

# 基于极点对称模态分解的配电网单相接地故障区段定位技术

殷志华<sup>1</sup>, 孙国强<sup>1</sup>, 丁建忠<sup>2</sup>, 吕峰<sup>2</sup>, 袁海星<sup>2</sup>, 卫志农<sup>1</sup>

(1. 河海大学 可再生能源发电技术教育部工程研究中心, 江苏 南京 210098; 2. 国网无锡供电公司, 江苏 无锡 214061)

**摘要:**配电网发生单相接地故障后, 系统中将产生丰富的暂态电气量。利用故障点上游暂态零序电流幅值远大于故障点下游及正常线路的特征, 提出一种基于暂态零序电流极点对称模态分解(ESMD)的配电网故障区段定位方法。基于实际配电网线路参数搭建典型缆-线混联仿真模型, 对故障后暂态零序电流进行极点对称模态分解并构造相应的暂态能量函数, 将构造所得的暂态能量函数作为评价各测点暂态零序电流幅值强弱的指标进行故障区段定位。仿真结果表明所提方法可有效提取故障特征, 对各种故障工况适应性强, 且各测点仅需上传 1 个暂态能量值, 可有效降低通信要求、节约硬件投资成本。

**关键词:**配电网; 单相接地故障; 极点对称模态分解; 故障区段定位

**中图分类号:**TM 761

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.issn.1006-6047.2019.06.025

## 0 引言

中性点非有效接地配电网对提高供电可靠性非常有利, 我国及其他很多国家的中压配电网普遍采用这种接地方式<sup>[1]</sup>。在其所有故障类型中, 单相接地故障占比高达 80%<sup>[2]</sup>, 一旦发生此类故障必须及时定位并排除故障, 但因其故障特征较弱导致故障识别困难, 如何快速准确地找到故障发生位置是传统电力系统中为数不多未得到彻底解决的问题之一<sup>[3-5]</sup>。

配电网单相接地故障所产生的暂态电流信号及暂态电压信号都属于典型的非平稳信号<sup>[6-7]</sup>。为分析和处理这类信号, 众多学者基于傅里叶理论提出并发展了一系列信号分析方法, 但均存在各自的局限性。如基于线性叠加原理的小波变换, 该变换在不同小波基、分解层数下一般都会得到不同的分解结果, 而不同故障角、过渡电阻和线路参数下的接地故障暂态过程又存在较大差异<sup>[8-10]</sup>, 这就很难通过设置固定分解参数以适应所有故障工况。文献[11]提出通过利用广义 S 变换提取故障点上下游波形能量特征进行定位判据构造, 该方案弥补了小波变换对母小波选择的较强依赖性, 但陷入了窗宽调节系数无法自适应选择的问题。为能自适应分析此类具有非平稳特征的信号, 有学者提出利用经验模态分解 EMD(Empirical Mode Decomposition)及其多种改进算法对信号进行分解并构造相关判据, 取得了较好的成效<sup>[12-13]</sup>。

借鉴 EMD 思想, 近年来有学者提出一种新的适用于非平稳信号分析的极点对称模态分解 ESMD(Extreme-point Symmetric Mode Decomposition)方

法<sup>[14]</sup>。该方法主要由两大部分构成: 第一部分是模态分解, 可得到多个模态函数和一条最佳自适应全局均线; 第二部分是时频分析, 涉及瞬时频率的定义与瞬时能量的分析等问题。尽管该方法提出时间短, 但已在大气和海洋科学、地震学、信息科学等领域得到了广泛应用。因其善于分析非平稳信号, 故本文尝试将该方法应用到配电网故障定位领域。

本文首先基于实际配电网元件参数搭建典型缆-线混联 PSCAD 仿真模型, 然后利用 ESMD 方法对安装于配电网各测点传感器所采集的暂态零序电流信号进行逐层分解, 进而构造描述单相接地故障暂态过渡过程的能量函数并形成故障区段定位判据。大量仿真分析表明, 本文所提故障区段定位方案定位可靠性高、对噪声免疫能力强、容错性好, 可识别较广故障工况范围的单相接地故障。

## 1 ESMD 方法

### 1.1 ESMD 方法的优点

(1) ESMD 具有极强的自适应性, 非常适用于对非平稳故障信号进行分析。

配电网接地故障过渡过程极易受到故障角、过渡电阻、线路参数、故障位置等诸多因素影响, 不同工况下的故障过程往往存在较大差异。尽管基于傅里叶理论的各种时频分析手段具有较完备的数学基础, 却往往存在相关参数的选择难以自适应故障工况复杂多变的情况, 容易导致特定参数只适用于特定故障工况范围内的故障定位问题, 这是配电网故障定位问题长期未获得彻底解决的一个重要原因。而基于自适应分解规则的 ESMD 方法则可以较好地避开这类问题, 使得本方法的使用不受故障工况影响。

(2) 相比于希尔伯特-黄变换等方法而言, 最新的 ESMD 方法在以下方面具备明显优势<sup>[14-16]</sup>。

收稿日期: 2018-03-14; 修回日期: 2019-03-08

基金项目: 国网江苏省电力公司科技项目(J2017143-2)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Jiangsu Electric Power Company(J2017143-2)

a. EMD 产生的模态一般情况下都会有较快的振幅变化,很难满足 Bedrosian 定理的要求,不利于后期频谱分析。

b. 不强求分解到最多只剩 1 个极值点,容许余量拥有若干极值点并通过优化手段使其成为“最小二乘”意义下的最佳自适应全局均线。

c. 抛弃频谱分析依赖于积分变换的传统观念,提出了针对数据的“直接插值法”。由此不但可以直观体现各模态振幅与频率的时变性,还可以明确地获知总能量变化。

d. 较好地解决了 EMD 方法在信号分解中存在的筛选判据与端点效应等问题。

## 1.2 ESMD 过程

根据设定的采样频率  $f_s$  和采样点数  $N$ ,对各测点采样信号  $I = \{i_1, i_2, \dots, i_N\}$  进行 ESMD 的具体步骤如下。

