

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.05.008

输电线路故障行波保护综述

李泽文¹, 唐迪¹, 夏翊翔¹, 彭维馨¹, 汪东²

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114;

2. 长沙汽车工业学校, 湖南 长沙 410117)

摘要:输电线路行波保护利用故障产生的行波快速识别故障,具有超高速动作性能,且不受电力系统振荡、过渡电阻、分布电容电流和电流互感器饱和等因素的影响,是理想的超特高压线路继电保护方式。文中首先回顾了行波保护的发展历程,从行波信号的提取、信号处理技术的发展和工程实践三方面总结了国内外的研究现状;其次介绍了主要行波保护的基本原理,分析了各类行波保护原理的优缺点,总结了相关理论研究的进展情况,并针对各类行波保护原理进行了横向比较及其适用场景分析;然后探讨了行波保护技术实用化需要解决的主要问题,并提出了相应的解决方案;最后展望了行波保护的发展趋势,为后续行波保护技术的研究提供参考。

关键词:输电线路;行波保护;保护原理;故障;超高速保护

中图分类号:TM77

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2020)05-0049-10

0 引言

电力系统的快速发展带动高压输电线路得到广泛的应用,特别是在推进和建设智能电网和能源互联网以及确保电力系统安全稳定运行上,继电保护起着事关全局的作用。行波保护作为输电线路故障的主保护,具有超高速动作性能,且不受电力系统振荡、过渡电阻、电流互感器饱和等因素的影响。行波保护是特高压输电线路理想的继电保护方式,也是国内外的研究热点。

文中回顾了行波保护在国内外的的发展史并从行波信号的提取、信号处理技术的发展和工程实践三方面介绍了国内外的研究现状;接着介绍了行波距离保护、行波差动保护和行波方向保护等保护原理和特点,总结了其进展情况和适用场景;然后基于当前行波保护实用化发展总结了待解决的问题,并提出了针对现有问题的解决方案;最后展望了行波保护的未來研究方向。

1 行波保护的发展进程和研究现状

在20世纪50年代,行波保护一经提出就受到国内外学者的一致关注,学者们开始研究利用故障时的暂态特征构成保护,同时早期的行波保护装置也开始运行,直到1976年,瑞典通用电气公司成功研制出第一台行波保护装置,并在美国500 kV输电线路投入试运行。日本学者Takagi于1977年提出行波差动保护原理,日本东京电力公司成功研制

出基于电流差动保护原理的微机保护装置并投入运行;之后Chamia提出了基于电压电流行波极性比较的方向保护原理。自20世纪80年代起,国内外专家学者又提出了许多行波保护新原理。其中,Dommel和Michels提出了行波方向判别保护原理;瑞士的ABB公司基于行波判别式方向保护原理,成功研制出超高速保护装置;P.A.Crossley等人根据相关算法提出行波距离保护原理;K.S.Prakash提出了基于幅度比较式行波方向保护原理;A.T.Johns和Z.Q.Bo等人提出了一种基于故障高频噪声的单端行波保护原理。这些保护方法原理虽然简单,但为行波保护的发展奠定了良好基础,为新型行波保护装置的研制创造了良好条件。

我国从20世纪70年代开始对行波保护技术和装置进行研究,先后在东北电网和华中电网引进了2套RALDA行波保护装置,分别安装在东北锦辽线和华中平武线。随着数字信号处理技术和暂态信号软件分析方法的发展,基于数字技术的行波保护算法,如相关法、最大相似法、波形识别法等得到了广泛的应用。清华大学董新洲教授等提出基于小波分析的行波保护判据,研制了波阻抗方向继电器^[1],同时分析了极化电流行波方向继电器并提出了基于该继电器的行波方向比较式纵联保护原理,该方法简单且动作速度极快,但依赖于方向元件的性能,需要通过方向元件来判断故障方向进而传送相应的通道信号^[2]。西安交通大学张保会教授等对暂态传变特性进行深入研究,提出一种边界保护方法,该方法通过比较不同频段暂态信号的频谱能量特性以判断区域内的故障,只需单端行波信息

收稿日期:2020-03-15;修回日期:2020-04-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877012)

且实现简单,但可靠性仍受总线结构的影响,暂态行波的可靠性不高^[3]。西南交通大学何正友教授等提出了一种基于故障行波固有频率的保护方案,该方法避免了行波波头辨识困难的难题,但其可靠性仍受系统等效阻抗等因素的提取和识别的影响,还受到母线结构的很大影响^[4];同时通过 S 变换能量相对熵来描述故障电压与故障电流之间的极性关系,提出了行波极性比较式纵联保护,该方法仅利用电流量,构成简单,但需要传送行波电流的正、负 2 个极性,通信部分较为复杂,占用频带较宽^[5]。长沙理工大学曾祥君教授等提出了利用广域行波信息进行线路保护的思想,大大提高了行波保护的可靠性,可作为行波后备保护,并采用网络初始行波波头极性和到达时间的行波保护原理,实现全网线路快速保护,但其受通信系统和整个网络时间同步性能的影响较大,存在初始行波的识别问题^[6]。西安交通大学索南加乐教授等提出了基于参数识别的保护原理,通过分析被保护元件区内外故障特征,分别建立合理简化的区内外故障模型,通过比较模型差别来判别区内外故障,但模型的准确性影响了保护的可靠性,故障模型的保护范围有限^[7]。

20 世纪 90 年代以来,现代行波保护技术的发展主要体现为大量理论技术的出现与应用,其中还包括新型行波保护装置的研发与推广。文中将从以下三方面论述行波保护的研究现状。

