

输电线路行波故障定位技术发展及展望

马超然

(广东电网公司肇庆供电局, 广东 肇庆 526060)

摘要: 输电线路是故障率最高的元件, 准确的故障定位技术对于电力系统的安全可靠运行具有十分重要的作用。行波原理的故障定位技术的定位精度高, 具有不受过渡电阻、线路结构不对称、线路走廊地形变化、电压和电流互感器的变换误差等因素影响的特点, 且能够用于直流线路和串补电容线路。近年来行波故障定位技术在新原理的探索、行波信号的提取和分析等方面取得了长足进步, 并将高速采样和存储技术应用于行波定位装置的开发。

关键词: 行波; 故障定位; 输电线路

Prospect and development of transmission line fault location using travelling wave

MA Chao-ran

(Zhaoqing Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd, Zhaoqing 526060, China)

Abstract: Since transmission lines are liable to faults, its fault location technology with higher accurate is important to the operation of power systems. As a method with high accuracy, travelling wave based fault location is independent of fault resistance, symmetry of configuration, terrain of corridor, error of TA and TV, and can be used in DC transmission lines and series compensating lines. Recently, the advancements are made on the exploration of new theories, the signal pick-up and analysis, and the high-speed sampling and the mass storage facility are used in the development of travelling wave fault location devices.

Key words: travelling wave; fault location; transmission line

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)24-0011-05

0 引言

高压输电线路是电力系统的命脉, 它担负着电能传输的重任, 也是电力系统中最容易发生事故的元件。在线路故障后如果能够及时、准确地找到故障点, 不仅对修复线路和保证可靠供电, 而且对保证整个电力系统的安全稳定和经济运行都有十分重要的作用^[1]。远距离输电线路有时难免要穿越山区、沙漠等偏僻地带, 交通十分不便, 且故障多在恶劣天气中发生。因此, 对于故障测距装置而言, 定位的准确性非常重要, 也是继电保护领域的研究热点。该技术的大力发展和广泛应用具有极其重要的作用。

故障定位技术可进行如下分类: 1)按使用的电气量可分为单端算法和双端算法; 2)按对故障数据分析方式可分为频域法和时域法; 3)按算法采用的模型可分为集中参数模型法和分布参数模型法。

考虑到行波法只利用故障数据中的行波波头进行故障定位, 文献[1]将故障定位方法分为: 行波

法和故障分析法。

故障分析法的故障定位原理, 易受线路参数的精确度、过渡电阻、线路分布电容、故障暂态过程、线路结构不对称、线路走廊地形变化、电压和电流互感器的变换误差等因素的影响, 定位精度难以提高。另外, 故障分析法的故障定位原理还存在如下问题: 不能用于直流输电线路、不能用于带串补电容的线路、难以用于T型线路和部分同杆的双回线。鉴于以上原因, 近年来行波故障定位得到了长足的发展。

1 行波故障定位的分类

早期行波法故障定位诞生于20世纪40年代末, 由于暂态行波的传播速度比较稳定(接近光速), 人们认识到检测故障线路上暂态行波在母线与故障点之间的传播时间可以测量故障距离。在传播时间的测定方面, 早期行波故障定位利用电子计数器或者阴极射线示波器来测量暂态行波的到达时刻和传播时间, 现在的行波故障定位则利用各种数字信号

处理算法来测量暂态行波的到达时刻和传播时间。迄今为止,行波故障定位可分为 A、B、C、D、E 和 F 型^[1~5],共 6 种原理,其中 A、C 型为单端原理,而 B、D 型为双端原理。现分别简介如下:

(1) A 型原理

在线路一端测量点感受到故障初始行波浪涌时启动一电子计数器,而当该行波浪涌在故障点的反射波返回测量点时停止计数,由此可以得到行波在测量点与故障点之间往返一次的传播时间,对应于测量点到故障点距离的 2 倍。这种原理的主要缺点是不能区分来自故障点的反射波和系统中其它波阻抗不连续点的反射波,因而可靠性较差。