(1) 找出数据  $I$  的所有极值点并依次将它们标记为  $P_1, P_2, \dots, P_n$ 。

(2) 用线段连接各相邻极点,依次标记各线段中点为  $F_1, F_2, \dots, F_{n-1}$ 。

(3) 通过线性插值法补充  $F_0, F_n$  分别作为  $F_i$  的左、右边界中点。

(4) 利用 3 次样条插值分别对奇数序列的  $F_i$  和偶数序列的  $F_i$  构造 2 条插值线  $L_1$  和  $L_2$ ,并求其均值曲线:

$$L^* = (L_1 + L_2) / 2 \quad (1)$$

(5) 对  $I - L^*$  重复上述步骤直到  $|L^*| \leq \varepsilon$  ( $\varepsilon$  为预先设定的容许误差,一般选取  $\varepsilon = 0.001\sigma_0, \sigma_0$  为  $I$  的标准差)或者筛选次数达到最大值  $K$  (本文选定  $K = 50$ )。此时分解得到第 1 个模态  $M_1$ 。

(6) 对  $I - M_1$  重复上述步骤依次获得  $M_2, M_3, \dots$ ,直到余量  $R$  只剩一定数量的极点。

(7) 令最大筛选次数  $K$  于整数区间  $[K_{\min}, K_{\max}]$  内变换并重复上述步骤得到一系列的分解结果,进而计算方差比率  $\sigma/\sigma_0$  并绘制其随  $K$  的变化图,其中  $\sigma$  为  $I - R$  的相对标准差:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (i_i - R_i)^2 \quad (2)$$

(8) 在区间  $[K_{\min}, K_{\max}]$  内选出对应最小方差比率  $\sigma/\sigma_0$  的最大筛选次数  $K_0$ ,据此重复步骤(1)~(7)输出分解结果。

## 2 配电网单相接地故障区段定位方法

### 2.1 故障定位原理

众所周知,就中性点不接地系统而言,由故障点流向母线的零序电流大小等于全网非故障元件对地电容电流之和(不包含故障线路本身)。这就意味

着:故障点上游的零序电流在幅值上要远大于全网非故障元件各处的零序电流幅值。然而对于中性点经消弧线圈接地的配电网而言,消弧线圈对故障电流进行了很大程度的补偿,使得单相接地时全网电流分布发生很大变化,给配电网选线保护带来了困难。但因消弧线圈补偿的对象是工频电容电流,对暂态高频电流并无有效补偿作用,故利用故障后较短时间内的暂态零序电流进行选线定位具备较高可行性。本文利用故障后各测点零序电流在幅值上的差异,通过 ESMD 方法分解并构造相应暂态能量函数形成故障定位判据。

### 2.2 故障数据的采集与处理

理论分析表明,故障暂态电容电流自振频率一般为  $300 \sim 3\,000 \text{ Hz}$  [17]。工程中考考虑到要避免产生混频现象,一般要求  $f_s \geq g f_{\max}$  ( $g \in [3, 4]$ ),故本文设定采样频率为  $10 \text{ kHz}$ ,对故障后  $1/2$  工频周期内的暂态零序电流信号进行如下处理。

a. 首先将各测点所采集到的零序电流进行 ESMD,得到  $n$  个本征模态函数和余量  $R$ :

$$I_k = \sum_{j=1}^n a_j + R \quad k=1, 2, \dots, m \quad (3)$$

其中,  $k$  为测点标号;  $m$  为测点数量。

b. 设第  $j$  个本征模态函数对应的解析表达式为:

$$a_j = A_j(t) \cos \theta_j(t) \quad (4)$$

定义时刻  $t$  的原始信号所具有的瞬时能量值为:

$$E_k(t) = \frac{1}{2} \left( \sum_{j=1}^n A_j^2(t) + R^2(t) \right) \quad (5)$$

本文定义的“瞬时能量”是广义的,可将其理解为暂态零序故障电流在时刻  $t$  的总体振荡强度。

进一步定义单相接地暂态过程的能量函数为:

$$F_k = \frac{1}{2} \int_0^{T/2} \left( \sum_{j=1}^n A_j^2(t) + R^2(t) \right) dt \quad (6)$$

其中,  $T$  为工频周期。

### 2.3 故障区段定位判据构建

对各测点计算所得的:

$$F = \{F_1, F_2, \dots, F_m\} \quad (7)$$

令:

$$F_{\max} = \max \{F_1, F_2, \dots, F_m\} \quad (8)$$

进一步引入故障区段上下游判断函数:

$$G_k = \begin{cases} 1 & 0.7 < F_k / F_{\max} \leq 1 \\ 0 & 0 \leq F_k / F_{\max} < 0.4 \\ -1 & 0.4 \leq F_k / F_{\max} \leq 0.7 \end{cases} \quad k=1, 2, \dots, m \quad (9)$$

式(9)参数的选定受配电网元件参数、线路结构和故障工况等因素影响,为工程经验值,其选取原

则是使算法适用的故障工况范围尽可能大。基于大量试验结果,本文选取 0.7 为判定故障点上游的下限值,选取 0.4 为判定故障点下游的上限值,即:  $G_k = 1$  时,判定该测点位于故障点上游;  $G_k = 0$  时,判定该测点位于故障点下游或其他正常线路;  $G_k = -1$  时,认为该测点无法给出准确判定结果。最终结合各测点的  $G$  值及网络拓扑结构即可确定故障所在区段。

