

基于同步相量测量技术的输电线路故障测距综述

王波¹, 王伟², 陈超¹

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江省电力公司, 浙江 杭州 310007)

摘要: 随着广域测量系统 WAMS(Wide Area Measurement System)的发展, 同步相量测量技术为输电线路的双端故障测距提供了新的平台。在简介 WAMS 系统基本原理的基础上, 首先介绍了基于双端同步数据的线路参数在线估算; 其次总结了现有基于双端同步数据的各种故障测距算法, 按采用的数据量对各种方法进行了分类比较, 并对其特点及应用效果作了一定的评价; 最后介绍了目前测距算法在实际电网结构中的应用情况。

关键词: 广域测量系统; 故障测距; 工频信号; 同步数据

A survey of fault location on transmission line based on synchronized phasor measurement technique

WANG Bo¹, WANG Wei², CHEN Chao¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 310007, China)

Abstract: With the development of wide area measurement system, the synchronized phasor measurement technology provides a new platform for the two-terminal fault location on transmission line. After introducing the basic principle of WAMS, this paper introduces the parameters on-line estimation based on the synchronous data. Then it concludes the various algorithms based on the two-terminal synchronous data, classifies and analyses the different methods by the amount of data, and evaluates their characteristics and application effect. At last, the algorithms applied in the power system are introduced.

Key words: wide area measurement; fault location; power frequency signal; synchronous data

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)13-0122-07

0 引言

输电线路担负着传送电能的重要任务, 其故障直接威胁到电力系统的安全运行。准确的故障定位对于加速排除线路故障和尽快恢复供电具有重要的意义。

国内外对于输电线路故障定位方法的研究已进行了数十年, 提出了大量的故障定位原理和方法, 如行波法、阻抗法等, 也有专家应用人工神经网络、小波原理等智能方法进行了研究。其中, 阻抗法^[1]由于受到故障过渡电阻等因素的影响, 其测距误差较大; 行波法^[2,3]存在硬件造价高等问题, 实际应用还有待研究; 而人工智能^[4,5]等模糊理论和方法具备不确定性, 在训练样本选择、硬件等方面也有难度, 尚不能投入实际应用。故障分析法中的单端测距算法^[6,7], 由于信息量不足, 测距精度始终要受系统运行方式和过渡电阻的影响, 结果不甚理想。而双端测距算法由于充分利用了故障信息, 可以取得很高的测距精度, 但是由于需要双端信息传递, 而且大部分双端算法对信息传输的实时性要求较高, 这在

双端算法的早期发展中带来了不少困难。

随着自动化技术的发展、信息传输技术的不断进步; 尤其是近年来, 相量测量装置 (PMU) 的研制和开发, 为双端故障测距提供了新的工具。基于 PMU 的 WAMS 平台的发展使同一时标下精确的双端测量成为可能, 从而可以大大提高故障定位的精度。针对目前基于同步相量测量技术的故障测距算法研究状况, 本文对这些方法进行总结比较, 并对它们的定位效果作相应的评价。

1 WAMS 简介

根据电力系统的发展需求, 近年来人们开始研究相量测量单元 PMU 和 WAMS。

WAMS 是以 PMU 为基层单元采集信息, 经过通信系统上传至调度中心, 实现对系统的监测, 构成一个系统。PMU 利用 GPS 时钟同步的特点, 测量各节点以及线路的各种状态量, 通过 GPS 对时, 将各个状态量统一在同一个时间坐标上。全球定位系统 (GPS) 使算法中必须的高精度同步时钟有了保证, 也使双端同步采样的精确测距方法能得以实现。