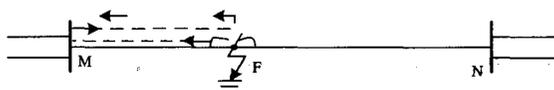


图 1 A 型行波测距原理示意图

Fig.1 Schematic diagram map of type A travelling wave fault location

(2) B 型原理

在线路一端(收信端)测量点感受到故障初始行波浪涌时启动一电子计数器,而线路另一端(发信端)测量点感受到故障初始行波浪涌时启动一发信机并向收信端发信。当收信端测量点的收信机接收到来自发信端的信号时即停止计数,从而在本端可以获得行波在故障点与发信端测量点之间往返一次的传播时间,对应于故障点到发信端距离的 2 倍。B 型法最大的优点是不受来自系统中波阻抗不连续点反射波的影响,但它需要实时通道,因而其可靠性和测距精度直接受通道的影响。

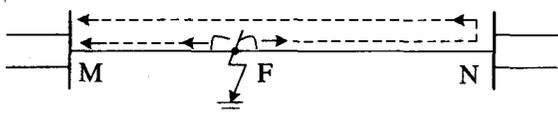


图 2 B 型行波测距原理示意图

Fig.2 Schematic diagram map of type B travelling wave fault location

(3) C 型原理

在线路故障时将一高压高频脉冲或高压直流脉冲注入到故障线路一端的测量点,进而利用电子计数器测量该信号在测量点与故障点之间往返一次的传播时间,对应于测量点到故障点距离的 2 倍。C 型原理与雷达的工作原理类似,故又称为脉冲雷达法。我国学者在 20 世纪 70 年代对 C 型原理进行了深入研究,并研制出相应的故障探测装置。这种原理存在的主要问题是受故障本身产生暂态行波以

及线路上其它各种干扰的影响,而且还需要价格昂贵的高压脉冲信号发生器。

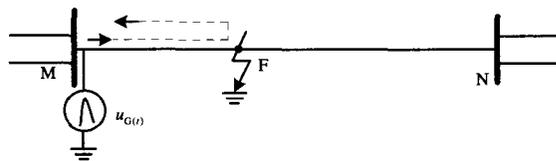


图 3 C 型行波测距原理示意图

Fig.3 Schematic diagram map of type C travelling wave fault location

(4) D 型原理

通过载波同步方式实现两端测距装置的同步计时,并在此基础上测量故障初始行波浪涌由故障点到达故障线路两端测量点的绝对时刻,二者之间的差值可以用来计算故障点到线路两端测量点的距离。与 B 型原理一样, D 型原理最大的优点是不受来自系统中波阻抗不连续点反射波的影响,但它需要建立时钟同步机制,因而其可靠性和测距精度直接受时钟同步方式的影响。另外, D 型原理还需要通道,以实现两端故障信息(即故障触发时刻)的交流。

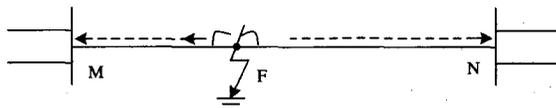


图 4 D 型行波测距原理示意图

Fig.4 Schematic diagram map of type D travelling wave fault location

(5) E 型原理

利用故障线路重合闸暂态行波的单端测距原理^[3]。对于永久性故障, E 型行波故障测距原理可以分为标准模式、扩展模式 1、扩展模式 2 和综合模式等 4 种运行模式,各测距模式与 F 型行波故障测距原理中相应测距模式具有类似的工作原理。

