

输电线路行波保护原理与研究现状

邹贵彬, 高厚磊

(山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 介绍了输电线路行波保护的形成本背景, 回顾了国内外行波保护的发展历程, 分析了各种行波保护原理的优缺点。在此基础上, 针对过去行波保护研究上所遇到的困难提出了相应的解决措施, 重点对暂态行波信号的提取、相关技术领域的发展和行波保护的发展前景进行了阐述。展望了行波保护的发展前景。

关键词: 输电线路; 行波保护; 小波变换

Study status and theories of protection for transmission lines based on travelling wave

ZOU Gui-bin, GAO Hou-lei

(School of Electric Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The background of protective relaying based on travelling wave for transmission lines is introduced and its development at home and abroad is reviewed. Moreover, the advantages and disadvantages of various travelling wave based protective theories are analyzed. Aiming at the difficulty in the travelling wave based protection, the corresponding measures are proposed. The paper focuses on the extracting of travelling wave information, the development of associated technique field and the application of analysis tool based on wavelet transform. The prospect of the travelling wave based protection is predicted.

Key words: transmission line; protection based on travelling wave; wavelet transform

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)20-0001-06

0 引言

全国高压、超高压输电线路的不断扩建及特高压线路的试建, 大容量机组的陆续投运, 全国电网的互联对电力系统继电保护的動作速度、可靠性、灵敏度等指标提出了更高的要求。目前在输电线路广泛采用的是反应工频电气量的继电保护装置。这些保护装置的构成原理是建立在反应工频电压、电流或由其组合的功率方向、阻抗等基础上的。为了保证保护装置能在故障时正确动作, 在传统的反应工频电气量的保护装置中, 通常采用滤波等方法来消除暂态过程对保护的影响。但是滤波势必影响保护的動作速度, 加长保护的動作时间, 由此产生可靠性和動作速度之间的矛盾。解决这一矛盾的途径之一是采用不反应工频电气量的继电保护原理。输电线路行波保护就是利用故障暂态分量实现的保护原理之一^[1]。

随着现代计算机技术、数字信号处理技术、通讯技术以及暂态识别技术的发展, 国内外对基于行波的输电线路保护进行了广泛而深入的研究。本文在回顾行波保护的发展历程, 分析目前行波保护优

缺点的基础上, 重点对实现行波保护的一些关键技术提出了相应的研究思路, 并预期了行波保护的发展前景。

1 行波保护概念及发展背景

1.1 行波保护的概念

如文献[1]所述, 当输电线路某点 F 发生故障时, 由于输电线路的分布参数特性, 将产生向线路两端以接近光速传播的暂态电压行波和电流行波, 如图1所示。

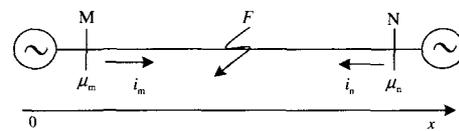


图1 故障行波的产生

Fig. 1 Travelling wave generated resulting from fault

根据电磁场理论, 单根无损线路上的电压 u 和电流 i 是位置 x 和时间 t 的函数, 它们满足波动过程

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad (2)$$

式中: L 、 C 为线路单位长度电感和电容。以上方程有达朗贝尔(D. Alembert)解

$$u = u_1 \left(t - \frac{x}{v} \right) + u_2 \left(t + \frac{x}{v} \right) \quad (3)$$

$$i = \frac{1}{Z_c} \left[u_1 \left(t - \frac{x}{v} \right) - u_2 \left(t + \frac{x}{v} \right) \right] \quad (4)$$

式中: $v = 1/\sqrt{LC}$ 为行波的传播速度(接近光速); $Z_c = \sqrt{L/C}$ 为波阻抗; $u_1(t - x/v)$ 为沿 x 正方向传播的前行波; $u_2(t + x/v)$ 为沿 x 反方向传播的反行波。