1.1 行波信号的提取

行波信号具有频带宽、覆盖范围广、系统运行信息丰富等特点。相对较快的对应速率将决定行波信号提取的精度。工程研究表明,传统的电容式电压互感器(capacitor voltage transformer, CVT)传输高频行波信号的性能不好,这些原理不能应用于现场,同时截止频率低,不能满足行波保护的要求。而针对电流互感器的研究表明,电流互感器具有高频响应特性,可传输 100 kHz 以上的高频电流行波信号,满足瞬态行波测距的要求,但目前波形仍存在一次侧和二次侧的差异问题^[8]。

以上主要讨论的是基于电流行波保护的方法,国内外学者在电压行波的研究过程中也取得了一些成果。文献[9—10]从波过程理论出发,对变压器内部的电磁暂态过程进行了深入分析,结果表明电压互感器能无延迟地传输行波信号和极性。文献[11—12]通过数字仿真和现场试验,验证了 CVT 二次信号用于行波测距的可行性和适用性。文献[13]采用常规 CVT 二次电压行波的方法,接线简单,行波提取准确,还弥补了电流行波保护的不足。

文献[14]根据 Rogowski 线圈的工作原理,研究了从电压型行波传感器中提取行波信号的检测方法,有效地传输了行波信号,解决了传输特性的一致性和抗干扰问题。经过进一步的研究和开发,从研制出专用行波测量设备发展到行波装置的实际应用。例如,文献[15]研制了配电线路单相接地故障行波保护装置;文献[16]基于 Rogowski 线圈的原理,研制出了穿芯式行波传感器。

1.2 信号处理技术的发展

随着行波保护技术的发展,国内外学者进行了大量的研究,将各种信号处理方法引入到输电线路保护中,包括小波变换、Hilbert-Huang 变换(Hilbert-Huang transform, HHT)、数学形态学和神经网络等方法。由于小波变换具有较好的时频特性,在行波波头提取中具有很大的优势,但应用需要考虑小波基的选择和时频分解尺度的合理选择,如文献[17]利用小波变换方法提取故障行波特征,提出一种多重采样方法。HHT 是一种具有完全自适应的适合分析非平稳非线性信号分析方法,但在波头信息提取过程中存在模态混叠等问题,会导致出现误差。文献[18]利用 HHT 得到行波信号的能量谱,通过区内外故障的两端行波波头的能量谱差异来构造行波保护。数学形态学理论的应用更为广泛,因为其具有描述非平稳信号和分析行波故障数据的能力,引起了许多研究者的兴趣。文献[19]提出了一种利用数学形态学滤波器同时检测突变时间和突变极性的双端信号故障定位方案。另外,神经网络分析方法具有较强的数据分析能力和适应性,文献[20]利用人工神经网络识别第二波头特性以应用于单端行波测距。

1.3 工程实践

近年来,随着行波信号提取技术的不断提高和信号处理技术的不断发展,行波保护在高压直流输电线路中得到了广泛的应用。目前在实际高压直流线路工程中,国内外普遍采用的行波保护主要采用 ABB 和 SIEMENS 的单端量行波保护原理,但 2 种保护方法的耐过渡电阻能力和抗噪声干扰能力较弱,随着电压源换流器技术的引入,柔性直流输电技术的相关理论不断完善,且相关工程已投入运行。针对直流线路行波保护灵敏度不足的问题,国内外学者对直流线路暂态量保护原理进行了研究。文献[21]针对输电线路具有距离长、分布电容大的特点,在继电器背侧母线波阻抗的基础上,提出了一种基于 S 变换的以双阻抗圆方向为判据辨别故障方向的新型波阻抗方向继电器。文献[22]对极化

电流行波方向继电器在串补线路应用中所存在的问题进行了分析,通过研究 CVT 的频率特性进行了改进。

目前研究中,一般只考虑纯架空线路和电缆线路,很少涉及线缆混合线路,而随着线缆混合线路的应用日益广泛,研究针对混合线路的行波保护方法也具有重要的现实意义。文献[23]分析了混合直流输电线路故障特性,研究了双树复小波变换在混合直流输电线路保护中的应用。

此外,高压交流输电一直是我国远距离输电的重要方式,距离保护等在交流输电线路得到广泛的应用,小波变换等信号处理技术也被引入到交流输电线路中,近年来基于高频行波分量的行波保护在超高特高压交流输电线路保护中得到了成功的应用^[2],但行波保护装置在交流输电线路未推广应用。因此,行波保护技术在电网故障识别和检测中的应用还有待进一步发展和完善。

2 行波保护的主要原理

当输电线路发生故障时,故障点产生的行波信号沿输电线路传输到线路两端甚至整个电网,这些行波信号利用故障时刻传输的电流和电压行波,形成超高速线路保护,即行波保护。根据通道的存在,现有输电线路行波保护可分为通道保护和非通道保护,主要包括行波距离保护、行波差动保护和行波方向保护等。

2.1 行波距离保护

行波距离保护基于行波理论,利用行波特性,通过比较行波测距得到的故障距离和被保护线路长度来判断故障发生在区内还是区外,从而判断保护是否动作。图 1 为其原理示意图。

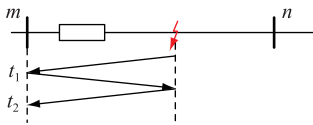


图 1 行波距离保护原理

Fig.1 Principle of traveling wave distance protection

图 1 中 m 侧发生正方向故障时,保护安装处测得第一次故障行波的时刻为 t_1 ,故障行波经过母线处反射,至故障点再次发生反射,该反射波到达保护安装处的时刻为 t_2 , v 为行波传播的速度,则故障距离 D 为:

$$D = v(t_2 - t_1)/2 \quad (1)$$

行波距离保护只用单端量且不需要通信,可以通过单终端信息来实现,实现简单,动作速度极快,具有保护和测距双重功能。但其原理受母线结构

的影响较大,无法对线路全长进行保护;对硬件要求高,无方向性,保护算法不完善,保护不易整定,常出现误动;第二波浪涌是故障点还是对端母线的反射波不易区分。

为了在一定程度上提高行波距离保护的性能,提出了小波变换等方法^[24]。文献[25]提出一种准确识别行波距离保护中第二反射波特性的方法,提高了行波距离保护测距的精度。目前行波测距主要受波头到达时间精度和波速合理选择的影响。文献[26]基于故障点初始电压行波、故障点电压反射波和母线电压反射波,推导了一种不受波速影响的输电线路单端故障行波定位方法,提高了距离保护的抗干扰能力和故障定位性能。