### 3 方法验证

#### 3.1 基于实际配电网参数的缆-线混联 PSCAD 仿真模型

尽可能真实地模拟实际配电网运行情况,仿真再现故障过渡过程,是小电流系统选线定位技术的重要组成部分。目前国内普遍采用 TFWG (Test Feeder Working Group) 在 1991 年提出的 5 组样本模型及后期拓展的若干组模型作为研究、测试配电网运行过程的标准模型,文献[18]明确指出当初提出的这些标准模型都有其特定的测试用途,特定用途模型未必适合作为所有研究方向的测试平台。随着国内配电网技术的发展,尤其是部分大城市电缆化率的提高,国内配电网在结构、元件参数上与这些标准模型存在一定差异,因而搭建符合我国配电网特色的研究模型是一项亟需解决的课题<sup>[18]</sup>。本文基于我国某实际中压配电网详细线路参数,在 PSCAD 仿真平台上搭建了适用于研究配电网接地故障的研究模型。该模型针对 10 kV 配电线路进行了详细建模工作,现详述如下。

(1) 该配电站中性点经消弧线圈接地,共包括 13 条出线,线路总长为 76 km,其中电缆线路总长达 48.9 km,为典型缆-线混联结构,架空线部分还包含了同杆双回结构。

(2) 为进行故障区段定位算法测试,本文设定在该变电站 154 线、153 线、162 线、144 线 4 条出线装设 13 个测点。在工程中,这些测点可通过暂态录波型故障指示器予以实现,其具体配置方案则需通过综合考虑经济指标、定位可靠性指标等因素确定。考虑篇幅限制,附录中的图 A1 详细展示了该变电站 154 线、153 线的 PSCAD 仿真模型,各段架空线长度和埋地电缆长度、测点安装位置及故障发生位置等均已在此仿真模型中注明。

(3) 模型充分考虑了线路导体属性和几何参数,采用依频特性线路模型建模,最大限度地复现接地故障暂态过程。其中,架空主线型号为 JKLYJ-240;架空支线型号为 JKLYJ-150;电缆型号主要有 YJV22-3×400、YJV22-3×300、YJV22-3×150。

(4) 为便于说明问题,对图 A1 所示的仿真模型按比例予以简化处理。图 1 为对 154 线、153 线、162 线、144 线 4 条出线经过简化处理后的网络拓扑结

构,该图清晰地给出了各量测点安装位置及故障发生位置。

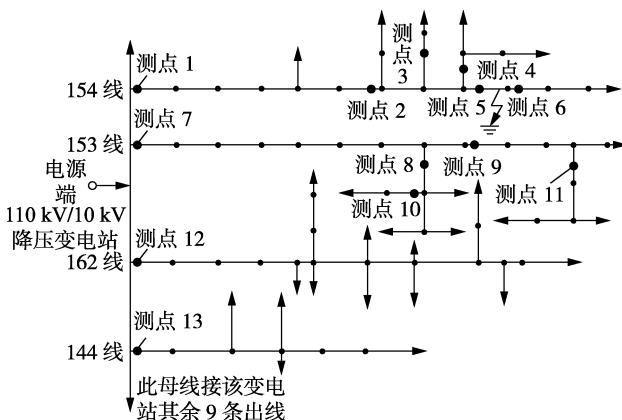


Fig.1 Simplified topology diagram of actual distribution network

#### 3.2 实际缆-线混联配电网单相接地故障仿真测试

文献[17]叙及:理论分析和试验结果表明,暂态电容电流的幅值较大,且衰减很快,一般持续半个至 1 个工频周期。为了进一步验证本文模型仿真结果与当前理论分析和试验结果相吻合,现给出本文所搭建实际配电网模型在过渡电阻为  $5 \Omega$ 、故障角为  $90^\circ$  的故障工况下的仿真测试数据,具体如图 2 所示。

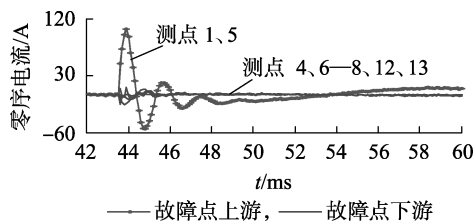


图 2 各测点零序电流仿真图

Fig.2 Simulative diagram of zero-sequence current of each measuring point

由图 2 可看出:故障暂态过渡过程大约持续半个工频周期,暂态过渡期间故障点上游各测点零序电流波动幅度远大于其他测点,故障特征明显;测点 1、5 均属于故障点上游区域,因两者距离仅为 2.4 km,故这 2 个测点的零序电流波形几乎重合。

以上分析表明,本文所搭建模型的仿真结果能够较好地与理论及工程实践吻合,这进一步验证了本文所搭建模型的合理性。

#### 3.3 典型仿真数据处理示例

为更直观地体现本文故障区段定位方案的实现过程,详细给出过渡电阻为  $5 \Omega$ 、故障角为  $90^\circ$  的故障工况下完整的数据处理过程如下。

(1) 首先对图 1 中 1—13 号测点仿真所得零序电流数据分别进行 ESMD,图 3 以故障点下游测点 6 为例给出其各模态分解结果。由图 3 可见,原始信号经过 ESMD 后,得到 3 个模态函数和余量  $R$ 。