输电线路故障行波的一个重要特性是波的折射和反射。在电力系统中, 均匀线路只在一定的条件下存在。当行波沿导线运动时, 如果线路的参数或波阻抗在某一点处突然改变, 那么在该点处将发生波的反射和折射。

行波保护就是利用上述行波方程及其变化方程和行波的折、反射特点等行波理论来实现的超高速继电保护。它利用故障开始初期出现的行波电压、行波电流或两者组合中含有的暂态故障信息, 在极短时间内检出故障。基于行波理论, EHV 输电线路的保护能够在毫秒范围内检测和决定故障方向并超高速动作。

1.2 行波保护的发展背景

纵观电力系统的保护发展史, 输电线路保护原理主要有基于电流和基于距离保护两种, 如差动、方向、距离、单元保护及广域保护等, 它们都涉及到从复杂的故障后电压和/或电流波形中通过滤波来提取工频分量以检测故障。虽然基于上述保护原理的设备随着现代技术的发展得到不断的改进, 但上述保护原理并没有多大的变化, 在当今的继电保护领域仍起着主导作用。

随着现代大容量机组的不断投运和超高压输电线路的增多、特高压线路的试建并由于其有效电阻的减小, 衰减时间常数的增大, 使得系统中发生故障时所产生的暂态过程更加复杂^[2]。与此同时, 反映工频量的传统保护从原理上存在可靠性和动作速度之间的矛盾。解决这一矛盾的有效途径就是采用反应于暂态电气量的超高速继电保护原理。电力系统故障时将产生附加的故障暂态分量, 这些故障分量包含丰富的故障信息并分布于从直流分量到高频分量的宽广频谱范围内, 而且高频分量中包含着比工频分量更多的故障信息(如故障类型、故障位

置及方向等)。因而可以用来发展仅用工频分量无法实现的保护原理。

基于检测故障产生的行波而实现的行波保护就是反应高频暂态量的超高速保护之一。行波保护主要具有数据窗短、响应快的优点, 而且不受过渡电阻、系统振荡和电流互感器饱和等的影响。因此, 行波保护一经提出就受到了各国电力工作者的关注。

2 行波保护方法及其局限性

行波保护的研究可以追溯到上世纪 50 年代, 但直到 1976 年, 第 1 套行波保护装置才由瑞典通用电气公司研制成功, 并投入美国 Bonneville 电力局 500 kV 输电线路试运行; 同时, 日本东京电力公司基于 Takagi 等研发的行波差动继电器研制成功行波差动保护^[3-5], 其他国家也先后开始了行波保护的研究。

我国于 1978 年开始行波保护的研究^[6], 并于 80 年代初从瑞典引进 2 套 RALDA 型行波保护装置, 分别安装在东北 500 kV 电网(锦辽线)和华中电网(平武线)。70 年代末 80 年代初是行波保护研究的一个高潮, 这个阶段的理论研究和装置研制奠定了行波保护的基础, 也为今后的行波保护研究积累了重要的经验。但是, 由于行波本身的高频暂态性质、早期的保护原理缺陷以及数学工具、传感器方式和技术条件的限制, 该阶段所研制的保护装置性能不够稳定, 可靠性较差。

近几年, 随着高速数字处理技术, 小波分析技术和通讯技术的发展, 为行波保护研制提供了强大的硬件平台和软件支持, 早期的行波保护理论由于当时的技术条件限制而无法研制装置的情形大为改观。因此行波保护研究又重新受到了人们的关注。国内的研究主要有测距式行波距离保护^[7,8]、基于小波变换的行波保护^[9-14]、对雷电波与故障行波的识别^[15-17]等。国外的研究主要有基于行波和距离保护的混合保护方案^[18,19]等。

2.1 行波保护方法

行波保护按照有无通道分有通道保护和无通道保护两类。按照原理可分为: 行波差动保护; 行波方向判别式保护; 行波距离保护; 行波极性比较式方向保护和行波幅值比较式保护等几类。下面对目前国内外学者提出的几种主要行波保护原理作一简要介绍。

a. 行波差动保护^[3-5,12-14]