PMU由微处理器、GPS接收器、信号变送模块及通信模块组成,其构成如图1所示^[8]。

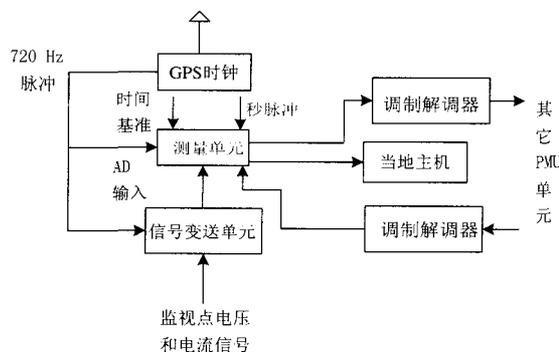


图1 PMU的构成

Fig.1 Structure of PMU

三相电压电流暂态量经由PT、CT输入信号变送单元,进行A/D转换、滤波后的高精度信号进入测量单元,由微处理器计算相对于GPS同步参考时间的相量值,加上同步时间构成数据帧传递给通信模块。

相量测量可以采用过零检测法、快速傅里叶变换法和离散傅里叶变换法等。现已研制并投入使用的PMU一般采用离散傅里叶变换法计算相量。

2 参数在线估算

输电线路的参数(特性阻抗、传播常数、线路长度等)一般是作为已知量参与运算的。这些参数的准确与否直接影响到故障测距的精确性。通常已知的参数是线路建成初期测定的,这些参数在投运后由于气候、环境及地理等因素的影响会或多或少地发生变化。因此,如能实时测定或计算出线路当前运行情况下对应的参数,则具有十分重要的价值。

根据WAMS提供的线路两端的同步电压和电流相量与线路参数的关系即可方便地计算输电线路的各种参数。文献[9]提出一种线路参数实时计算方法,它根据长线方程并利用两端同步电压和电流相量直接求解出线路的特性阻抗和传播常数。文献[10]利用PMU测量线路的电压、电流同步相量,通过计算得到各分序线路的参数;与传统线路参数测量方法相比,具有设备简单、易于操作、不影响正常供电等优点。文献[11]对三端传输线路的参数进行在线估算,将线路看成三条单线;通过配置在各端的PMU连续2次(相角变化超0.1弧度)采集电压、电流相量,根据KVL建立12个方程,从而解出12个线路参数未知数。

3 双端同步测距原理

双端同步测距算法要求线路两端的数据采样

同步进行,得到的电压和电流具有统一的时间参考基准。按采用的数据量,双端故障测距算法可分为三种:一是两侧电压电流法;二是本侧电压电流对侧电流法;三是两侧电压法。

3.1 两侧电压电流法

针对目前基于双端同步电压、电流相量的测距算法,本文总结了几类常见的方法,如故障方程求解法、搜索迭代法、基于时域方法等。

(1) 故障方程求解法

该类方法通过对线路两端采集到电压、电流数据进行滤波变换,将其分解为各次谐波,得到工频分量;再根据分解原理(对称分解、克拉克分解等)建立线路的正序或负序分布参数模型,按照线路故障特征(故障点电压相等、过渡电阻的纯阻特性等)列写故障测距方程,求解其故障位置。该测距算法能适应系统运行方式的变化,不受故障点过渡电阻、故障类型、故障距离等因素的影响,具有很高的测距精度。

由于故障发生后的很短时间内,系统内电压、电流的频谱成分相当复杂,因此对装置的滤波能力要求较高。文献[12,13]最先应用此原理得到故障定位公式,并将SDFT运用到滤波中,结果表明这一滤波方法可改善算法的定位精度,并可增加算法的稳定性,使计算结果的精度受环境条件变化的影响更小。文献[14]通过构建精确求解基频及整次谐波分量的非线性方程以及将其转化为线性方程进行求解,并针对离散化积分引入的误差进行修正,将该滤波算法用于输电线路故障测距方程后,取得了更高的精度。

同时故障定位方程一般是复杂的长线方程,因此方程的精确求解也是该方法的关键。文献[15]根据电压、电流的故障方程推导得故障位置的实数方程解,从而避免对解实虚部的讨论,提高精度。文献[16]引入遗传算法求解故障测距方程,采用群体搜索和多父体重组策略,在一次搜索中算法可求得故障距离的多个解,有利于伪根的判别,且计算速度快、精确度高。文献[17]证明在上述利用长线方程沿线推导故障点电压、电流方程的测距算法中,原理上存在伪根的可能性,在某些情况下,会得到错误的测距结果;并对上述测距算法进行改进,提出了判别伪根的原则,使其更具通用性。