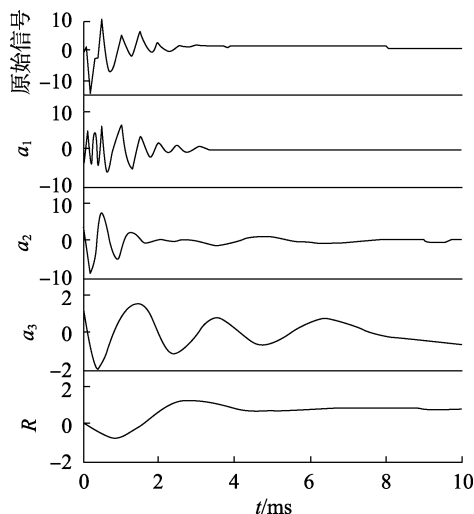


图3 测点6各模式分解结果

Fig.3 Mode decomposition results of measuring point No.6

(2) 为了方便说明问题,图4以图1中测点1、2、4—7、12、13为例,给出其根据式(5)计算所得的瞬时能量时域图。

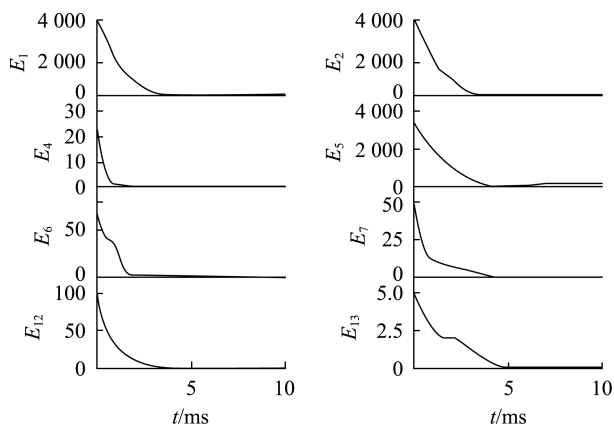


图4 各测点瞬时能量时变图

Fig.4 Instantaneous energy time diagram of each measuring point

由图4可见,故障点上游的测点1、2、5瞬时能量值远大于故障点下游及其他正常线路各测点的瞬时能量值。

(3) 为统一量化处理数据,便于计算机给出定位结果,根据式(6)计算得到各测点暂态能量函数值为:

$$F = \{5.724, 5.803, 0, 0.013, 5.959, 0.068, 0.046, 0.001, 0.028, 0, 0.008, 0.103, 0.009\}$$

根据式(9)规格化处理  $F$  得:

$$G = \{1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0\}$$

最后根据该配电网拓扑结构,结合各测点计算  $G$  值,可以判定故障发生在测点5与测点6之间,具体定位结果如图5所示。

通过上述分析可见:本文设计的判据可准确区分故障点上游测点与其他测点,且根据测点安装位

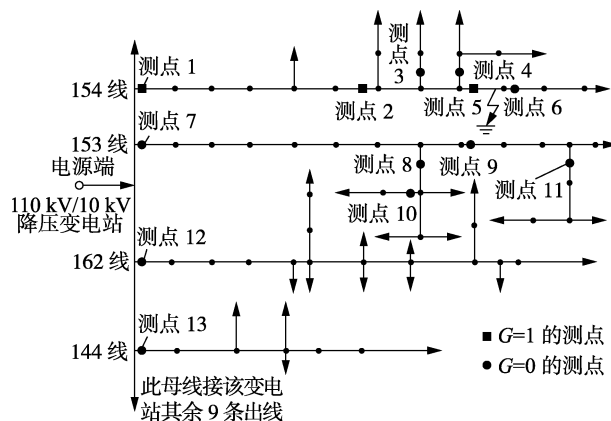


图5 故障定位结果

Fig.5 Results of fault location

置,可将故障范围有效限制在某个区段内。

### 3.4 简单条件下故障区段定位测试

本节将对安装于该配电网的全部13个测点在考虑噪声干扰的简单条件下进行算法有效性测试,以验证本文区段定位方案的可行性。附录中的表A1给出了各测点暂态能量仿真计算值,附录中的表A2给出了对应于表A1的不同故障工况下单相接地区段定位结果。

由表A2可以清晰看出,本文算法可以准确地给出过渡电阻在  $800\ \Omega$  以内的任何故障角下的单相接地故障所在区段。对于大于  $800\ \Omega$  的过渡电阻,如  $10\ 000\ \Omega$  的过渡电阻条件下,仿真结果显示此时故障点上游零序电流峰值在  $0.3\ \text{A}$  附近,故障点下游零序电流峰值在  $0.05\ \text{A}$  附近,本文算法仍然可以给出准确定位结果,但其已不具备工程价值,因为受到噪声、量测精度等因素影响,电流传感器难以准确捕捉到如此微弱的信号。本文算法能够探测何种过渡电阻、故障角下的接地故障将在3.5节详细阐述。

### 3.5 复杂条件下故障区段定位测试

配电网故障定位技术的核心难点在于高过渡电阻、小故障角并且考虑噪声干扰条件下的准确定位问题,因为此时故障信号一般非常微弱,这就要求定位算法本身首先具有较高的鲁棒性。目前国内对高阻尚无明确定义,但一般以检测到  $1\ 000\ \Omega$  过渡电阻条件下的故障位置为基本要求。国家电网公司在2017年3月发布的《配电网技术导则》中也明确要求“采用适用的单相接地选线技术,满足在故障点电阻为  $1\ 000\ \Omega$  以下时可靠选线的要求”,故本文将  $1\ 000\ \Omega$  过渡电阻值作为一个重要比较界限。此外,配电网并不是一个非常“干净”的网络,存在一定水平的噪声干扰,而且目前实际施工的电流传感器因技术及成本限制,其量测精度也有一定的限制。综合以上各方面因素,本文设定均值为  $2\ \text{A}$  的高斯白噪声模拟噪声干扰。

为全面测试本文算法可靠性,给出均值为 2 A 的高斯白噪声干扰下,不同故障发生区段、过渡电阻、故障角下的算法测试结果,如附录中的表 A3、A4 所示。

由表 A4 可见,在考虑均值为 2 A 的高斯白噪声干扰前提下,本文所提算法依然能有效定位 800  $\Omega$  以内过渡电阻在所有故障角下的故障位置,并且不受故障所在区段影响;而当故障过渡电阻值介于 800~2 000  $\Omega$  时,本文算法也能给出相对可靠的定位结果。