行波差动保护基本原理可用图 2 来说明: 由线路一端(M 端)出发的正向行波经延时 τ 后到达另一

端(N端), 正向行波的形状及大小是不变的。

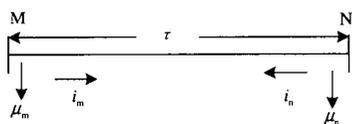


图2 输电线路及行波

Fig. 2 Travelling wave and transmission line

由行波波动方程可推导保护判据为

$$I = i_n(t) + i_m(t - \tau) - [u_n(t) - u_m(t - \tau)] / Z_c \quad (5)$$

式中: Z_c 为线路波阻抗, τ 为行波在 MN 之间的传播时间。如果 $|I| > \zeta$ (阈值), 则保护区内故障; 如果 $|I| < \zeta$, 则表示保护区内无故障。主要优点: 保护原理简单、明确; 在暂态和稳态条件下都能正确动作, 适用于长距离输电线路; 空载合闸时保护不会误动。主要缺点: 由于保护采用双端电气量, 因此对通道的要求高, 对两端时间要求也高, 且占用的频带较宽; 该原理保护没有考虑行波的衰减特性, 这在长距离高压输电系统中是不现实的; 另外, 雷电波等的干扰和母线接线方式的影响还有待进一步的研究。

b. 行波极性比较式方向保护^[6,20,21]

行波极性比较式方向保护又称为 RALDA 型保护, 其方向元件是一个极性比较继电器, 该保护通过检测故障电压和电流的峰值构成比较对象。基本原理: 比较故障初期行波电压和电流的相对极性来判别正向或反向故障。动作判据: 当初始电压、电流行波到达线路两侧的极性均相反时, 判断为正向故障; 而当线路两侧检测到的初始电压、电流行波的极性一个相同, 一个相反时, 判断为反向故障。

主要优点: 保护原理简单明了, 动作速度极快。主要缺点: 受外部故障和高次谐波的影响较大, 容易造成误动; 割裂了初始行波幅值和极性之间的联系; 外部故障后接着发生内部故障时, 保护将拒动; 受故障初始角和母线结构的影响。

c. 行波判别式方向保护^[1,23]

行波判别式方向保护又称为 TWD 保护。它的基本原理是: 根据行波行进方向来判定故障方向, 进而根据两端方向元件的动作结果来决定保护是否动作。该保护判据可表示为

$$F = (v - Zi)^2 + \frac{1}{\omega^2} \left(\frac{dv}{dt} - Z \frac{di}{dt} \right)^2 \quad (6)$$

若行波来自线路方向, 则 $F > 0$; 若来自母线背后, 则 $F = 0$ 。

主要优点: 动作速度快; 有明确的方向性, 与故障位置、初相位、类型无关。主要缺点: v 和 i 是

瞬时值, 其计算点数的选择对 F 值影响较大; 由于微分运算的固有特性, 对噪声非常敏感, 各种干扰的存在和测量仪器的误差, 将使正常运行的输电线路有很大的 F 值, 造成保护误动; 转换性故障会出现不正确动作; 不适用于单电源和 PT 挂在线路的情况。

d. 行波电流极性比较式方向保护^[9,22]

其基本原理是比较线路两端初始电流行波的极性。若两端初始电流行波的极性相同, 则判断为区内故障; 若极性相反, 则判断为区外故障。它没有单独的方向元件, 构成简单, 不需要获取电压行波。但是, 在电压过零点附近发生故障, 电流行波信号非常弱, 对电流行波的提取会遇到一定的困难; 受母线结构的影响; 另外, 该保护对通道的依赖性强, 可靠性有待提高。

e. 行波距离保护^[7,8,24,25]