2.2 行波差动保护

行波差动保护原理基于贝瑞隆模型,采用工频相量保护判据,其主要思想是将输电线路两端行波的波形信息或极性信息相互传递,然后对输电线路两端行波的极性信息进行比较,确定故障是发生在输电线路还是发生在输电线路外。

如图 2 所示,某条理想无损的输电线路,正向行波由线路的 m 端向线路的 n 端传输,传播至 m, n 两端的行波幅值差如下:

$$i_j^+(t) = |i_m^+(t - \tau) - i_n^+(t)| \quad (2)$$

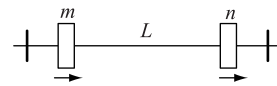


图 2 单相无损输电线路

Fig.2 Single-phase lossless transmission line

式中: $i_m^+(t)$, $i_n^+(t)$ 分别为 m 端和 n 端检测到的电流正向行波; τ 为时间窗;电流正方向设置为母线流向线路。式(2)为差动保护判据:当 $i_j^+(t) = 0$,判为区外故障;当 $i_j^+(t) \neq 0$,判为区内故障。

行波差动保护能在暂态和稳态条件下正确动作,空载合闸时保护不会误动作。但由于双端电量和发射波形的要求,对通信信道和两端同步时间的要求较高,占用频带较宽,受初始相位的影响较大。且保护中没有考虑行波衰减特性,雷电波的干扰及母线接线的影响有待进一步研究。

文献[27]根据特高压半波长交流输电线路的时空特性,提出基于自由波能量的单端保护算法和基于补偿算法的电流差动保护算法。文献[28]指出采用工频分量可有效避免线路频率变化参数的影响,并能识别出区域内的故障。对于半波长传输线,应采用行波差动电流的工频分量构成保护,从而有效避免区内外故障。文献[29]基于行波方程,提出一种实用的电流差动保护方案,通过选择

特殊的同步点数据,提高差动保护在区外故障时的运行速度和可靠性。文献[30]基于宽频带且短时窗的故障行波信息,提出一种适用于超/特高压输电线路且快速可靠的行波差动保护新方法。以上对行波差动保护的研究大多集中在交流线路上,而对直流线路的研究较少。同时,分布电容电流对行波差动保护的影响较小,因此行波差动保护在直流保护中具有较好的应用前景。

2.3 行波方向保护

行波方向保护依靠方向继电器判断故障发生在输电线路区内或区外。其基本原理是比较电压、电流行波的极性或幅值,根据比较结果判断故障位置是否位于保护装置的正方向。如果将线路两端的保护装置判断为正向故障,则最终确定直流输电线路存在故障,否则认为故障不在直流线路上。

规定行波电流的正方向为由母线指向线路。如图3所示,当线路内部发生故障时,故障行波从故障点 F 向线路两端传播,保护安装处测得的反向电压行波为故障行波的入射波,正向电压行波为故障行波在母线上反射后的反射波。可以得到:故障行波在 m 侧与 n 侧与规定的正方向都相反,均为负极性,所以两端的极性相同。

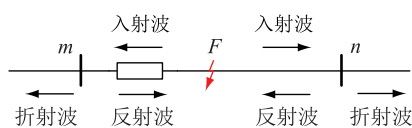


图3 线路内部故障时的正向和反向电压行波
Fig.3 Forward and reverse voltage traveling waves when faults in the internal line

线路外部发生故障时,如图4所示,故障行波从故障点 F 先到达 m 侧,与 m 侧规定的正方向相反,为负极性;之后继续向 n 侧传播,与 n 侧规定的正方向相同,为正极性。 m 侧为负极性, n 为正极性,所以两端的极性不同。

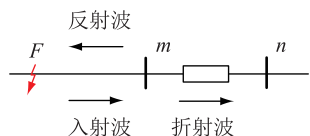


图4 线路外部故障时的正向和反向电压行波
Fig.4 Forward and reverse voltage traveling waves when faults in the external line

行波方向保护主要利用初始行波的极性、幅值等信息构成判据,通过两端极性的差异判断故障位置。根据行波方向保护或方向元件的原理,主要分为4类:行波判别式方向保护、行波幅值比较式方向保护、行波极性比较式方向保护和行波电流极性比

较式方向保护。

行波判别式方向保护根据正、反向方向继电器动作顺序来判断故障方向,进而根据两端方向元件的动作结果判断保护是否动作。如果正向行波继电器先动作,反向行波继电器后动作,为正方向故障;否则,为反方向故障。行波判别式方向保护动作速度快、与故障位置等无关,具有灵敏的方向性,但对噪声敏感,容易误启动^[31]。

行波幅值比较式方向保护通过比较正、反向行波的幅值关系来判别故障方向。文献[32]对传统的行波幅值比较式方向保护方法进行了改进,针对故障发生后正向与反向行波幅值积分的比值来确定故障方向,提出了一种新型暂态行波幅值比较的方向保护方案,其性能基本不受故障电阻等影响,且保护原理简单明了。然而,行波幅值比较式方向保护的阈值设置并不容易掌握。初始正向和反向行波信号受母线结构、接地电阻和初始故障角的影响,且对通道有很强的依赖性。

