 中国电力, 2017, 50(11): 48-53.  
ZHANG Yong. Interpretation of technical specification for realtime supervisory control & early warning of smart grid operation and control system[J]. Electric Power, 2017, 50(11): 48-53.
- [23] CENELEC Standard EN 50065-1. Signaling on low-voltage electrical installations in the frequency range 3 kHz to 148.5 kHz[S]. Brussels: CENELEC, 1991.
- [24] 胡金杭, 施永, 周晨, 等. 微电网中的线路阻抗测量方法研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(18): 28-34.  
HU Jinghang, SHI Yong, ZHOU Chen, et al. Line impedance measurement method for micro-grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(18): 28-34.
- [25] 王宾, 孙华东, 张道农. 配电网信息共享与同步相量测量应用技术评述[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(增刊 1): 1-7.  
WANG Bin, SUN Huadong, ZHANG Daonong. Review on data sharing and synchronized phasor measurement technique with application in distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(S1): 1-7.

收稿日期: 2019-04-10; 修回日期: 2019-05-28

作者简介:

戚振彪(1983—), 男, 硕士, 主要研究方向为供配电技术、新能源发电等; E-mail: lings2016@an.sgcc.com.cn

凌松(1982—), 男, 硕士, 主要研究方向为供配电技术、配网自动化等;

刘文辉(1976—), 男, 硕士, 主要研究方向为供配电技术、新能源发电等。

(编辑 张爱琴)