行波距离保护根据行波反射原理构成, 其公式为

$$X = \frac{1}{2}(t_2 - t_1)v \quad (7)$$

式中: v 为波速度; t_1, t_2 分别为初始行波和故障点第一次反射行波到达保护安装点的时间; X 为故障点到保护安装处的距离。它的优点是仅使用单端量, 容易实现, 动作速度极快。主要问题有: ①受被保护线路两端母线的结构影响大, 甚至与它们所连接的其它线路及其末端母线的结构都会严重影响距离继电器的测量结果; ②该保护对硬件要求高, 采样频率和运算速度直接决定了保护范围; ③阈值不易设定, 不能保护线路的全长; ④无方向性, 传统的行波距离保护主要利用了行波的时间特征。

f. 行波幅值比较式方向保护^[25~27]

该保护的核心元件是方向继电器。它比较反向行波 S_1 和正向行波 S_2 的幅值, 然后利用通道传递比较的结果。若 $|S_1| \geq |S_2|$, 则为正向故障; $|S_2| > |S_1|$ 为反向故障。同极性比较式保护一样, 它只需利用通道向对端传输判断结果, 而不像行波差动和行波判别式保护那样需要传输两端的电气量。

幅值比较式保护的优点是原理清晰。缺点是阈值的设置不易把握; 受母线结构、接地电阻、故障初始角的影响; 对通道的依赖性强。

g. 混合保护方案

文献[18,19]所提混合保护方案是由传统的阻抗测量继电器 (IR) 和行波保护继电器 (TWR) 组成。其工作过程是两个继电器同时并行计算。采样装置

高频采样, TWR 利用高频行波信号, 计算故障距离; IR 继电器利用其中的工频分量也计算故障距离。若出现下列任何一种情况, TWR 继电器禁止触发: ①由于没有出现陡峭的行波波头(故障初始角为零), 故障监测器不能监测到一个故障扰动; ②波头分析仪计算得到一个小的故障初始角; ③计算得到的故障距离超出了保护区; ④相关性输出值没有明显地高出设定阈值。在上述情形下由 IR 继电器计算结果决定是否触发。除此之外由 TWR 继电器决定触发。

混合保护方案的优点是: 提高了保护的可靠性; 不受故障初始角、近端故障的影响; 行波保护和距离保护两种保护原理取长补短。缺点是保护原理复杂, 对软硬件都有比较高的要求, 实现难度大。

2.2 行波保护的局限性

行波保护从诞生起, 虽有几十年的研究历史, 但在实践中, 未能成为具有标志性的新一代保护, 其主要原因除原理上存在可靠性问题外, 在技术实现上也存在难度。主要体现在:

a. 行波信号不确定性的影响

行波保护仅仅监测和识别故障初始几个毫秒内的波形特征, 而电压、电流行波波头的形状和极性又与线路两端的波阻抗的变化情况(即母线结构)有关, 其幅值与故障发生时刻(即故障初始角)密切相关。这是导致行波保护可靠性差的主要原因。另外, 线路的并联补偿或/和串联补偿设备、开关的操作及雷电的冲击等都会影响到行波信号的识别。

b. 行波衰减和畸变的影响

三相线路的行波保护一般采用相模变化技术进行解耦处理。为了简化问题, 通常不考虑线路的依频特性、线路结构的不对称性以及接地电导的可变性, 相应的模变换矩阵为标准模变换矩阵。实际上, 线路参数的依频特性将导致暂态行波传播过程中的频散现象(frequency dispersion), 即暂态行波中的不同频率分量具有不同的传播速度和衰减系数, 其中地模暂态行波比线模暂态行波的频散现象更为严重。另外, 单相接地故障引起的线路结构不对称性使得线模和地模之间产生混叠现象, 而接地电导的可变特性则对单相接地故障时的所有模量都将产生较大的影响。总的说来, 无论地模还是线模暂态行波分量, 其波形在传播过程中都将发生畸变, 而地模行波波形的畸变更为严重^[28]。这将影响到行波保护(尤其是行波距离保护)的准确性。