(2) 搜索迭代法

该类方法只需采集得到的线路两端电压、电流工频分量的幅值与相位即可进行,利用故障线路两端母线到故障点电压呈不断下降趋势的特点,运用线路分布参数方程,通过搜索所有线路,找出从两

端电压下降曲线的公共点即为故障点的方案。该算法无需解方程,因此不存在伪根的问题,它不受过渡电阻、故障类型的影响,且能适用于较长的高压输电线路。

故障点搜索指标的建立是决定该方法精度的关键因素。文献[18]由叠加原理和对称分解,把故障网络可分解为正常网络与故障附加正序网、负序网和零序网;根据电压分布特征,对各种故障类型均存在的附加正序网络建立搜索指标,可有效地解决系统阻抗等效问题,通过搜索算法实现精确定位。文献[19]根据故障点的电流正序分量特征,建立关于电压、电流相量的搜索指标,从而减少两端数据不同步带来的误差。

同时算法搜索过程的实现也影响着定位的精度。文献[20]对搜索过程进行优化,基于线路分布参数模型,根据正序故障分量电压沿线分布规律,通过搜索迭代将故障点界定在一段短线路上,从而将分布参数长线测距转化为集中参数短线测距。即使任意选择初始值,通过简单的迭代搜索就可以初步找到故障点的大致位置,计算量也不大,因此具有较高的实用价值。文献[21]提出了针对双回线路的故障测距方案,其采用正序电压的故障分量,将沿线路搜索电压最低点作为故障点,并对搜索的模糊区进行了讨论,给出了一种平均值法减小误差的方案。

(3) 基于时域方法

由于故障初期非周期分量和高次谐波较大,即使进行了滤波也很难准确地提取工频分量,因此上述基于工频信号的方法,会对定位的精度造成很大的影响。时域方法的提出可以解决频域方法的不足;该方法只使用采集装置直接采得的数据,无需滤波和相量提取,省去了时域与频域转换,不受过渡电阻及电网频率波动的影响,精度高于工频法。而分布参数模型是针对传输线路的分布特性建立的,是系统稳态、暂态过程中适用的精确模型。因此基于上述两方面考虑的高精度定位是以后的趋势。

文献[22, 23]使用集中参数模型,根据基尔霍夫定理列写关于系统中电压与电流的微分方程,再进行代换并消去多余的未知数,然后做离散化处理化为差分方程。该方程是以故障点位置为未知数的一次方程,且其已知量是由已知的线路参数和两端采集得到的电压电流瞬间量。而文献[22]通过对时域电压、电流进行频率采样,得到距离解,结果表明采样频率越高,定位越准确。随后对上述方法进行修改,引入分布参数线路模型;文献[23]则通过统计两端电压电流瞬时值,做最小二乘拟合求得该未

知的故障点位置。这种使用多个采集点统计拟合的处理可以修正因噪声信号造成的误差。文献[24]提出了一种双端时域参数识别法,该方法利用均匀传输线的分布参数模型,推导出线路上电压的沿线沿时分布,然后通过找寻在一段时间内两端推算电压最小值点,将该点作为故障点,从而确定故障位置。文献[25]中的仿真结果表明该算法定位效果理想,且对线路长度及分布参数的变化有一定的抗干扰能力。但该方法对两端采集的数据同步要求较高。

3.2 本侧电压电流对侧电流法

由于故障发生时,电流互感器极易达到饱和,将导致采样波形发生畸变,从而不能正确地反映真实故障电流。因此电流互感器饱和是影响输电线路双端测距算法的一个重要因素。解决CT饱和影响故障测距的途径之一是对饱和电流进行补偿矫正,文献[26~28]提出了多种方法,但实际上很难做到将饱和电流完全矫正。另一种解决的途径是研究仅利用两侧电压和另一侧电流,而不考虑CT饱和的一侧电流,具有更高的测距精度和更广泛的应用。