下面重点分析区段 5-6 在过渡电阻为 2 000  $\Omega$ 、故障角为 0° 时发生故障的工况。首先给出此时测点 1、4—8、12、13 的零序电流时域仿真结果,如图 6 所示,可见此时各测点故障特征信息已不再像图 2 那样显著,难以直观区分某个测点类别。

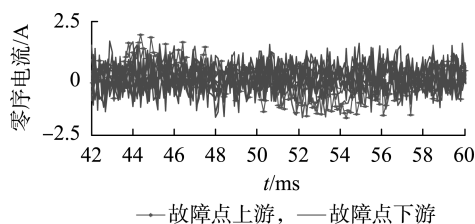


图 6 时域仿真结果 ( $R_f = 2\,000\ \Omega$ ,  $\alpha_f = 0^\circ$ )

Fig. 6 Results of time-domain simulation ( $R_f = 2\,000\ \Omega$ ,  $\alpha_f = 0^\circ$ )

根据表 A4 所示的计算分析结果,结合该配网拓扑图,可得该故障工况下的定位结果,具体如图 7 所示。根据该工况下各测点参数计算结果,尽管此时对于测点 3、7、10、13 无法给出准确的判断结果,但由于此时仍然可以判定测点 1、2、5 位于故障点上游以及测点 4、6 位于故障点下游,结合网络拓扑结构仍然可以准确地将故障定位在测点 5、6 之间。

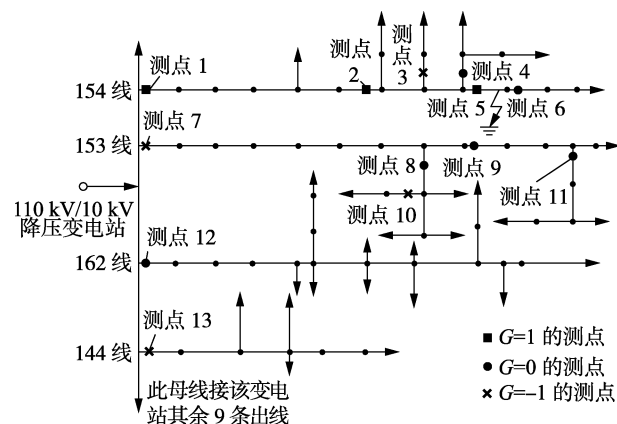


图 7 故障定位结果

Fig. 7 Results of fault location

进一步地,当过渡电阻值增大到 3 000  $\Omega$  时,根据表 2 计算分析结果,此时将无法准确给出故障区段所在位置,算法失效。

以上分析一方面说明了随着过渡电阻的增大、

故障角的减小,故障定位精确度受噪声干扰越加显著,算法定位准确性越来越低;另一方面也证明了本文定位算法对噪声干扰具有较强的免疫能力,算法本身具有较强容错能力,个别测点无法给出准确结果对最终判定结果影响有限。本文所提算法能够有效对 2 000  $\Omega$  以内的过渡电阻下的故障进行准确定位。

## 4 结论

本文通过 ESMD 对各测点的故障暂态零序电流进行模态分解,对分解得到的各模态函数及余量函数重构表征零序电流振荡强度的暂态能量函数,据此进一步构造故障区段上下游判断函数形成故障定位判据,结合各测点传感器安装位置及网络拓扑结构即可迅速找到故障发生区段,指导配电网运行管理。

(1) 本文算法本质上是构造一种描述故障后暂态零序电流波形振荡强弱的能量指标参量,这种方案不受中性点接地方式影响,对故障过渡电阻、故障角等具有较广的覆盖面,对噪声具有较强的免疫能力,算法具有较强容错性。

(2) 与现有的从能量角度构造故障定位判据方案相比<sup>[19]</sup>,本文判据的构造只涉及零序电流参量的同步合成,而不需要进一步同步合成零序电流、电压参量。这从原理上消除了因电压、电流量测信号传输不同步而导致的误差扩大现象。此外,本文方案仅要求各测点上传 1 个暂态能量函数计算值,对通信要求较低,可有效降低硬件成本,具有较强的工程应用前景。

(3) 配电网故障定位技术的难点在于高阻故障定位,其本质上是一个在噪声环境下提取有效故障信息的问题,这一方面需要硬件检测技术的进步,另一方面需要设计更为合理的定位判据,在此基础上再探索多信息、多判据融合的故障定位方案,以进一步提高算法适用的故障工况范围,逐步解决高阻故障定位难题。

附录见本刊网络版 (<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 王铭,徐玉琴. 基于小波变换和 BP 网络的非故障相暂态电流故障定位[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(4): 25-27.  
WANG Ming, XU Yuqin. Locating fault using transient component of non-fault-phase based on wavelet analysis and BP neural network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(4): 25-27.
- [2] 薛永端,李娟,徐丙垠. 中性点经消弧线圈接地系统小电流接地故障暂态等值电路及暂态分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5703-5714.  
XUE Yongduan, LI Juan, XU Bingyin. Transient equivalent circuit and transient analysis of single-phase earth fault in arc suppression