c. 暂态行波信号传变的影响

暂态行波所覆盖的频带很宽, 从几千赫兹到几百千赫兹。为了能够从二次侧观察到线路上的暂态

行波现象, 要求电压、电流信号变换回路要有足够快的响应速度。研究表明, 常规的电流互感器能够传变高达 100 kHz 的电流暂态分量^[29], 但是常规的电容式电压互感器(CVT)由于截至频率太低^[30], 不能满足高频电压信号的传变。上述技术上的要求在以前是很难达到的。

d. 数字仿真与系统实际运行的差异

迄今为止, 除了 70 年代末 80 年代初国外推出几种行波保护装置, 且不可靠外, 对行波保护的研究主要集中在保护原理分析和数字仿真验证两个方面。虽然理论分析和仿真验证说明行波保护比常规基于工频量的保护具有更快的速度且不受系统振荡、CT 饱和、过渡电阻等的影响, 但所有的行波保护原理都未经受电网实际数据的检验。实际上, 电网会时时刻刻遭受各种干扰, 运行数据也会千变万化。而数字仿真是一种理想化的工具, 即使人为施加干扰, 也是一种理想的干扰。因此, 数字仿真和电网实际运行还有一定的差异。所以, 行波保护装置的研究还要加以时日。

3 解决目前行波保护存在问题的措施

由上面的分析可发现, 从故障暂态分量中准确、充分地提取行波信息是行波保护实现的前提, 而只有对暂态信号在时域和频域内同时进行分析和刻画才能充分地利用这些信息。针对目前行波保护所遇到的困难, 提出如下措施:

a. 暂态行波信号的提取

传统的电流互感器能够传变高频暂态信号, 而电容式电压互感器却不能传变高频暂态信号。为此, 国内外许多学者进行了相关的研究。主要解决办法是采用专门设计的暂态信号耦合器, 可以直接或间接地反映线路末端的高频电压信号^[31,33]。分析表明, 直接采集电流互感器二次侧电流信号比通过各种耦合设备采集电压或电流暂态信号更具优越性。当然, 如果能够同时采集电流信号和来自各种附加耦合设备的电压或电流暂态信号, 则在保护原理上无疑是最完备的。

随着光学电流互感器(OCT)^[34]和光学电压互感器(OVT)^[35]的研究及应用, 暂态信号的提取将会变得更加容易。

b. 相关领域技术的应用

近几年, 行波保护再次受到重视, 其中一个重要原因就是相关领域技术的迅速发展。这些技术包括现代微电子技术、全球定位系统(GPS)技术、现代通信技术和现代数字处理技术(DSP)等。

现代微电子技术使得行波保护中对于电压和

电流暂态信号的高速采集和存储成为可能, 进而为行波保护(尤其是无通道行波保护)技术的实现提供了物质基础。GPS 技术为新型继电保护提供了高精度同步时钟。现代通信技术的应用为行波保护(尤其是有通道保护)的研制奠定了高速通讯基础。而 DSP 技术的应用则促进了各种实时高性能行波保护算法的发展。

c. 小波变换技术的应用

20 世纪 90 年代以来, 一种新的现代信号数字处理算法—小波变换法在工程领域获得了广泛的应用。作为时频分析工具的小波变换可以分别对暂态信号的时间特征和频率特征进行描述。各种行波保护原理其本质都是基于监测和识别故障产生的暂态分量波形, 因此对利用高频暂态行波信号构成选择性且具有较高可靠性的保护原理, 必须从时域和频域两个方面对信号进行分析和识别。从这一点而言, 小波的多尺度监测理论比传统的时域(相关法)和频域(傅立叶法)分析方法更能全面表达暂态信号的故障特征。同时, 高速数据采集技术的发展为小波分析应用于行波保护提供了保障。

d. 接受电网实际运行数据的验证

对行波保护原理的研究既要采用大量的数字仿真验证, 更重要的是采集电网实际运行数据, 以考察行波保护的各项技术指标。为此, 有必要将高频暂态录波装置挂网运行, 采集实际数据, 包括正常运行数据和开关操作、雷电冲击等各种干扰数据, 以此来验证保护原理的正确性。