行波极性比较式方向保护利用行波分量到达线路两端的瞬时极性判断故障方向。当极性相同时,判为区内故障;当极性相反时,判为区外故障。文献[33]针对电压波形易受平波电抗器和直流滤波器的影响和方向行波变化率易受过渡电阻的影响,提出了不受过渡电阻影响的基于相模变换的行波极性比较式方向保护,能够在区内高阻接地故障时可靠动作。但行波极性比较方向保护易受外部故障和高次谐波的影响,容易引起误动;隔裂了初始行波的幅值和极性关系;当外部故障后连着发生内部故障时,保护拒动;受故障初始角和母线结构影响,且对通道有很强的依赖性。

行波电流极性比较式方向保护根据线路两端行波电流的相对极性判断故障。文献[34]分析了直流输电线路行波保护存在的主要问题,提出了基于数学形态学改进的直流输电线路电流极性比较式方向保护方案,能可靠区分区内外故障,且实时性好、速度快、时延小。但行波电流极性比较式方向保护对通道的依赖性强,易受初始角等影响。文献[35]提出了一种基于故障电流前、后行波初始波头时差的柔性直流输电纵联方向保护,利用多孔算法识别出故障行波的初始波头,并利用前行波和反行波的初始波头的时间差来区分内外部故障。

2.4 行波边界保护

当输电线路发生故障时,故障行波引起线路边界波阻抗变化,导致故障前后电量的故障特征差异。利用这种差异来实现超高速动作的保护称为

边界保护,亦称噪声保护。

边界保护的核心思想是,由于变电站内母线对地电容的存在,当保护区内外发生故障时,继电器测得的行波频率成分不同。区内故障时,测得的行波包含高频分量和低频分量;区外故障时,高频分量被母线电容短接,测得的行波仅包含低频分量。在此基础上,可以有效判断故障发生的时间间隔。由于电抗器和滤波器具有通高频阻低频的特性,其又构成了线路边界。除了线路边界带来的高频分量在频域的故障特性差异外,还进一步利用了时域波形奇异性的差异。在早期的保护技术和原理中,边界保护得到了广泛的应用,文献[36]利用单端暂态信号研制了一种适用于边界保护单端保护装置。正是因为直流线路存在由平波电抗器和直流滤波器构成的区内外故障特征差异明显的线路边界,边界保护在直流线路的研究中取得了很大进展^[37]。

行波边界保护可实现单端全线速动,不依赖通信通道,投资小,保护方案和装置相对简单。但不能保护整条线路,受系统运行方式的影响大,动作速度不够快;整定仍缺乏强有力的理论依据和完善的系统整定原则;故障初始角对保护灵敏度影响很大。

边界保护在特高压直流输电线路中的应用发展迅速,但交流输电线路的边界构成和特性需进一步研究,其具有良好的工程应用前景。

2.5 广域行波保护

近年来,随着广域行波信息采集技术和高精度同步时钟技术的飞速发展,广域行波保护的概念被提出。其利用广域测量信息和多点故障信息识别故障来准确判断故障分量,进而快速切除故障,可对整个广域网的所有初始行波到达时间和行波极性提供全面的线路保护,实现区域电网全线保护。

电网故障时,广域行波保护利用初始行波的极性信息来确定行波故障区域,然后融合故障区域的初始行波时间信息来判定故障线路。当电网拓扑结构发生变化时,只需在原有保护区域的基础上进行局部修改,就可提高广域行波保护的自适应能力。文献[38]基于行波在电网中传输特性,提出了一种新的基于整个电网故障行波网络定位方法,利用整个电网的信息来计算故障距离。文献[39]基于相模变换和小波变换得到的初始行波波前的监测点和到达时间,提出一种基于广域行波数据采集的复杂电网故障定位方法。文献[40]提出一种功率型的广域行波保护新方法,利用电网有限区域的多点初始行波无功功率信息实现集中决策。文献

[41]提出一种利用线模电压初始行波波头频率分量幅值比信息的输电网故障定位方法,该方法只需初始行波波头较低的频率分量幅值比信息,无需全网布置测量点和精确同步。

广域行波保护响应速度快、可靠性高、鲁棒性强,具有更多的保护判断信息,提高了行波保护的可靠性,但需要额外的通信通道,保护速度也受通信的影响。

广域行波保护不仅可以解决现有继电保护技术依靠附近信息采集的自适应能力差的问题,还可以解决误动风险大等实际问题,成为行波保护的又一重点研究对象。

2.6 行波保护的横向比较及其适用场景

针对上述行波保护的主要原理,补充各类行波保护的横向优劣比较及其适用场景。

(1) 横向比较。行波距离保护、行波差动保护和行波方向保护的原理简单,为行波保护的实用化奠定了坚实基础。但这些保护的原理依赖于行波波头的准确提取,在线路发生小初相角故障、高阻接地故障等弱故障或受到强干扰时,可靠性不高,易受电网结构的影响。边界保护方法只需要单端的行波信息,且易于实现,克服了行波保护需要精确捕捉行波波头的缺陷。但其可靠性仍受母线结构的影响,难以区别系统操作、雷电、谐波干扰等影响产生的行波与故障产生的暂态行波,可靠性不高,实用性不强。广域行波保护方法无需求解具体的元件参数,保护灵敏度高。但该方法需要线路的准确模型,模型的精确性影响保护的可靠性,且故障模型的适用频带有限,因此保护范围有限,实用性不强。

(2) 适用场景。由于测距算法不可避免地存在测距误差,行波距离保护不能区分线路区内末端和区外近端故障,因此不能保护线路全长,只能与其他保护原理配合使用。关于行波差动保护的研究大多基于交流线路,适用于远距离输电线路,在直流保护上应用较少,同时在原理上,分布电容电流对行波差动保护影响小,因此行波差动保护在直流保护上有较好的应用前景。行波差动保护充分利用电力线路上行波传输不变性,可以应用于任意长度、电压等级和输电形式的线路,也可利用稳态行波信息构成后备保护。行波方向保护可作为直流线路主保护的有益补充,在通信通道及其他硬件满足要求的前提下,可作为超高速保护应用于实际中。边界保护具有良好的选择性,理论上可以作为直流线路的主保护,但现有研究一般只考虑了线路