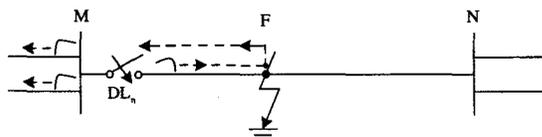


图 5 E 型行波测距原理示意图

Fig.5 Schematic diagram map of type E traveling wave fault location

(6) F 型原理

利用故障线路分闸暂态行波的单端测距原理^[5]。根据所检测反射波性质的不同,可以将其分为 4 种运行模式,即标准模式、扩展模式 1、扩展模式 2 和综合模式。在标准模式和扩展模式 1 下需

要检测故障点反射波,在扩展模式 2 下需要检测对端断路器主触头反射波,而在综合模式下则需要检测继第 1 个正向行波浪涌之后最先到来的反向行波浪涌。

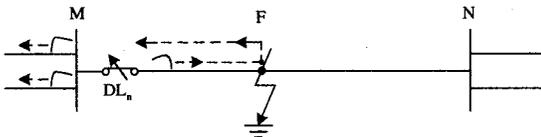


图 6 F 型行波测距原理示意图

Fig.6 Schematic diagram map of type F travelling wave fault location

2 行波故障定位技术的发展

20 世纪 90 年代以来,行波故障定位在暂态行波的提取、新技术的应用以及行波测距原理和算法的研究方面都取得许多突破,并且获得广泛的应用,取得了较大的经济效益。该领域的进展主要有以下几方面:

(1) 行波故障测距基本原理的发展

传统的行波故障测距的原理有 A、B、C、D 型。近年来提出的行波故障定位新原理有 E 型和 F 型^[1-5]。E 型行波测距原理利用断路器重合闸于故障线路时产生的暂态行波在测量点与永久性故障点之间往返一次的传播时间计算故障距离;F 型行波测距原理则利用断路器分闸于故障线路时产生的暂态行波在测量点与故障点之间往返一次的传播时间计算故障距离。

(2) 暂态行波的提取

暂态行波所覆盖的频带很宽,从几千赫兹到几百千赫兹。常规的电容式电压互感器(CVT)由于截止频率太低,不能满足行波测距的要求。文献[6]的研究表明,常规的电流互感器能够传变高达 100 kHz 以上的电流暂态分量,完全能够满足行波测距的要求,并提出了利用电流暂态分量的行波故障测距技术。利用电流互感器传变的暂态信号,所研制的行波故障测距装置达到了商业化水平,能够成功捕捉故障,定位精度高^[7-10]。文献[11]设计了一个由高速方向检测器控制且连接到线路侧 CVT 高压耦合电容器的结合滤波器来获取线路内部故障产生的高频电压分量。文献[12]通过将一电感线圈串入 CVT 的接地导线中来抽取线路电压暂态信号,而文献[13]则采用专门研制的行波传感器来耦合线路侧 CVT 接地导线上的电流暂态信号,从而间接地反映线路电压暂态信号。

随着光学电流互感器(OCT)和光学电压互感

器(OVT)的应用^[14,15],暂态行波分量的提取将会变得十分容易。

(3) 行波故障测距算法的发展

20 世纪 90 年代以来,行波故障测距算法的研究重点不仅在于故障点反射波的检测,以实现单端行波故障测距,还在于故障初始行波浪涌到达线路两端测量点时刻的精确标定,以实现双端行波故障测距。另外,行波故障测距算法的研究和行波保护算法的研究越来越紧密地联系在一起。已经提出的行波故障测距算法可以分为匹配滤波器法^[1,6]、第 2 个反向行波浪涌识别法^[1,6]、极大似然估计法^[21]和小波模极大值法^[22-24]等几大类。

(4) 相关领域技术的发展

行波故障测距技术的发展与相关领域的技术发展是分不开的,例如微电子技术、全球定位系统(GPS)技术、通信技术和数字信号处理(DSP)技术等。

微电子技术在行波故障测距中的应用使得对于电压和电流暂态信号的高速采集和存储成为可能^[16],进而为行波故障测距(尤其是单端行波故障测距)技术的实现提供了物质基础。GPS 技术在电力系统中的应用^[17],为研制电力系统同步时钟创造了条件^[18],进而使得 D 型(双端)行波故障测距原理的实现成为可能^[19,20]。通信技术的应用为行波故障测距系统技术的实现奠定了网络基础,而 DSP 技术的应用则促进了各种实时高性能行波故障测距算法的发展。