文献[29]基于RL模型,利用两侧电压和CT未饱和侧的电流求得了故障距离,但对于长线,忽略线路分布电容将引起较大误差。文献[30]考虑分布参数,使用复杂的优化算法来解决CT饱和对测距的影响。该方法对给定的初值要求较高,需要鉴别哪些相CT饱和,从而选取不同的目标函数,变量多,计算量大。文献[31]基于分布参数模型,根据过渡阻抗纯电阻性质,提出了一种高精度测距算法,较好地解决了CT饱和或断线影响测距的问题,但该方法需要判别故障类型,要和选相元件配合才能应用。因此目前考虑CT饱和的双端故障测距算法仍有很大的研究空间。

3.3 两侧电压法

为了有效避免由于电流互感器饱和带来的测距误差,学者提出了仅基于线路两端同步电压相量的测距算法。理论上,这类方法无需电流相量参与,可以完全不受饱和侧电流的影响。

文献[32~34]提出一种仅利用线路两端电压相量实现测距的方法,根据故障后各节点组成的电压变化量矩阵方程求得故障距离;仿真结果表明该方法增强了双端测距的灵活性,测距精度高,并且避免了由电流互感器饱和所造成的测距误差。文献[35, 36]提出了故障线路正序端电压比指标概念,并证明了这一指标仅与故障距离、线路的阻抗有关,而与故障类型、过渡电阻无关;其次通过软件仿真得到故障点位置与电压比指标的单调曲线关系,进而对两端或三端线路进行匹配定位,可得到唯一的

距离解;实际的仿真表明这一方法也具有较高的精度。但上述方法需要提供两侧系统的等效阻抗,而在实际运行中,两侧系统阻抗是变化的,且在缺乏电流的情况下无法在线测量,因此这是一种理想化的测距算法。

4 实际应用

随着电力系统的不断发展,各种支接线路已越来越多地出现在高压和超高压电力网中。两端系统的故障测距算法比较成熟,但由于结构上的特殊性,很难将两端系统的算法直接用于各种支路系统。而双端测距原理要求传输线路两端均配置有PMU,虽能保证测距精度,但经济上十分不适用。因此研究当各种支接线路发生故障时,以最少的PMU配置,快速、准确地实现故障定位具有重要的实际意义。

4.1 常见线路结构

复杂的传输线路网络中,有着很多常见的线路结构,很难直接应用上述双端测距原理,如:三端或多端线路、T型线路、电容补偿线路、双回线、环型线路等等。

(1) 三端或多端传输线路

理论上说,用单端的基频电气量无法确定三端系统输电线路的故障点位置,因此,现有的几种可适用于三端或多端系统的故障测距方法几乎都是基于各端的电气量,每条线路母线均需配置PMU。

文献[37~39]等利用故障附加分量或正序分量的电压值来判断故障支路,在此基础上,将非故障支路化简合并,得到故障时支接点的等效电压、电流,再对故障支路应用双端测距算法进行高精度的故障测距。这些方法的关键是故障支路的判断,但可能在支接点附近浮现无法判断的死角。因此文献[40]针对三端线路分别假设故障发生在某一支路,由假定正常的2段支路端的电压、电流推算求得支接点电压和注入假定故障支路的电流,从而分别求得3个故障距离,经证明,求得的3个故障距离有且仅有1个在0和对应支路总长度之间,该距离就是真实的故障距离,故障发生在对应支路上。该方法无需事先判别故障支路即可测距,在支接点附近经高阻故障时无测距死角。而文献[41]针对多端线路把故障支路判别指标与定位融为一体,通过对多个指标的比较,从而确定故障位置;避免了故障分支的判别,消除了死角。