- coil grounded system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5703-5714.
- [3] 高孟友, 徐丙垠, 张新慧. 基于故障电流幅值比较的有源配电网故障定位方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(7): 21-25.  
GAO Mengyou, XU Bingyin, ZHANG Xinhui. Fault location based on fault current amplitude comparison for active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(7): 21-25.
- [4] 车延博, 郁舒雁, 葛磊蛟. 基于 RS-IA 数据挖掘的配电网故障定位模型[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(5): 122-128.  
CHE Yanbo, YU Shuyan, GE Leijiao. Fault locating model based on RS-IA data mining for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5): 122-128.
- [5] 郭壮志, 陈涛, 洪俊杰, 等. 基于故障辅助因子的配电网高容错性故障区段定位方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(7): 93-100.  
GUO Zhuangzhi, CHEN Tao, HONG Junjie, et al. High-tolerance faulty section locating based on fault accessory factors for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7): 93-100.
- [6] 朱洪俊. 非平稳信号瞬时特征提取的谐波小波方法[J]. 机械工程学报, 2008, 44(5): 191-195.  
ZHU Hongjun. Extraction of instantaneous characteristics of nonstationary signal using harmonic wavelet transforms[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(5): 191-195.
- [7] 张万宏. 非平稳时间序列的预测方法研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2007.  
ZHANG Wanhong. Study of method on non-stationary time series prediction[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2007.
- [8] 薛永端, 李天友, 李伟新, 等. 小电流接地故障暂态分析及区段定位新方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(23): 101-107.  
XUE Yongduan, LI Tianyou, LI Weixin, et al. A novel method of transient analysis and faulty section location for single-phase earth fault in non-effectively earthed network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(23): 101-107.
- [9] 倪广魁, 鲍海, 张利, 等. 基于零序电流突变量的配电网单相故障带电定位判据[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(31): 118-122.  
NI Guangkui, BAO Hai, ZHANG Li, et al. Criterion based on the fault component of zero sequence current for online fault location of single-phase fault in distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(31): 118-122.
- [10] 薛永端, 徐丙垠, 李天友, 等. 配网自动化系统小电流接地故障暂态定位技术[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(12): 27-32.  
XUE Yongduan, XU Bingyin, LI Tianyou, et al. Small-current grounding fault location based on transient signals of distribution automation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(12): 27-32.
- [11] 何连杰, 史常凯, 闫卓, 等. 基于广义 S 变换能量相对熵的小电流接地系统故障区段定位方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(8): 274-280.  
HE Lianjie, SHI Changkai, YAN Zhuo, et al. A fault section location method for small current neutral grounding system based on energy relative entropy of generalized S-transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(8): 274-280.
- [12] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society A, 1998, 454(1971): 903-995.
- [13] 张淑清, 翟欣沛, 董璇, 等. EMD 及 Duffing 振子在小电流系统故障选线方法中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 161-167[J].  
ZHANG Shuqing, ZHAI Xinpei, DONG Xuan, et al. Application of EMD and Duffing oscillator to fault line detection in uneffectively grounded system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 161-167.
- [14] 王金良. 极点对称模态分解方法: 数据分析与科学探索的新途径[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015: 15-16.
- [15] 房贤水. 基于 ESMD 方法的模态统计特征研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2015.  
FANG Xianshui. Study on statistical characteristics for the modes decomposed by ESMD method[D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2015.
- [16] WANG Jinliang, LI Zongjun. Extreme-point symmetric mode decomposition method for data analysis[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2013, 30(6): 165-168.
- [17] 贾清泉. 非有效接地电网选线保护技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 21-23.
- [18] SCHNEIDER K P, MATHER B A, PAL B C, et al. Analytic considerations and design basis for the IEEE distribution test feeders[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 33(3): 3181-3188.
- [19] 薛永端, 徐丙垠, 李天友, 等. 配网自动化系统小电流接地故障暂态定位技术[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(12): 27-32.  
XUE Yongduan, XU Bingyin, LI Tianyou, et al. Small-current grounding fault location based on transient signals of distribution automation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(12): 27-32.

#### 作者简介:



殷志华

殷志华(1990—), 男, 江苏常州人, 硕士研究生, 主要研究方向为配电网故障定位技术(E-mail: zhyincumt@126.com);

孙国强(1978—), 男, 江苏江阴人, 副教授, 博士, 主要研究方向为电力系统运行分析、新能源发电等(E-mail: hhusunguoqiang@163.com);

丁建忠(1969—), 男, 江苏镇江人, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统自动化(E-mail: djz6198@163.com);

吕峰(1974—), 男, 江苏无锡人, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统自动化(E-mail: wxgd\_lf@sohu.com);

袁海星(1979—), 男, 江苏无锡人, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统自动化(E-mail: 13585056273@163.com);

卫志农(1962—), 男, 江苏江阴人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为电力系统运行分析与控制、输配电系统自动化等(E-mail: wzn\_nj@263.net)。

(下转第 191 页 continued on page 191)

## Seamless connection and power optimization of shore power in ship-shore integrated system

CAO Liang<sup>1</sup>, FANG Xinyan<sup>1</sup>, LUO Wenbin<sup>2</sup>

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai International Port( Group) Co., Ltd., Shanghai 200080, China)

**Abstract:** Aiming at the difference between electric power system of shore and ship sides and the demand of seamless switching of ship load in the process of shore electricity accessing in the ship-shore integrated system, a suppression strategy of grid-connected power fluctuation in shore-to-ship power system is proposed based on the multi-period division of the grid-connected process. The target control strategies are respectively proposed for the period before closing, the moment of closing, the period after closing and the moment that diesel generators quit operation. Combining with the cooperative management conditions of IEMS( Integrated Energy Management System), the power fluctuation in the process of grid connection and load transfer is suppressed, and the distribution and electrical equipment on shore and ship sides are protected. The simulative results show that the proposed strategy can realize the tracking control of the electric power system on shore and ship sides and the smooth switching between multi-period control modes of the variable frequency power supply under the premise of ensuring uninterrupted power supply, and achieve the goal of smoothing the grid-connected power fluctuation.