3 行波故障定位装置的应用

尽管已经提出的各种行波测距算法还不很完善,但行波故障测距在暂态信号耦合、高速采集、时间同步、暂态波形存储和远传等方面技术的实现早已变得十分容易^[3],因此国内外已有行波故障测距装置和系统投入实际运行,并且积累了多年的运行经验。

(1) Hathaway 行波测距系统^[25,26]

1992 年,哈德威仪器公司研制出利用电流暂态分量的行波故障测距装置原型样机,并在苏格兰电网投入试运行。1993 年,该公司推出正式的行波测距系统,它由行波采集单元和行波分析系统组成,并且集成了 A、D 和 E 等 3 种行波测距原理。到 1997 年为止,行波测距系统已经覆盖了苏格兰电力系统中所有 275 kV、400 kV 及部分重要的 132 kV 线路。实际运行表明,该系统可以将故障定位到 $\pm 300\text{m}$ 以内。

(2) B. C. Hydro 行波测距系统^[12]

1993年,加拿大的不列颠哥伦比亚水电公司(British Columbia Hydro)研制出D型行波故障测距系统,并安装在不列颠哥伦比亚省的14个500 kV变电所,覆盖线路总长超过5300 km。该系统通过专门研制的耦合装置采集故障产生的高频电压暂态信号,但没有波形记录功能。实际运行表明,该系统可以将故障定位到 ± 300 m以内。

(3) 科汇行波测距系统^[10]

1995年,淄博科汇电气有限公司和西安交通大学等单位联合研制出利用电流暂态分量的XC-11型输电线路行波故障测距装置,并在辽阳500kV变电所投入试运行。该装置利用专门研制的高速数据采集与处理模块以及电力系统同步时钟(内置GPS接收模块)分别实现对线路电流暂态信号的采集以及精确时间同步,并集成了A、D和E等3种行波故障测距原理以及匹配滤波器和小波模极大值等行波分析算法。到2000年为止,该装置已有数十套在我国辽宁、山东、甘肃、四川、广西、湖北以及陕西等电网投入运行,其平均实测误差不超过 ± 400 m。

2000年,科汇电气有限公司和西安交通大学又联合研制出功能更为强大的XC-2000行波故障测距系统,它可以同时采集8回线路的电流和电压暂态信号。自2000年9月以来,该系统已在黑龙江、云南、广东、北京、南方等电网以及 ± 500 kV葛南直流输电线路(全长1038 km)投入运行,其中黑龙江绥化电网的全部220 kV线路以及部分60 kV线路均配备了行波故障测距功能。到目前为止,XC-2000系统所监视的线路已经涵盖了普通交流线路、双回线路、串联补偿线路、直流输电线路以及T型线路。实际运行表明,该系统可以将故障定位到 ± 200 m以内(在直流线路上的测距误差不超过 ± 1 km)。

(4) 其它行波测距系统^[13,20,24]

国内外其它一些研究单位提出的行波故障测距系统只采用单一的D型行波故障测距原理,其中一些系统不具备波形采集功能,而文献[13]则提出一种综合常规测距原理和D型行波测距原理的故障测距系统。所有这些系统均不能同时采集线路电流和电压暂态信号,也未见有关实际运行经验方面的报道。

4 结论与展望

从20世纪80年代的理论研究,到90年代的应用研究,以及具体装置与系统的成功运行,行波故障测距方法已经越来越被人们所接受。行波故障测距的原理不断完善,精度不断提高,应用范围不断扩大。为了提高测距的可靠性和准确性,还需继

续研究以下内容:

1) 暂态行波分量的提取

行波是有方向性的,即传播方向与规定参考方向相同的行波称为正向行波(或前行波),而传播方向与规定参考方向相反的行波称为反向行波(或反行波)。任一方向的电压行波、电流行波和线路波阻抗之间满足欧姆定律的关系,因而利用线路一端的电压、电流和波阻抗即可求出该端的正向电压、电流行波以及反向电压、电流行波。

但事实上,实际线路的电阻、电感和电容等原参数并非常数,而是频率的函数,因而由线路参数决定的线路波阻抗等副参数也是频率的函数,这显然给暂态行波分量的准确提取带来了困难。

2) 波速度的确定

线路上的暂态行波浪涌具有从低频到高频的连续频谱,其中不同频率分量的传播速度是不相同的。行波分量的频率越低,其传播速度越慢;行波分量的频率越高,其传播速度越快,并且越趋于一致(接近光速)。因而被检测行波浪涌中除了能够到达测量点的最高频率分量以外,其它所有频率分量到达测量点的时刻是不可能准确获得的。从这个意义上说,线路上任一行波浪涌的传播速度应定义为其能够到达测量点的最高频率分量的传播速度。在这种情况下,到达线路两端测量点的故障初始行波浪涌的传播速度将有可能不同。因此,如何确定能够到达测量点的最高频率分量的传播速度和到达时刻是实现准确行波故障测距的关键。

3) 故障初始行波浪涌到达时刻的标定

现有行波故障测距装置都是将包含故障初始行波浪涌在内的电压或电流暂态信号瞬时超过某一检测门槛值的绝对时刻(精确到 $1\mu\text{s}$ 以内)作为故障初始行波浪涌的到达时刻。受行波频散、故障初始角以及互感器或暂态耦合器响应速度等因素的影响,安装在线路末端的行波测距装置所感受到的故障初始行波浪涌总存在一定的上升时间。因而采用简单的门限检测法来标定故障初始行波浪涌的到达时刻必然会导致测距误差。

4) 故障点反射波与对端母线反射波的识别与标定

单端行波故障测距原理利用在线路测量端感受到的第1个正向行波浪涌与其在故障点反射波或者初始行波浪涌在对端母线反射波之间的时延计算故障距离,其中第1个正向行波浪涌的检测方法与故障初始行波浪涌的检测方法相同。能否对故障点反射波或对端母线反射波进行准确标定与识别,将直接关系到各种单端行波故障测距原理的可靠性和准

确性。由于行波在传播过程中波形畸变的影响,现有的各种单端行波测距算法(包括小波模极大值法)难以可靠识别故障点反射波和对端母线反射波,更难以对其到达时刻进行准确标定。