(2) T型线路

近年来,社会对电力的需求不断增长,而输电网络发展的相对滞后,导致小型发电厂或负载通过相对较短的线路连入输电线路的情况越来越多地出

现在电网中。

上述分支线路一般是长度较短、暂时的措施^[42],若使用三端线路的测距算法,则分支线路PMU的增加显然不经济,因此文献[42, 43]仅根据线路两端PMU的电流、电压值得到故障区域判别指标,从而确定故障支路;随后将非故障线路合并,把T型线路转化为双端线路测距问题。但这个方法的前提是分支的发电机或负载模型为已知,但实际上这些模型一般很难精确建立。针对这个问题,文献[44]提出基于线路两端的PMU,在分支(发电机或负载)未知情况下对输电线路进行精确定位;首先假设故障发生在传输线路的某一边,根据故障点电压相等原则和过渡电阻为纯阻抗的假设,建立两个关于故障距离的方程组;通过迭代的方法,求出故障距离,随后求出过渡电阻值,若电阻值为负则故障发生在分支的另一侧。

(3) 串联补偿线路

在传输线路中安装串联补偿装置可以增加线路传输容量、提高稳定性等,但这些电子装置出现会严重影响传输线路的故障测距精度。文献[45]提出了当输电线路有串联补偿装置时基于PMU的故障定位方法,与常规方法不同,这种方法不需要串联补偿元件的精确数学模型和运行状态的先验知识,适用于各种对线路电流没有附加相移的串联FACTS元件,EMTP仿真结果表明该方法达到了极高的故障定位精度。

4.2 全网定位

现有的基于同步相量的故障定位方法能否准确地定位故障取决于PMU的配置数量。只有当每条线路的两端均配置有PMU或者间隔一个母线配置PMU时,才能够有效地定位故障位置。但是受费用约束,目前尚不可能如此高密度地配置PMU。因此如何在配置较少数量的PMU的情况下,进行全网的故障定位仍是值得进一步研究的问题。

目前仅少量的文献对该领域进行了研究。文献[46]提出仿真匹配法,仅需少量PMU即可对全网故障进行定位,但该算法需要先判断故障类型并且需要进行大量的仿真计算。文献[47]从电网整体结构进行考虑,引入电压降概念,通过母线电压降的最优匹配定位故障线路,但该方法只能确定某条故障母线而不能精确定位故障发生位置。因此关于如何在现有PMU配置的情况下实现全网的精确定位将会是将来研究的一个重要方向。

5 总结

本文通过对国内外研究现状分析和展望,对基

于同步相量技术的故障定位原理及算法做了一定总结。鉴于各种故障测距算法在理论研究和实际应用中存在的种种问题,指出了一些故障测距理论还需要进一步研究和突破的地方,希望在此基础上做更进一步研究,以更好地解决实际问题,保证故障及时发现排除,使电网可靠运行。