4 展望

随着科学技术的不断进步, 特别是小波变换的出现、DSP 技术的成熟、光纤通信和光互感器的广泛应用。具有超高速动作性能的现代行波保护研究的新高潮必将到来。目前, 国内外众多高校、科研单位和制造厂家已经投入巨大的人力、财力进行这个领域的研究工作, 并已取得了阶段性研究成果。可以预计: 新型行波保护装置不久将在高压输电线路获得应用。

参考文献

- [1] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.
GE Yao-zhong. New Types of Protection Relaying and Fault Location: Theory and Techniques[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1996.
- [2] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
ZHU Sheng-shi. Protection Theory and Techniques for High Tension Networks[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995.
- [3] Takagi T, Baba T, Uemura K, et al. Fault Protection Based on Travelling Wave Theory: Part 1 Theory[A]. In: IEEE PES Summer Meeting[C]. Mexico City: 1977.
- [4] Takagi T, Baba T, Uemura K, et al. Fault Protection Based on Travelling Wave Theory: Part 2 Sensitivity Analysis and Laboratory Test[A]. In: IEEE PES Winter Meeting[C]. New York: 1978.
- [5] Crossley P A, Maclaren P G. Feasibility Study for a Current Differential Carrier Relay System Based on Travelling Theory[A]. In: IEE Conference Publication No.302 Developments in Power System Protection[C]. London: 1989.
- [6] 田又涵. 极性比较式行波方向保护的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 1981.
TIAN You-han. Study of Directional Protection Based on Polarity Comparison of Travelling Wave[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1981.
- [7] 葛耀中, 董新洲, 董杏丽. 测距式行波保护的研究(一)—理论与实现技术[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(6): 34-40.
GE Yao-zhong, DONG Xin-zhou, DONG Xing-li. Travelling Wave-Based Distance Protection with Fault Location——Part One, Theory and Technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(6): 34-40.
- [8] 葛耀中, 董新洲, 董杏丽. 测距式行波保护的研究(二)—原理方案与仿真试验[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(9): 53-58.
GE Yao-zhong, DONG Xin-zhou, DONG Xing-li. Travelling Wave-Based Distance Protection with Fault Location—Part Two Scheme and Simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(9): 53-58.
- [9] 张举, 张晓东, 林涛. 基于小波变换的行波电流极性比较式方向保护[J]. 电网技术, 2004, 28(4): 51-54.
ZHANG Ju, ZHANG Xiao-dong, LIN Tao. A Directional Protection Based on Travelling Wave Current Polarity Comparison Using Wavelet Transform [J]. Power System Technology, 2004, 28(4):51-54.
- [10] 董杏丽, 葛耀中, 董新洲. 基于小波变换的无通道全线速动行波保护[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(10): 18-22.
DONG Xing-li, GE Yao-zhong, DONG Xin-zhou. A Wavelet and Travelling Wave Based Non-communication High Speed Transmission Line Protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(10):18-22.
- [11] 董杏丽, 葛耀中, 董新洲. 基于小波变换的比率式行波方向继电器的研究[J]. 西安交通大学学报, 2002,