边界的频率特性,并未考虑线路对于不同频率信号的衰减特性,故需开发适用于边界保护的单端量保护装置。广域行波保护能够实现区域电网的全线保护,适用于其他保护难以检测到且对动作速度要求不高的高阻接地故障检测。

3 行波保护实用化面临的主要问题

随着行波装置在实践中的应用和信号处理技术的发展,现代行波保护技术取得了长足的进步,但仍存在部分问题,使保护的可靠性不能满足系统的要求,因此需进一步改进和完善该技术。

(1) 行波传播速度的不确定性。对于不同的输电线路,分布电感电容受导线类型、杆塔结构和沿线地质条件等影响存在一定的差异,因此在波速传播上存在差异。在行波信号的传输过程中,由于线路频散的影响,行波分量衰减,特别是频率较高的分量衰减较快。线路发生故障后,只有频率最高、幅值容易检测的行波分量中的波速能够确定到达母线终端的行波速度。但由于波的衰减和频率范围的不确定性,很难确定波速大小。

(2) 一、二次行波波形不一致。线路故障后产生的一次电压行波信号经专用电压行波传感器^[42]传输后,由于检测装置本身物理结构的影响,会导致一次与二次行波信号的波形特征有明显差异,其特征是相似性低,不能真实反映一次侧行波特征。结果表明在传输过程中,波形失真会导致暂态信息的丢失。考虑到实际行波和测量环境的影响,在不同程度的复杂故障情况下,一、二次行波波形不一致的问题将更加突出,通过利用行波检测过程中产生的畸变二次行波信号进行故障行波定位或行波保护,会产生较大的故障定位误差,进一步降低了行波保护的可靠性。

(3) 信号精确分析提取和检测。行波信号在不同频段存在着入射波与反射波重叠的现象。这些行波信号交织在电网中形成行波传输网络,使保护装置难以识别。行波信号在信号检测装置传输过程中也存在频率混叠现象,因此行波信号很难区分。

行波频谱主要分布在 10 kHz~2 MHz 之间,传输线上的信号持续时间较短,易受其他信号的影响,难以满足高频电压的传输。由于信号检测装置在各个频段的传输特性不同,单一的传输函数模型很难描述行波信号检测装置的传输特性。信号检测装置的频率响应特性、测量和采样误差、高频干扰以及各种背景噪声的影响都容易引起行波波形的失真。区内外各种故障产生的行波波形特征不

同,会影响波形特征的观测和分析。

行波检测受行波反射、传输色散和变压器非线性特性等因素的影响,检测精度难以满足工程应用要求,因此如何准确检测行波已成为制约行波保护实际应用的一个基本理论问题。

(4) 各类噪声对现场的干扰。噪声是行波传输中不可避免的干扰因素,一次行波信号的各频段特性不同,且在电网中存在各种干扰信号,因此行波测距的误差增大。行波保护装置在现场工作时,会受到很多干扰,且装置采样频率高,容易受到各种噪声的干扰,主要是白噪声的干扰。然而,对于小振幅信号,白噪声的存在使行波信号无法被检测到。因此,消除噪声干扰,确定行波到达时间,可以保证行波保护装置运行更加可靠,从而达到行波保护的目的。

4 解决行波保护实用化问题的主要措施

由上述问题分析可知,真实可靠的行波信号检测是行波保护实际应用的前提条件,只有对行波信号进行时频分析和描述,才能充分利用行波波形信息,进而提出新的暂态保护方法,实现电网故障的快速可靠保护。针对现有行波保护遇到的困难,提出以下措施:

(1) 波速不确定问题的解决。目前只有通过参数计算、在线测量和经验参数才能得到相应的行波速度,但这 3 种方法都有一定的局限性。参数计算要求给定的参数值准确,在线测量方法需要测量设备,而经验参数法没有理论支持,这些方法无法确定行波传播过程中的波速。虽然行波保护在理论上不受故障电阻及其线路类型等的影响,但在工程实际中却受到很多因素例如雷击的干扰和直流控制系统影响的制约。故在今后的研究中要能够合理地采用数字信号处理方法及分析手段,消除这些参数因素造成的影响,准确测量行波速度,从而达到行波保护的目的。

(2) 行波信号的传变和反演。针对一、二次行波波形不一致问题,行波信号在专用行波传感器的传变过程中,会产生波形畸变,从而导致暂态信息的缺失。由于实际故障暂态信息无法直接获取,故通常采用反演计算方法将二次行波信号还原为一次行波信号^[43—45]。

为了研究行波信号的传输特性,需要将行波信号分为 3 个频段。通过分频信号采集模块得到各频段信号传输函数的频率变化规律,讨论信号的多尺度分解策略,将各频带信号二次分频为各个特征频

段,并建立行波信号的传输函数模型;研究各特征频带信号采集模块的影响程度,结合应用需求对确定反演的频带范围建立反演模型;研究反演算法和快速准确反演信号,实现对行波信号的真实检测。各频带信号划分后,频率范围仍然宽,各频段对应的应用需求不同,故3个频段根据应用需求要进行2次划分。根据应用要求,研究不同频段信号通过信号采集模块的衰减规律,不同频段信号通过信号采集模块的非线性互串影响规律,以及各种电磁干扰和环境温度对信号在不同频段信号传变的影响规律。根据这些规律,选择传输函数模型中各分量参数和分布参数,构建信号采集模块在不同频段的多尺度传变函数。由于信号在检测过程中存在频变,故需要对各频段信号进行波形反演,构建反演模型的仿真模型,进行特征分析。

(3) 行波信号波形特征真实提取。为解决混叠问题,需要进一步研究电网结构和功率元件对行波信号传输的作用机理,以及信号检测装置传输宽带信号时不同频段信号的相互作用规律,高频信号入射波和反射波的自相关和互相关特性。