参考文献

- [1] Zimmerman K, Costello D. Impedance-Based Fault Location Experience[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 25(10):211-226.
- [2] ZHANG Feng, LIANG Jun, ZHANG Li. A New Fault Location Method Avoiding Wave Speed and Based on Traveling Waves for EHV Transmission Line[A]. in: DRPT[C]. Nanjing(China):2008. 1753-1757.
- [3] 徐青山, 陈锦根, 唐国庆. 考虑母线分布电容影响的单端行波测距法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(2): 70-73.
XU Qing-shan, CHEN Jin-gen, TANG Guo-qing. Single Ended Fault Location Approach Considering Bus Distributed Capacitance Effect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(2):70-73.
- [4] Gracia J, Mazón A J. Best ANN Structures for Fault Location in Single and Double-Circuit Transmission Lines [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(4):2389-2395.
- [5] de Souza S M, da Silva A P A. Voltage and Current Patterns for Fault Location in Transmission Lines[A]. in: Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks[C]. Orlando, Florida(USA): 2007. 1475-1480.
- [6] 陈铮, 董新洲, 罗承沐. 单端工频电气量故障测距算法的鲁棒性[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003, 43(3): 310-313.
CHEN Zheng, DONG Xin-zhou, LUO Cheng-mu. Robustness of One-terminal Fault Location Algorithms Based on Power Frequency Quality[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2003, 43(3): 310-313.
- [7] 康小宁, 索南加乐. 基于参数识别的单端电气量频域法故障测距原理[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(2): 22-27.
KANG Xiao-ning, SUONAN Jia-le. Frequency Domain Method of Fault Location Based on Parameter Identification-using one Terminal Data[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(2):22-27.
- [8] 鞠平, 郑世宇, 徐群. 广域测量系统研究综述[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(7): 37-49.
JU Ping, ZHENG Shi-yu, XU Qun. Survey of Wide Area Measurement System[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(7): 37-49.
- [9] 安艳秋, 高厚磊. 基于同步相量测量的线路参数在线计算[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(9): 21-23.
AN Yan-qiu, GAO Hou-lei. On-line Calculation of Transmission Line Parameters Using Synchronized Phasor Measurement[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(9): 21-23.
- [10] 范琦, 穆钢, 王克英. 基于同步相量测量的线路参数在线测量的实验研究[J]. 东北电力学院报, 2002, 22(4): 5-11.
FAN Qi, MU Gang, WANG Ke-ying. Studies on Lines' Parameters Measurement Based on Synchronized Phasor Measurement[J]. Journal of Northeast China Institute of Electric Power Engineering, 2002, 22(4): 5-11.
- [11] 李胜芳, 范春菊, 郁惟镛. T型支接线路的自适应故障测距算法[J]. 电工技术学报, 2004, 19(10):59-65.
LI Sheng-fang, FAN Chun-ju, YU Wei-yong. Adaptive Fault Location Method for Three-Terminal Transmission Line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(10):59-65
- [12] Jiang Joe-Air, Yang Jun-Zhe, Lin Ying-Hong. An Adaptive PMU Based Fault Detection/Location Technique for Transmission Lines Part I: Theory and Algorithms[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(2):486-493.
- [13] Jiang Joe-Air, Yang Jun-Zhe, Lin Ying-Hong. An Adaptive PMU Based Fault Detection/Location Technique for Transmission Lines—Part II: PMU Implementation and Performance Evaluation [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(4):1136-1146.
- [14] 梁远升, 王钢, 李海锋. 消除暂态过程影响的滤波算法及其在故障测距中的应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(22): 77-82.
LIANG Yuan-sheng, WANG Gang, LI Hai-feng. A Filtering Algorithm for Eliminating Effect of Transient Component and Its Application on Fault Location[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(22): 77-82.
- [15] CHEN Zheng, LUO Cheng-mu, SU Jin-xi. A Fault Location Algorithm for Transmission Line Based on Distributed Parameter[J]. IEEE, 2001, 32(14):411-413.
- [16] 刘涤尘, 杜新伟, 李媛. 基于遗传算法的高压长线路双端故障测距研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(3):21-25.
LIU Di-chen, DU Xin-wei, LI Yuan. Fault Location Using Two-terminal Data for HV& Long Transmission Line Based on Genetic Algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(3):21-25.
- [17] 辛振涛, 尚德基, 尹项根. 一种双端测距算法的伪根问题与改进[J]. 继电器, 2005, 33(6):36-39.