参考文献

- [1] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术(第2版)[M]. 西安:西安交通大学出版社,2007.
GE Yao-zhong. New Types of Protective Relaying and Fault Location: Theory and Techniques, Second Edition[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2007.
- [2] 陈平. 输电线路现代行波故障测距及其应用研究(博士学位论文)[D]. 西安:西安交通大学,2003.
CHEN Ping. Modern Travelling Wave Based Fault Location of Transmission Lines and Its Applications, Doctoral Dissertation[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1991.
- [3] 徐丙垠,李京,陈平,等.现代行波测距技术及其应用[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(23):62-65.
XU Bing-yin, LI Jing, CHEN Ping, et al. Modern Travelling Wave Based Fault Location Technology and Its Application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(23):62-65.
- [4] 陈平,葛耀中,索南加乐,等.输电线路故障开断暂态行波的传播特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2000,20(7):75-78.
CHEN Ping, GE Yao-zhong, SUONAN Jia-le, et al. Study on Propagation Characteristics of Fault Switching-off Induced Transient Travelling Waves on Transmission Lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(7):75-78.
- [5] 陈平,葛耀中,索南加乐,等.基于故障开断暂态行波信息的输电线路故障测距研究[J]. 中国电机工程学报, 2000,20(8):56-59,64.
CHEN Ping, GE Yao-zhong, SUONAN Jia-le, et al. Study on Fault Location of Transmission Lines Based upon Fault Switching-off Induced Transient Travelling Waves[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(8):56-59, 64.
- [6] 徐丙垠. 利用暂态行波的输电线路故障测距技术(博士学位论文)[D]. 西安:西安交通大学,1991.
XU Bing-yin. Techniques for Fault Location of Transmission Lines Using Transient Travelling Waves, Doctoral Dissertation[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1991.
- [7] Gale P F, Crossley P A, Xu Bingyin, Ge Yaozhong, Cory B J, Barker J R G. Fault Location Based on Travelling Waves[A]. In: Fifth International Conference on Developments in Power System Protection[C]. York (UK): 1993.54-59.
- [8] 董新洲. 小波理论应用于输电线路故障测距研究(博士学位论文)[D]. 西安:西安交通大学,1996.
DONG Xin-zhou. Wavelet Theory Applied to Study on Fault Location of Transmission Lines Doctoral Dissertation[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1996.
- [9] 葛耀中,徐丙垠,陈平. 利用暂态行波测距的研究[J]. 西安交通大学学报, 1995, 29(3):70-75.
GE Yao-zhong, XU Bing-yin, CHEN Ping. Study of Fault Location Based on Travelling Waves[J]. Journal of Xi'an jiaotong University, 1995, 29 (3) :70-75.
- [10] 陈平,徐丙垠,李京,等.现代行波故障测距装置及其运行经验[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(6):66-69.
CHEN Ping, XU Bing-yin, LI Jing, et al. Modern Travelling Wave Based Fault Locator and Its Operating Experience[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(6) :66-69.
- [11] Johns A T, Agrawal P. New Approach to Power Line Protection Based upon the Detection of Fault Induced High Frequency Signals[J]. IEE Proceedings-C, 1990, 137(4):307-313.
- [12] Lee H, Mousa A M. GPS Travelling Wave Fault Locator Systems: Investigation into the Anomalous Measurements Related to Lightning Strikes[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996,11(3): 1214-1223.
- [13] 曾祥君,尹项根,陈德树,等.新型输电线路故障综合定位系统研究[J]. 电力系统自动化, 2000,24(22):39-44.
ZENG Xiang-jun, YIN Xiang-gen, CHEN De-shu, et al. Study on a New Type of Integrative Fault Location System for Transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(22):39-44.
- [14] 刘晔,王采堂,苏彦民,等.电力系统适用光学电流互感器的研究新进展[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(17):60-64.
LIU Ye, WANG Cai-tang, SU Yan-min, et al. New Direction of Study of Optical Current Transducer Used in Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(17):60-64.
- [15] 邹建龙,刘晔,王采堂,等.电力系统适用光学电压互感器的研究新进展[J]. 电力系统自动化, 2001,25(9):64-67.
ZOU Jian-long, LIU Ye, WANG Cai-tang, et al. Development of Study of Optical Voltage Transducer Used in Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(9):64-67.
- [16] 沈兰荪. 高速数据采集系统的原理与应用[M]. 北京:人民邮电出版社,1995.
SHEN Lan-sun. The Principle and Application of High-Speed Data Collecting System[M]. Beijing: People's Posts & Telecommunications Publishing House, 1995.
- [17] Cory B J, Gale P F. Satellites for Power System Applications[J]. Power Engineering Journal, 1993, 7(5):201-207.