针对行波信号传变模型特性问题,需要建立行波信号的传递函数模型,这是实现行波信号精确检测的关键。因此,有必要根据频率的变化规律、传递函数模型中各分量的参数、各种电磁干扰等深入研究信号检测装置中行波信号的传递函数模型和环境温度对信号传输的影响规律。

此外,还需要进一步研究信号检测装置对行波信号的传输特性、电网不同结构的影响机理,故障点位置和故障时间等,研究行波信号的时频分析方法和时频特征提取算法,从而准确有效地对宽带行波信号进行分解和合成,减少信号的混叠和失真,消除各种干扰信号的影响,从而准确提取行波信号的波形特征。

(4) 噪声干扰的消除。为了满足安全稳定分析和继电保护要求,需要对行波信号进行准确分解,消除干扰信号,再经反演后进行合成。因此,有必要研究信号在各个频段的频率特性,研究小波分析、HHT等软件分析方法,对行波信号进行准确有效的分解和合成,减少信号的混叠和失真。

随着行波信号提取和高速数据采集技术的发展,各种行波保护装置被广泛应用于电力系统输电线路中。经过长时间的运行分析,行波保护装置应对各种现场条件的经验逐渐丰富,为行波保护技术的不断改进提供了更多的信息,行波保护应不断改进技术应用。

为解决上述现有行波保护中遇到的问题,提高行波保护的实用性,保证电力系统的安全稳定运行,应从以下3个方面着手:(1) 深入研究各频段信号的频带特性,研究精确有效地分解和合成信号以减少信号混叠和失真的软件方法;(2) 行波信号的快速准确提取是行波保护的基础,故需对其继续进行广泛探讨与深入研究;(3) 改进和完善现有的行波保护原理与研究,寻找具有可靠且动作性能更高的行波保护新方法,继续深入研究故障行波在整个电网中的传输特性与规律,提高行波保护的实用性。

5 结语

目前,国内外许多高校、科研单位和研究机构已投入大量物力和财力针对行波保护进行相关研究,行波保护装置已广泛应用于高压直流输电线路的行波保护中,但混合高压直流输电线路的行波保护,特别是交流输电线路的行波保护仍需进一步研究。文中从行波保护的发展历程出发,根据研究现状,介绍了基于输电线路的行波保护原理,并针对行波保护实用化面临的主要问题提出了相应的解决方案。希望文中研究成果能为今后行波保护的发展和进一步的研究工作提供参考。现代超高速行波保护研究的新高潮已经到来,新型行波保护也将于特高压远距离输电线路中获得更多应用。

本文得到湖南省教育厅重点项目(18A121),湖南省研究生科研创新项目(CX2018B557)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 董新洲,葛耀中,贺家李. 波阻抗方向继电器的算法研究[J]. 电力系统自动化,2001,25(10):14-17.
DONG Xinzhou, GE Yaosheng, HE Jiali. Research of algorithm for surge impedance relay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(10):14-17.
- [2] 董新洲,罗澍忻,施慎行,等. 基于极化电流行波方向继电器的行波方向比较式纵联保护技术及其在750 kV线路上的应用[J]. 电力自动化设备,2015,35(9):1-5.
DONG Xinzhou, LUO Shuxin, SHI Shenxing, et al. PCTDR-based directional comparison pilot protection technology and its application in 750 kV transmission lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(9):1-5.
- [3] 哈恒旭,张保会,吕志来. 边界保护的理论基础 第一部分 故障暂态分析[J]. 继电器,2002,30(9):7-10,14.
HA Hengxu, ZHANG Baohui, LYU Zhilai. The basic theories of bolmclary protection part I falut transient analysis[J]. Relay, 2002, 30(9):7-10, 14.
- [4] 郭林勇,何正友,钱清泉. 一种提取行波自然频率的单端故障测距方法[J]. 中国电机工程学报,2008,28(10):69-75.