- XIN Zhen-tao, SHANG De-ji, YIN Xiang-gen. False Root and Its Improvement of a Two-terminal Fault Location Algorithm on Transmission Line[J]. Relay, 2005,33(6):36-39.
- [18] FAN Chun-ju, DU Xiu-hua, LI Sheng-fang. An Adaptive Fault Location Technique Based on PMU for Transmission Line[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007,15(4):1-6.
- [19] 范春菊, 郁惟镛, 高翔. 一种实用的高压输电线路双端电气量故障测距算法[J]. 中国电力, 2003, 36 (7) : 31-34.
- FAN Chun-ju, YU Wei-yong, GAO Xiang. A New Practical Algorithm of Fault Location for EHV Transmission Line Based on Two-terminal electrical Measurements[J]. Electric Power, 2003, 36 (7) : 31-34.
- [20] 王亚强, 焦彦军. 超高压长线路故障测距研究[J]. 华北电力大学学报, 2006,33(1):20-24.
- WANG Ya-qiang, JIAO Yan-jun. Research on the EHV Long-line Fault Locating[J]. Journal of North China Electric Power University, 2006,33(1):20-24.
- [21] 黄雄, 尹项根, 辛振涛. 基于分布参数模型的平行双回线故障测距新算法[J]. 电力自动化设备, 2003,23(11): 4-8.
- HUANG Xiong, YIN Xiang-gen, XIN Zhen-tao. Fault Locating Algorithm for Double-circuit Line Based on Distributed Parameter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003,23(11):4-8
- [22] GONG Qing-wu, CHEN Yun-ping, ZHANG Cheng-xue. A Study of the Accurate Fault Location System for Transmission Line Using Multi-Terminal Signals[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000,16(4):2533-2538.
- [23] 陈允平, 吴凤, 龚庆武, 等. 输电线路故障定位的最小二乘法实现[J]. 电力系统自动化, 2001,25(13):54-56.
- CHEN Yun-ping, WU Su, GONG Qing-wu, et al. Least Square Realization in Fault Location of Transmission Line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001,25(13):54-56.
- [24] 索南加乐, 张怿宁, 齐军, 等. 基于参数识别的时域法双端故障测距原理[J]. 电网技术, 2006,30(8):65-70.
- SUONAN Jia-le, ZHANG Yi-ning, QI Jun, et al. Time Domain Fault Location Method Based on Transmission Line Parameter Identification Using Two Terminals Data[J]. Power System Technology, 2006,30(8):65-70.
- [25] 鲁文, 徐晨亮, 丁孝华, 等. 一种考虑分布电容的模糊故障测距算法[J]. 电力系统自动化, 2006,30(8):57-60.
- LU Wen, XU Chen-hang, DING Xiao-hua, et al. Fuzzy Algorithm for Fault Location with the Distributed Capacitor Taken into Account[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006,30(8):57-60.
- [26] Kang Y C, Kang S H, Park J K, et al. Development and Hardware Implementation of a Compensating Algorithm for the Secondary Current of Current Transformers[J]. IEE Proceedings Electric Power Applications, 1996, 143 (1) : 241-249.
- [27] CHEN K W, GLAD S T. Estimation of the Primary Current in a Saturated Transformer[A]. in: Proceedings of the 30th Conference on Decision and Control[C]. Brighton, U K. Piscataway, NJ, USA : IEEE, 1991 : 2363-2365.
- [28] Kojovic L A, Cummins J C, YU D C. Simplified Artificial Neural Network Structure with the Current Transformer Saturation Detector Provides a Good Estimation of Primary Currents[A]. in: Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting[C]. 2000, Seattle, WA, USA. Piscataway, NJ, USA : IEEE, 2000 : 1373-1378.
- [29] Saha M, Izykowski J, Rosolowski E. A Two End Method of Fault Location Immune to Saturation of Current Transformers[A]. in: Proceedings of IEE 8th International Conference on Developments in Power System Protection[C]. Amsterdam(Netherlands) Stevenage, U K: 2004. 172-175.
- [30] De Moraes Pereira C E, Zanetta J R L C. Optimization Algorithm for Fault Location in Transmission Lines Considering Current Transformers Saturation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20 (2) : 603-608.
- [31] 施世鸿, 何奔腾. 不受 TA 饱和影响的高压输电线路故障测距算法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(2): 67-71.
- SHI Shi-hong, HE Ben-teng. Fault Location Algorithm for HV Transmission Lines Immune to Saturation of Current Transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(2): 67-71.
- [32] Brahma Sukumar M, Girgis Adly A. Fault Location on a Transmission Line Using Synchronized Voltage Measurements[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(4):1619-1622.
- [33] Brahma Sukumar M, Girgis Adly A. Fault Location Scheme for a Multi-Terminal Transmission Line Using Synchronized Voltage Measurements[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(2):1325-1331.
- [34] 宋振红, 张举, 唐杰. 一种基于双端电压相量测量的故障测距新算法[J]. 电力自动化设备, 2006,26 (6) :27-29.
- SONG Zhen-hong, ZHANG Ju, TANG Jie. Fault Locating Based on Dual-terminal Voltage Measurement[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006,26 (6) :27-29.
- [35] Zamora I, Mi Aambres J F, et al. Fault Location on

Two-terminal Transmission Lines Based on Voltages[J]. IEE Proceedings Gener Transm & Distrib, 1996, 143(1):1-6.