**Key words:** ship-shore power; power fluctuation; multi-period division; IEMS

(上接第178页 continued from page 178)

## Fault section location method for single-phase grounding fault in distribution network based on ESMD

YIN Zhihua<sup>1</sup>, SUN Guoqiang<sup>1</sup>, DING Jianzhong<sup>2</sup>, LÜ Feng<sup>2</sup>, YUAN Haixing<sup>2</sup>, WEI Zhinong<sup>1</sup>

(1. Research Center for Renewable Energy Generation Engineering, Ministry of Education, Hohai University,

Nanjing 210098, China; 2. State Grid Wuxi Power Supply Company, Wuxi 214061, China)

**Abstract:** Single-phase grounding fault in distribution network generates abundant electrical transient quantities in the system. Based on the characteristic that the magnitude of transient zero-sequence current at upstream of the fault point is much larger than that at the downstream of the fault point and normal line, the fault section location method based on ESMD( Extreme-point Symmetric Mode Decomposition) is proposed for distribution network. Based on line parameters of actual distribution network, a typical cable-line hybrid simulation model is established, with which, the transient zero-sequence current is decomposed by ESMD and the transient energy function is constructed. The transient energy function is used as an index to evaluate the magnitude of the transient zero-sequence current of each measurement point for fault section location. The simulative results show that the proposed method can extract fault features effectively, and has strong adaptability to various fault conditions, and each measurement point only needs to upload one transient energy value, which can effectively reduce communication requirements and save hardware investment costs.

**Key words:** distribution network; single-phase grounding fault; ESMD; fault section location

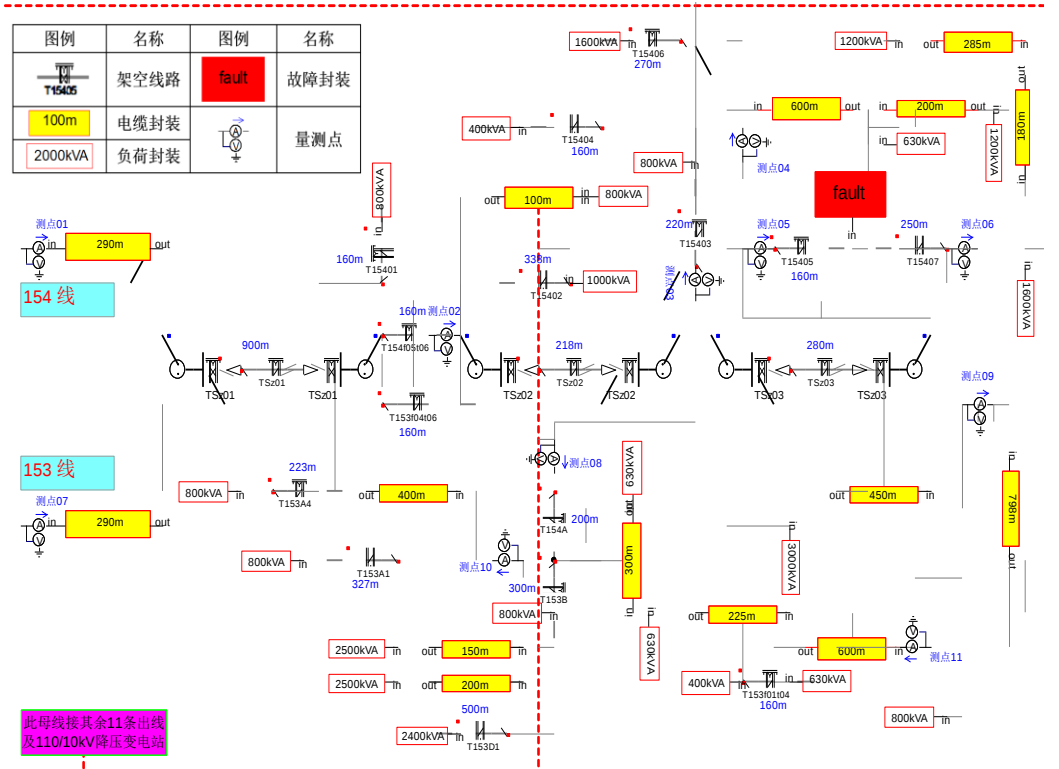


图 A1 基于实际配电网参数的缆-线混连 PSCAD 仿真模型  
Fig.A1 Cable line mixed PSCAD simulation model based on parameters of actual distribution network



表 A3 复杂条件下各测点暂态能量仿真计算值

TableA3 Simulative values of transient energy of each measuring point under complex conditions