- [2] 西安交通大学, 等. 电力系统计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1978.
Xi'an Jiaotong University, et al. The Calculation of Power Systems[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1978.
- [3] 韩祯祥, 吴国炎. 电力系统分析[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2001.
HAN Zhen-xiang, WU Guo-yan. Electric Power System Analysis[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2001.
- [4] 何仰赞, 温增银, 汪馥瑛, 等. 电力系统分析[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996.
HE Yang-zan, WEN Zeng-yin, WANG Fu-ying, et al. Electric Power System Analysis[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1996.
- [5] Kundur P. Power System Stability and Control (影印版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
Kundur P. Power System Stability and Control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [6] 中国电力企业联合会标准化部. 电力工业标准汇编电气卷(3)电机及变压器类[M]. 北京: 中国电力出版社, 1996.43-112.
- [7] 陈珩. 电力系统稳态分析(第二版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
CHEN Heng. Electric Power System Static Analysis, Second Edition[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995.
- [8] 姚玉斌, 刘仲尧, 陈勇. 基于 CIM 的电力变压器模型分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(18): 57-61.
YAO Yu-bin, LIU Zhong-yao, CHEN Yong. A Study on Transformer Representation based on CIM[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(18): 57-61.

收稿日期: 2007-06-05; 修回日期: 2007-07-26

作者简介:

姚玉斌(1965-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统分析和控制; E-mail: yyb@newmail.dlmu.edu.cn

吴志良(1963-), 男, 教授, 博士研究生, 主要从事船舶自动化系统的教学与研究;

王丹(1960-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为非线性系统控制、电力电子与电力传动。

(上接第 15 页 continued from page 15)

- [18] 徐丙垠, 李桂义, 李京, 等. 接收 GPS 卫星信号的电力系统同步时钟[J]. 电力系统自动化, 1995, 19(3): 44-47.
XU Bing-yin, LI Gui-yi, LI Jing, et al. Synchronous Clock in Power System by Receiving Signal From GPS[J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(3): 44-47.
- [19] 董新洲, 葛耀中, 徐丙垠, 等. 利用 GPS 的输电线路行波故障测距研究[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(12): 37-40.
DONG Xin-zhou, GE Yao-zhong, XU Bing-yin, et al. Study of Transmission Line Fault Location Based on Traveling Waves and GPS Technique[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(12): 37-40.
- [20] 曾祥君, 尹项根, 陈德树, 等. 基于整个输电网 GPS 行波故障定位系统的研究[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(10): 8-10, 16.
ZENG Xiang-jun, YIN Xiang-gen, CHEN De-shu, et al. GPS Traveling-wave Fault Location Systems for Transmission Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(10): 8-10, 16.
- [21] Ancell G B, Pahalawaththa N C. Maximum Likelihood Estimation of Fault Location on Transmission Lines Using Travelling Waves[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9(2): 680-689.
- [22] 董新洲, 葛耀中, 徐丙垠. 利用暂态电流行波的输电线路故障测距研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4): 76-80.
DONG Xin-zhou, GE Yao-zhong, XU Bing-yin. Research of Fault Location Based on Current Travelling Waves[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(4): 76-80.
- [23] Magnago F H, Abur A. Fault Location Using Wavelets[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(4): 1475-1480.
- [24] 覃剑, 陈祥训, 郑健超, 等. 利用小波变换的双端行波测距新方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 6-10.
QIN Jian, CHEN Xiang-xun, ZHENG Jian-chao, et al. A New Double Terminal Method of Travelling Wave Fault Location Using Wavelet Transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(8): 6-10.
- [25] Gale P F, Stokoe J, Crossley P A. Practical Experience with Travelling Wave Fault Locators on Scottish Power's 275 & 400kV Transmission System[A]. In: the Sixth International Conference on Developments in Power System Protection[C]. Nottingham (UK): 1997. 192-196.
- [26] Gale P F, Taylor P V, Naidoo P, et al. Travelling Wave Fault Locator Experience on Eskom's Transmission Network[A]. In: the Seventh International Conference on Developments in Power System Protection[C]. Amsterdam (Netherlands): 2001. 327-330.

收稿日期: 2007-10-08

作者简介:

马超然(1963-), 男, 工程师, 主要研究方向为供用电及电力系统自动化。E-mail: chaoranma@163.com