- WU Linyong, HE Zhengyou, QIAN Qingquan. A single ended fault location method using traveling wave natural frequency[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 69-75.
- [5] 李小鹏, 何正友, 武骁. 基于 S 变换能量相对熵的高压输电线路极性比较式纵联保护[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2250-2256.
- LI Xiaopeng, HE Zhengyou, WU Xiao. Polarity comparison pilot protection based on S-transform energy relative entropy for high voltage transmission lines[J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2250-2256.
- [6] 李泽文, 花欢欢, 邓丰, 等. 基于广域行波信息的行波保护[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6238-6245.
- LI Zewen, HUA Huanhuan, DENG Feng, et al. Traveling wave protection based on wide area traveling wave information[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6238-6245.
- [7] 索南加乐, 邓旭阳, 宋国兵, 等. 基于模型参数识别的母线保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 92-98.
- SUONAN Jiale, DENG Xuyang, SONG Guobing, et al. Model-parameter identification based bus-bar protection principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 92-99.
- [8] 许飞, 董新洲, 王宾, 等. 考虑二次回路暂态传变特性的单端组合测距算法及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(20): 5210-5219.
- XU Fei, DONG Xinzhou, WANG Bin, et al. Single-ended assembled fault location method and application considering secondary circuit transfer characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5210-5219.
- [9] 曾祥君, 刘正谊, 屈明志, 等. 互感器暂态行波传输特性仿真分析与实验测试[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2004, 1(1): 71-75.
- ZENG Xiangjun, LIU Zhengyi, QU Mingzhi, et al. Simulative analysis and experimental test of the transmission characteristics of transient traveling-wave in transformer[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2004, 1(1): 71-75.
- [10] 周超, 何正友, 罗国敏. 电磁式电压互感器暂态仿真及行波传变特性分析[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 84-89.
- ZHOU Chao, HE Zhengyou, LUO Guomin. Transient simulation of electromagnetic potential transformer and analysis on its traveling wave transfer characteristics[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 84-89.
- [11] 甘磊, 张哲, 尹项根. 基于电容式电压互感器二次信号的行波故障定位方法[J]. 电网技术, 2006, 30(5): 101-105.
- GAN Lei, ZHANG Zhe, YIN Xianggen. Travelling-wave fault location method based on secondary signal of CVT[J]. Power System Technology, 2006, 30(5): 101-105.
- [12] 甘磊, 张哲, 叶皖, 等. 基于 CVT 二次信号的实用化行波定位方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(3): 52-56.
- GAN Lei, ZHANG Zhe, YE Huan, et al. Practical method in traveling wave fault location based on the secondary signal of CVT[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(3): 52-56.
- [13] 符玲, 何正友, 钱清泉. 超高压输电线路的故障暂态特征提取及故障类型判断[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 100-106.
- FU Ling, HE Zhengyou, QIAN Qingquan. Feature extraction of fault transient and fault type determination for EHV transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 100-106.
- [14] 李泽文, 刘柏罕, 范彩兄, 等. 基于 Rogowski 线圈的新型电压行波传感器[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(9): 94-99.
- LI Zewen, LIU Bohan, FAN Caixiong, et al. A new voltage wave sensor based on the Rogowski coil[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(9): 94-99.
- [15] 董新洲, 冯腾, 王飞, 等. 暂态行波保护测试仪[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(2): 192-198.
- DONG Xinzhou, FENG Teng, WANG Fei, et al. Test platform of protection equipments based on transient traveling wave[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 192-198.
- [16] 张灵芝, 王杨帆, 刘基典, 等. 电网故障行波传感器研究及测试[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(2): 142-149.
- ZHANG Lingzhi, WANG Yangfan, LIU Jidian, et al. Research and experiments on the transmission characteristics of traveling wave sensor for power fault[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 142-149.
- [17] 甄永赞, 杨荆宜, 张冰. 基于小波变换的直流线路行波保护采样数值稳定性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 42-48.
- ZHEN Yongzan, YANG Jingyi, ZHANG Bing. Study on numerical sampling stability of traveling wave protection based on wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 42-48.
- [18] 姚晓健, 王帅伟. 基于 HHT 能量谱的行波保护方法[J]. 电力科学与技术学报, 2010, 25(4): 91-95.
- YAO Xiaojian, WANG Shuaiwei. HHT energy spectrum based traveling wave protection[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2010, 25(4): 91-95.
- [19] 余修勇, 肖立业. 基于数学形态学的多端柔性直流系统故障测距方案[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 93-10.
- YU Xiuyong, XIAO Liye. Fault location scheme for multi-terminal MMC-HVDC system based on mathematical morphology[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 93-10.
- [20] LI X, HUANG X, MATHISEN S, et al. Design of 71-76 GHz double-corrugated waveguide traveling-wave tube for satellite downlink[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2018(99): 1-6.
- [21] 刘兴茂, 林圣, 何正友, 等. 基于 S 变换的新型波阻抗方向继电器[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 113-119.
- LIU Xingmao, LIN Sheng, HE Zhengyou, et al. A novel surge impedance directional relay based on S transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 113-119.
- [22] 罗澍忻, 董新洲, 施慎行, 等. 极化电流行波方向继电器在串补线路中的应用[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15):

- 100-105.
- LUO Shuxin, DONG Xinzhou, SHI Shenxing, et al. Application of polarized current travelling wave based direction relay in series compensated transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 100-105.
- [23] 陈争光, 周泽昕, 王兴国, 等. 基于双树复小波变换的混合直流输电线路行波保护方法[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3832-3840.
- CHEN Zhengguang, ZHOU Zexin, WANG Xingguo, et al. Traveling wave protection for hybrid HVDC transmission lines based on dual-tree complex wavelet transform[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3832-3840.
- [24] 郑州, 吕艳萍, 王杰, 等. 基于小波变换的双端行波测距新方法[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 203-207.
- ZHENG Zhou, LYU Yanping, WANG Jie, et al. A new two-terminal traveling wave fault location method based on wavelet transform[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 203-207.
- [25] 高效海, 何奔腾, 王慧芳, 等. 行波距离保护中识别第2个反射波性质的新方法[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1477-1482.
- GAO Xiaohai, HE Benteng, WANG Huifang, et al. A new scheme to identify the nature of the second reflection wave in travelling wave based distance protection[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1477-1482.
- [26] 周泽昕, 王兴国, 柳焕章, 等. 特高压交流半波长输电线路保护体系[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3174-3179.
- ZHOU Zexin, WANG Xingguo, LIU Huanzhang, et al. UHVAC half-wavelength transmission line protection scheme[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3174-3179.
- [27] 李自乾, 樊艳芳, 胡剑生. 不受波速影响的特高压直流输电线路单端故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 142-148.
- LI Ziqian, FAN Yanfang, HU Jiansheng. Single terminal fault location method of UHVDC transmission line immune to wave speed[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 142-148.
- [28] 汤兰西, 董新洲. 半波长交流输电线路行波差动电流特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(8): 2269-2267.
- TANG Lanxi, DONG Xinzhou. Study on the characteristic of travelling wave differential current on half-wave-length AC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(8): 2261-2269.
- [29] 赵青春, 谢华, 陆金凤, 等. 实用的半波长输电线路纵联差动保护[J]. 高电压技术, 2018, 44(1): 44-50.
- ZHAO Qingchun, XIE Hua, LU Jinfeng, et al. Practical differential protection for half-wavelength transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(1): 44-50.
- [30] 雷傲宇, 董新洲. 超/特高压输电线路宽频窗短时窗行波差动保护方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23): 6826-6835.
- LEI Aoyu, DONG Xinzhou. Wide-frequency and short-time window based traveling wave differential protection method for EHV/UHV transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(23): 6826-6835.
- [31] 魏雄飞. 基于VMD的贯通式同相牵引直接供电系统牵引网行波保护研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.
- WEI Xiongfei. Research on traveling wave protection of traction network based on VMD-based through-phase cophase traction direct power supply system[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018.
- [32] 邹贵彬, 高厚磊, 江世芳, 等. 新型暂态行波幅值比较式超高速方向保护[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7): 84-90.
- ZOU Guibin, GAO Houlei, JIANG Shifang, et al. Novel transient travelling wave based amplitude comparison ultra high speed directional protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 84-90.
- [33] 李爱民, 蔡泽祥, 李晓华, 等. 高压直流输电线路行波保护影响因素分析及改进[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(10): 76-80.
- LI Aimin, CAI Zexiang, LI Xiaohua, et al. Analysis of influence factors and improvement of traveling wave protections for HVDC line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(10): 76-80.
- [34] 全玉生, 王欢, 李学鹏, 等. 新型直流输电行波电流极性比较式方向保护[J]. 高电压技术, 2006(9): 106-110.
- QUAN Yusheng, WANG Huan, LI Xuepeng, et al. New directional protection based on traveling wave current polarity comparison used on HVDC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 106-110.
- [35] 蒋灵通, 陈青, 王磊, 等. 基于故障电流前反行波初始波头时差的VSC-HVDC纵联方向保护[J]. 电网技术, 2018, 42(12): 3998-4005.
- JIANG Lingtong, CHEN Qing, WANG Lei, et al. A novel VSC-HVDC directional pilot protection using the propagation time of fault initial[J]. Power System Technology, 2018, 42(12): 3998-4005.
- [36] 张保会, 孔飞, 张嵩, 等. 高压直流输电线路单端暂态量保护装置的技术开发[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 179-185.
- ZHANG Baohui, KONG Fei, ZHANG Song, et al. Research on transient-based protection for HVDC lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 179-185.
- [37] 汤兰西, 董新洲, 施慎行, 等. 柔性直流电网线路超高速行波保护原理与实现[J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3176-3186.
- TANG Lanxi, DONG Xinzhou, SHI Shenxing, et al. Principle and implementation of ultra-high-speed travelling wave based protection for transmission line of flexible HVDC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3176-3186.
- [38] LI Zewen, ZENG Xiangjun, YAO Jiangang, et al. Wide area traveling wave based power grid fault network location method[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2014, 63(6): 173-177.