[36] Zamora I, MiAambres J F. A New Technique Based on Voltages for Fault Location on Three-terminal Transmission Lines[J]. Electric Power Systems Research, 1996,37: 143-151.

[37] Abe M, Otsuzuki N, Emura T, et al. Development of a New Fault Location System for Multi-terminal Single Transmission Lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995,10(1):1516-1532.

[38] 田羽, 范春菊, 龚震东. 带同杆双回线的T型线路故障分支判定算法[J].电力系统自动化, 2006, 30(21):71-76. TIAN Yu, FAN Chun-ju, GONG Zhen-dong. Faulted Line Selecting Method of T Circuit of Parallel Transmission Lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(21):71-76.

[39] Girgis A A, Hart D G, Peterson W L. A New Fault Location Technique for Two- and Three-Terminal Lines[J].IEEE Trans on Power Delivery, 1992,7(1): 98-107.

[40] 施世鸿,何奔腾. 一种T形高压输电线路故障测距新方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(11):49-54. SHI Shi-hong, HE Ben-teng. New Fault Location Method for HV T-connection Transmission Lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(11):49-54.

[41] Lien Kai-ping, Liu Chih-wen, Jiang Joe-air. A Novel Fault Location Algorithm for Multi-Terminal Lines Using Phasor Measurement Units[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 21(10):576-581.

[42] Lin Ying-hong, Liu Chih-wen, Jiang Joe-Air. An Adaptive Fault Locator for Transmission Lines Tapped with a Source of Generation-Using Synchronized Voltage and Current Phasors[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000,13(4):1379-1385.

[43] Lin Ying-hong, Liu Chih-wen, Yu Chi-shan. A New Fault Locator for Three-Terminal Transmission Lines—Using Two-Terminal Synchronized Voltage and Current Phasors[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002,17(2):452-460.

[44] Yu Chi-shan, Liu Chih-wen, Lin Ying-hong. A Fault Location Algorithm for Transmission Lines with Tapped Leg—PMU Based Approach[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 7(1):915-920.

[45] Yu C S, Liu C W, Yu S L et al. A New PMU-based Fault Location Algorithm for Series Compensated Lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17(1):33-46.

[46] LUO S S, Kzunovic M, Sevick D R. Locating Faults in the Transmission Network Using Sparse Field Measurements, Simulation Data and Genetic Algorithm[J]. Electric Power Systems Research, 2004,71: 169-177.

[47] Galijasevic Zijad, Abur Ali. Fault Location Using Voltage Measurements[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17(2):441-445.

收稿日期: 2008-08-18; 修回日期: 2009-04-22

作者简介:

王波(1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为基于WAMS的故障诊断等; E-mail: zjuwangbo@gmail.com

王伟(1983-), 男, 工程师, 研究方向为电力系统分析;

陈超(1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电路系统。

(上接第 108 页 continued from page 108)

XUE Wei, SHU Ji-wu, et al. PC Cluster Based Parallel Simulation for Large-scale Power System Transient Stability Study[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 38-43.

[16] 岳程燕,周孝信,李若梅. 电力系统电磁暂态实时仿真中并行算法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 1-7. YUE Cheng-yan, ZHOU Xiao-xin, LI Ruo-mei. Study of Parallel Approaches to Power System Electromagnetic Transient Real-time Simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12):1-7.

[17] 贺仁睦,周庆捷,郝玉国. 电力系统机-网暂态仿真的并行算法[J]. 中国电机工程学报, 1995, 15(3):179-184. HE Ren-mu, ZHOU Qing-jie, HAO Yu-guo. Parallel Algorithm Used in the Machine-network Transient Stability Simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 1995, 15(3):179-184.

收稿日期: 2008-08-10; 修回日期: 2009-04-10

作者简介:

叶廷路(1964-), 男, 博士研究生, 主要从事电力系统仿真、电力系统调度通信及管理工作;

王晓蔚(1970-), 女, 高级工程师, 博士, 主要从事电力系统继电保护及电力系统数字仿真方面的研究工作。

E-mail: wxwhwp@163.com