- 36 (8): 771-775.
DONG Xing-li, GE Yao-zhong, DONG Xin-zhou. Study of Ration Directional Relay Based on Travelling Waves and Wavelet Transform [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2002, 36(8):771-775.
- [12] 苏斌, 董新洲, 孙元章. 串联电容补偿线路行波差动保护研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45 (1): 137-140.
SU Bin, DONG Xin-zhou, SUN Yuan-zhang. Travelling Wave Differential Relay for a Series Compensated Transmission Line [J]. Journal of Tsinghua Univ(Sci & Tech), 2005,45(1): 137-140.
- [13] 苏斌, 董新洲, 孙元章. 特高压带并联电抗器线路的行波差动保护[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (23): 41-44,70.
SU Bin, DONG Xin-zhou, SUN Yuan-zhang. Travelling Wave Differential Protection on UHV Transmission Line with Shunt Reactor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(23): 41-44,70.
- [14] 苏斌, 董新洲, 孙元章. 基于小波变换的行波差动保护[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (18): 25-29, 35.
SU Bin, DONG Xin-zhou, SUN Yuan-zhang. Travelling Wave Differential Protection Based on Wavelet Transform [J].Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(18): 25-29, 35.
- [15] 段建东, 张保会, 郝治国, 等. 超高压线路暂态保护中雷电干扰与短路故障的识别[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(18): 30-35.
DUAN Jian-dong, ZHANG Bao-hui, HAO Zhi-guo, et al. Identification of Lightning and Fault in UHV Transmission Line Transient-based Protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(18): 30-35.
- [16] 董杏丽, 葛耀中, 董新洲. 行波保护中雷电干扰问题的对策[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9): 74-78.
DONG Xing-li, GE Yao-zhong, DONG Xin-zhou. Effect of Lightning on Protection Based on Travelling Wave[J]. Proceedings of CSEE, 2002, 22(9):74-78.
- [17] 段建东, 任晋峰, 张保会, 等. 超高速保护中雷电干扰识别的暂态法研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(23): 7-13.
DUAN Jian-dong, REN Jin-feng, ZHANG Bao-hui, et al. Study of Transient Approach of Discriminating of Lightning Disturbance in Ultra-high-speed Protection [J]. Proceedings of CSEE, 2006, 26(23):7-13.
- [18] Pathirana V, Dirks E, McLaren P G. Using Impedance Measurement to Improve the Reliability of Travelling-wave Distance Protection[A]. In:Proc IEEE Power Engineering Society General Meeting[C]. Toronto: (Canada):2003.
- [19] Pathirana V, McLaren P G. A Hybrid Algorithm for High Speed Transmission Line Protection[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(4):2422-2427.
- [20] Chamia M, liberman S. Ultra High Speed Relay for EHV/UHV Transmission Lines—Development, Design and Application[J]. IEEE Trans on PAS, 1978, 97(6): 2104-2116.
- [21] 董杏丽, 董新洲, 等. 基于小波变换的行波极性比较式方向保护原理研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(14): 11-15.
DONG Xing-li, DONG Xin-zhou, et al. Directional Protective Relaying Based on Polarity Comparison of Travelling Wave by Using Wavelet Transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(14): 11-15.
- [22] Bo Z Q, Jhons A T, Aggarwal R K. A New Approach to Transmission Protection Using Fault Generated High Frequency Current Signals[A]. In:Proceedings of the 12th Power Systems Computation Conference[C]. Dresden (Germany): 1996. 128-134.
- [23] Lanz O E, Engler F, Haenggli M, et al. LR91—An Ultra-High-Speed Directional Comparison Relay for Protection of High-Voltage Transmission Lines[J]. BBC Brown Bovril Reviews, 1985,72(1):32-36.
- [24] Crossley P A, McLaren P G. Distance Protection Based on Travelling Waves[J]. IEEE Trans on PAS, 1983,102(9): 2971-2983.
- [25] Desikachar K V, Singh L P. Digital Travelling-Wave Protection of Transmission Lines[J]. Electric Power Systems Research, 1984,7: 19-28.
- [26] Johns A T, Barker A, Martin M A, et al. Design and Engineering of a New Digital Direction Comparison Line Protection[A]. In: IEE Conference Publication Third International Conference on Developments in Power System Protection[C]. London:1985.
- [27] 董杏丽, 葛耀中, 董新洲, 等. 基于小波变换的行波幅值比较式方向保护[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(17):11-15,64
DONG Xing-li, GE Yao-zhong, DONG Xing-zhou, et al. Directional Protective Relaying Based on Amplitude Comparison of Travelling Wave by Using Wavelet Transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(17):11-15, 64.
- [28] 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, 2003.