| 过渡电<br>阻/ $\Omega$ | 故障所<br>在区段  | 故障角/<br>( $^{\circ}$ ) | 暂态能量函数值      |              |        |              |              |              |              |              |              |        |              |              |        |
|--------------------|-------------|------------------------|--------------|--------------|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------|--------------|--------------|--------|
|                    |             |                        | 测点 1         | 测点 1         | 测点 1   | 测点 1         | 测点 1         | 测点 1         | 测点 1         | 测点 1         | 测点 1         | 测点 1   | 测点 1         | 测点 1         | 测点 1   |
| 5                  | 5-6         | 90                     | <b>5.068</b> | <b>5.481</b> | 0.005  | 0.016        | <b>5.780</b> | 0.058        | 0.049        | 0.007        | 0.030        | 0.012  | 0.012        | 0.160        | 0.012  |
| 60                 | 7-9         | 90                     | 0.024        | 0.033        | 0.004  | 0.008        | 0.014        | 0.018        | <b>0.728</b> | 0.008        | 0.017        | 0.008  | 0.007        | 0.022        | 0.005  |
| 500                | 测点 11<br>下游 | 90                     | 0.005        | 0.005        | 0.003  | 0.004        | 0.009        | 0.003        | <b>0.051</b> | 0.003        | <b>0.053</b> | 0.004  | <b>0.055</b> | 0.005        | 0.005  |
|                    | 8-10        | 0                      | 0.005        | 0.005        | 0.005  | 0.006        | 0.005        | 0.005        | <b>0.032</b> | <b>0.036</b> | 0.005        | 0.004  | 0.005        | 0.005        | 0.005  |
|                    | 5-6         | 0                      | <b>0.028</b> | <b>0.031</b> | 0.006  | 0.004        | <b>0.033</b> | 0.004        | 0.005        | 0.003        | 0.006        | 0.004  | 0.004        | 0.004        | 0.004  |
| 800                | 2-5         | 90                     | <b>0.021</b> | <b>0.024</b> | 0.003  | 0.003        | 0.003        | 0.003        | 0.003        | 0.003        | 0.003        | 0.003  | 0.003        | 0.004        | 0.005  |
|                    | 2-5         | 0                      | <b>0.017</b> | <b>0.018</b> | 0.006  | 0.006        | 0.007        | 0.006        | 0.007        | 0.006        | 0.007        | 0.006  | 0.007        | 0.006        | 0.006  |
|                    | 5-6         | 0                      | <b>0.014</b> | <b>0.015</b> | 0.003  | 0.002        | <b>0.014</b> | <b>0.007</b> | 0.002        | 0.003        | <b>0.007</b> | 0.002  | 0.002        | 0.004        | 0.003  |
| 1000               | 5-6         | 90                     | <b>0.014</b> | <b>0.014</b> | 0.005  | 0.003        | <b>0.018</b> | 0.005        | 0.004        | 0.004        | <b>0.009</b> | 0.006  | 0.007        | 0.004        | 0.005  |
|                    | 5-6         | 0                      | <b>0.014</b> | <b>0.012</b> | 0.003  | <b>0.008</b> | <b>0.012</b> | 0.004        | 0.003        | 0.004        | 0.005        | 0.004  | 0.004        | <b>0.009</b> | 0.005  |
| 2000               | 5-6         | 0                      | <b>0.007</b> | <b>0.009</b> | 0.004  | 0.003        | <b>0.009</b> | 0.002        | 0.004        | 0.003        | 0.002        | 0.006  | 0.002        | 0.002        | 0.005  |
| 3000               | 6-6         | 0                      | 0.0046       | 0.0039       | 0.0020 | 0.0021       | 0.0036       | 0.0047       | 0.0021       | 0.0034       | 0.0043       | 0.0053 | 0.0046       | 0.0025       | 0.0029 |

表 A4 复杂条件下不同故障工况下单相接地区段定位结果

TableA4 Area locating results of single-phase grounding fault under different fault conditions , under complex conditions

| 过渡电阻<br>$/\Omega$ | 故障所在<br>区段  | 故障角/<br>( $^{\circ}$ ) | 逻辑判断函数值  |          |           |           |           |           |           |           |           |           |          |           |           | 定位结<br>果   |
|-------------------|-------------|------------------------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|------------|
|                   |             |                        | 测点 1     | 测点 1     | 测点 1      | 测点 1      | 测点 1      | 测点 1      | 测点 1      | 测点 1      | 测点 1      | 测点 1      | 测点 1     | 测点 1      | 测点 1      |            |
|                   |             |                        | 1        | 1        | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1        | 1         | 1         |            |
| 5                 | 5-6         | 90                     | <b>1</b> | <b>1</b> | 0         | 0         | <b>1</b>  | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0        | 0         | 0         | 准确         |
| 60                | 7-9         | 90                     | 0        | 0        | 0         | 0         | 0         | 0         | <b>1</b>  | 0         | 0         | 0         | 0        | 0         | 0         | 准确         |
| 500               | 测点 11<br>下游 | 90                     | 0        | 0        | 0         | 0         | 0         | 0         | <b>1</b>  | 0         | <b>1</b>  | 0         | <b>1</b> | 0         | 0         | 准确         |
|                   | 8-10        | 0                      | 0        | 0        | 0         | 0         | 0         | 0         | <b>1</b>  | <b>1</b>  | 0         | 0         | 0        | 0         | 0         | 准确         |
|                   | 5-6         | 0                      | <b>1</b> | <b>1</b> | 0         | 0         | <b>1</b>  | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0        | 0         | 0         | 准确         |
| 800               | 2-5         | 90                     | <b>1</b> | <b>1</b> | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0        | 0         | 0         | 准确         |
|                   | 2-5         | 0                      | <b>1</b> | <b>1</b> | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0        | 0         | 0         | 准确         |
|                   | 5-6         | 0                      | <b>1</b> | <b>1</b> | 0         | 0         | <b>1</b>  | <b>-1</b> | 0         | 0         | <b>-1</b> | 0         | 0        | 0         | 0         | 测点 5<br>下游 |
| 1000              | 5-6         | 90                     | <b>1</b> | <b>1</b> | 0         | 0         | <b>1</b>  | 0         | 0         | 0         | <b>-1</b> | 0         | 0        | 0         | 0         | 准确         |
|                   | 5-6         | 0                      | <b>1</b> | <b>1</b> | 0         | <b>-1</b> | <b>1</b>  | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0        | <b>-1</b> | 0         | 准确         |
| 2000              | 5-6         | 0                      | <b>1</b> | <b>1</b> | <b>-1</b> | 0         | <b>1</b>  | 0         | <b>-1</b> | 0         | 0         | <b>-1</b> | 0        | 0         | <b>-1</b> | 准确         |
| 3000              | 5-6         | 0                      | 1        | 1        | 0         | 0         | <b>-1</b> | 1         | 0         | <b>-1</b> | 1         | 1         | 1        | <b>-1</b> | <b>-1</b> | 错误         |