- [39] LIANG Rui, WANG Fei, FU Guoqing, et al. A general fault location method in complex power grid based on wide-area traveling wave data acquisition[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016(83):213-218.
- [40] 吴浩, 李群湛, 刘炜. 基于功率信息的广域行波保护新算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(2):90-100.
WU Hao, LI Qunzhan, LIU Wei. Novel wide-area traveling wave protection algorithm based on power information[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(2):90-100.
- [41] 彭楠, 王政, 梁睿, 等. 基于广域行波波头频率分量幅值比信息的输电网非同步故障定位[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(4):56-62.
PENG Nan, WANG Zheng, LIANG Rui, et al. Asynchronous fault location of transmission system based on wide area amplitude ratio information of frequency components in traveling wave fronts[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4):56-62.
- [42] LI Zewen, DENG Tuofu, ZENG Xiangjun, et al. Theoretical modeling and implementation of traveling wave sensor based on PCB coils[J]. Journal of Sensors, 2015, 9(5):1-8.
- [43] 李泽文, 杜昱东, 林依勤, 等. 结合 Tikhonov 正则化的电压行波精确检测方法[J]. 电网技术, 2019, 43(3):1049-1055.
LI Zewen, DU Yudong, LIN Yiqin, et al. A method of voltage wave accurate detection based on Tikhonov regularization theory [J]. Power System Technology, 2019, 43 (3): 1049-1055.
- [44] 李泽文, 任申, 贺子凝, 等. EMD 分解结合维纳滤波的电压行波精确检测方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(4):1-8.
LI Zewen, REN Shen, HE Zining, et al. Accurate detection method for voltage traveling wave based on EMD decomposition combined with wiener [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(4):1-8.
- [45] LI Zewen, LYU Jiajia, XI Yanhui, et al. Accurate detection method of voltage traveling-wave-based on waveform inversion [J]. Electric Power Systems Research, 2020(178):1-8.

作者简介:



李泽文

李泽文(1975),男,博士,教授,研究方向为电力系统保护与控制(E-mail:lzw0917@163.com);

唐迪(1996),男,硕士在读,研究方向为电力系统保护与控制;

夏翊翔(1996),男,硕士在读,研究方向为电力系统保护与控制。

A summary of fault traveling wave protection for transmission lines

LI Zewen¹, TANG Di¹, XIA Yixiang¹, PENG Weixin¹, WANG Dong²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. Changsha Automotive Technical School, Changsha 410117, China)

Abstract: Transmission line traveling wave protection uses traveling waves generated by faults to quickly identify faults, has ultra-high-speed action performance, and is not affected by factors such as power system oscillations, transition resistance, distributed capacitance current, and current transformer saturation. It is an ideal ultra-high voltage line relay protection method. Firstly, the development process of traveling wave protection is reviewed, and the domestic and foreign research status from three aspects of traveling wave signal extraction, signal processing technology development and engineering practice are summarized. Secondly, the basic principles of traveling wave protection are introduced and the advantages and disadvantages of various traveling wave protection principles are analyzed. The progress of related theoretical research is summarized, and a horizontal comparison and applicable scenarios for various traveling wave protection principles is conducted. Next, the main needs to be solved for the practical application of traveling wave protection technology problems are discussed and corresponding solutions are put forward. Finally, the development trend of traveling wave protection is prospected, which provides a reference for the subsequent research of traveling wave protection technology.

Keywords: transmission line; traveling wave protection; protection principle; fault; ultra high speed protection

(编辑 方晶)