- [8] 袁宇波, 李德佳, 陆于平, 等. 变压器和应涌流的物理机理及其对差动保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(6): 9-14.
YUAN Yu-bo, LI De-jia, LU Yu-ping et al. Physical Mechanism of Sympathetic Inrush of Transformer and Its Influence on Differential Protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(6): 9-14.
- [9] 张雪松, 何奔腾, 张建松. 变压器和应涌流的产生机理及其影响因素研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(6): 15-19.
ZHANG Xue-song, HE Ben-teng, ZHANG Jian-song. Principle and Influencing Factors of the Transformer Sympathetic Inrush[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(6): 15-19.
- [10] 王维俭. 发电机变压器继电保护应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
WANG Wei-jian. Application of Relay Protection on Generator and Transformer[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [11] 贺勋, 束洪春, 李立新. 变压器和应涌流现象分析及应对措施[J]. 电气应用, 2006, 25(4): 43-46, 96.
HE Xun, SHU Hong-chun, LI Li-xin. Analysis and Countermeasure of Sympathetic Inrush in Operating Transformers[J]. Electrotechnical Journal, 2006, 25(4): 43-46, 96.
- [12] 维铮. 变压器差动保护及和应涌流的研究(硕士学位论文)[D]. 浙江: 浙江大学, 2005.
LUO Zheng. Studies on Differential Protection and Sympathetic Inrush of Transformers, Thesis[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2005.
- [13] 李德佳, 毕大强, 王维俭. 由和应涌流导致变压器声音增大的分析和探究[A]. 全国电力主设备保护学术研讨会论文集[C]. 南京: 2004. 109-113.
LI De-jia, BI Da-qiang, WANG Wei-jian. Analysis That the Sympathetic Causes the Sound of the Voltage Transformer to Increase and Probing into[A]. In: Proceedings of Symposium on Main Equipment Protection in Power System in China[C]. Nanjing: 2004. 109-113.

收稿日期: 2007-04-27; 修回日期: 2007-07-08

作者简介:

毕大强(1973-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电气主设备继电保护研究; E-mail: bidaqiang@mail.tsinghua.edu.cn

孙叶(1982-), 女, 硕士研究生, 主要从事变压器继电保护研究;

李德佳(1964-), 男, 高级工程师, 主要从事继电保护的调试和运行。

(上接第6页 continued from page 6)

- [29] 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. Technique of Transient Traveling Wave Based Transmission Lines Fault Location, Doctoral Dissertation[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1991.
- [30] Sweetana A. Transient Response Characteristics of Capacitive Potential Devices[J]. IEEE Trans on PAS, 1970, 89(6): 1989-1997.
- [31] Agrawal P. An Investigation into a Method of Detecting the Fault Induced High Frequency Voltage Signals of EHV Transmission Lines for Protection Applications[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1991, 6(1): 119-126.
- [32] 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.
- [33] 曾祥君, 尹项根, 林福昌, 等. 基于行波传感器的输电线路故障定位方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 42-46.
ZENG Xiang-jun, YIN Xiang-gen, LIN Fu-chang, et al. Study on Fault Location for Transmission Lines Based on the Sensor of Travelling Wave[J]. Proceedings of CSEE, 2002, 22(6): 42-46.
- [34] 刘晔, 王采堂, 等. 电力系统适应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, 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.
- [35] 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.

收稿日期: 2007-04-25

作者简介:

邹贵彬(1971-), 男, 讲师, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护和系统模拟仿真的教学和研究工作; E-mail: guibinzou@yahoo.com.cn

高厚磊(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统继电保护和广域测量的教学和研究工作。