

高压电力传输线行波保护技术原理综述

杜刚¹, 桂林², 党晓强²

(1. 成都电业局龙泉供电局, 四川 成都 610100; 2. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要:对高压电力传输线上的故障行波概念与故障特征进行分析,介绍了目前比较成熟的6种行波保护原理,并对其发展中存在的问题和中国高压电网中行波保护的应用前景做了简述。最后对行波技术的研究方向做了展望。

关键词:电力传输线;故障行波特征;行波保护

Abstract: The general concept and characteristics of fault traveling wave in high-voltage transmission line are introduced. Six principles of transient traveling wave relay protection are presented. Some problems which still stay to be solved are introduced and the prospect of application of transient traveling wave protection in HV power grid of China is described. At last, the developing direction of traveling wave protection is prospected.

Key words: transmission line; characteristic of fault traveling wave; traveling wave protection

中图分类号:TM771 文献标识码:A 文章编号:1003-6954(2008)01-0026-04

高速动作的继电保护对于支撑和保障高压输电网络的安全经济运行意义重大。传输线行波保护是根据线路故障初瞬产生的暂态行波信息构成的继电保护,它能在极短的时间内检出故障,具有超高速和抗干扰性强的特点。因此行波保护概念一经提出,就被寄予厚望在高压输电网络中发挥作用。近年来国内外掀起了利用行波暂态故障信息构成继电保护的研究热潮,文献中通常将基于时域上故障行波特征分量的保护称为行波保护,其主要原理是在20世纪90年代以前创建发展起来的;将基于线路故障时暂态高频信号在频域上特征的保护称为暂态保护,其主要原理是近10余年来发展起来的。从本质上讲,暂态保护也是利用行波特征实现的保护。行波保护装置所存在的主要问题是可靠性差,目前仍然处于理论与实践相互磨合和促进的探索性阶段。如何有效利用数字信号处理的最新成果,深入挖掘行波的故障信息,改善和提高这类保护的可靠性是其能否在实际电力系统中推广应用的关键。下面针对目前研究比较成熟的6种传输线行波保护原理进行了介绍,并对其发展中存在的问题以及高压电网中的行波保护的应用前景做了简述和展望。对于实际运行过程中影响行波保护可靠性的细节因素,文中未做分析。

1 故障行波特征分析

电力传输线在故障初期存在一个暂态过渡过程,行波保护通过反映该暂态过程中的行波特征分量信

息而动作。可以利用行波信息包括:由故障点产生的初始行波到达故障点标志着故障发生;三相行波的幅值和相位包含着故障相信息;初始行波和随后行波到达检测点的时间差代表着故障距离;线路两端初始行波的幅值和极性可以用于识别故障方向。正确识别和提取行波故障信息,可以构成行波故障启动元件和行波故障选相元件,构成高速动作的行波保护并实现故障测距。在输电线路发生故障时,在故障点将产生向线路两端传播的暂态行波,是比较容易理解的。

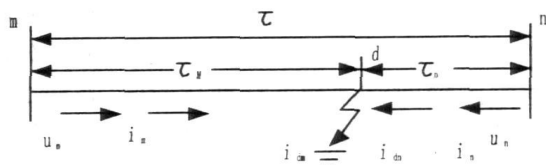


图1 故障行波的传播示意图

为分析方便以单导线线路上某点d发生单相接地为例,如图1所示。在分布参数线路上将产生电压行波u和电流行波i的传播方程:

$$u = u_m(t - \frac{x}{v}) + u_n(t + \frac{x}{v}) \quad (1)$$

$$i = i_m(t - \frac{x}{v}) + i_n(t + \frac{x}{v}) \quad (2)$$

其中:v为行波的传播速度,其大小取决于该段传输线空气导磁系数 μ_0 和介电系数 ϵ_0 的大小。 $u_m(t - \frac{x}{v})$ 代表一个以速度v向x正方向行进的电压波, $u_n(t + \frac{x}{v})$ 代表一个以速度v向x负方向行进的

波。通常称 u_m 为前行电压波, u_n 为反行电压波。同理称 i_m 为前行电流波, i_n 为反行电流波。行波方程解的具体表达式由方程边界条件及初始值确定。

对实际系统中三相导线的分析,由状态变量的增加,对状态的描述方程量需列写矩阵,因而不直接求出电压、电流的行波解。通常要利用坐标变换将相空间变为其它坐标空间进行求解,该空间被称为模空间,该变换称为相模变换,具体变换算法有相关专著论述。对于三相线路而言,应用模量变换可以把三相线路变为三个独立的单相线路,每一单相线路对应一个模量,这里介绍的保护原理对每一模量都适用。

2 行波保护的主要原理

从行波保护原理与装置实现来讲,目前比较成熟的保护有4种类型:行波差动保护、行波判别式方向保护、行波距离保护和行波极性比较式方向保护。

2.1 行波差动保护

保护基本思想为:由线路的一端(m 端)发出的正向行波经延时 τ 后到达另一端(n 端),正向行波的形状及大小不变。联系图1,可以列写如下 m 侧的贝瑞隆方程:

$$i_m(t-\tau) + \frac{1}{Z_c} u_m(t-\tau) = -i_n(t) + \frac{1}{Z_c} u_n(t) \quad (3)$$

式中: $i_n(t)$ 前取负号是因为 n 端所规定的电流正方向与实际方向相反。

由式(3)可定义行波差动判据:

$$i_{dm}(t) = i_n(t) + i_m(t-\tau) - \frac{1}{Z_c} [u_n(t) - u_m(t-\tau)] \quad (4)$$

式中: $\tau = \frac{L}{v}$ 为在绕组 mn 间,行波的行进时间; $i_m(t)$, $u_m(t)$ 为 t 时刻 m 端的行波电流、电压,同理可定义 n 端的差动保护判据 i_{dn} 。

由此看出,利用 i_{dm} , i_{dn} 可以正确区分线路内部、外部故障,当线路内部无故障时候, $i_{dm} = 0$, $i_{dn} = 0$,保护不动;在线路内部故障时候, i_{dm} 和 i_{dn} 存在一定的数值,为短路点的电流,保护要动作。

2.2 行波判别式方向保护

保护的基本思想为: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。如图1,保护设在 n 端, $u = \sqrt{2} U \sin(\omega t + \phi)$ 为故障点的故障前电压。则判别式方向保护的

判据 D :

$$D = (u - Z_c i)^2 + \frac{1}{\omega^2} \left(\frac{du}{dt} - Z_c \frac{di}{dt} \right)^2 \quad (5)$$

判据 D 与故障发生时刻无关,若行波来自线路方向,则 $D = 8U^2 \neq 0$;若线路无故障或行波来自反方向,则 $D = 0$ 。由此可见判据 D 具有敏锐的方向性。

2.3 行波距离保护

保护的基本思想为:以行波反射原理构成,仅需分别检测初始行波和反射行波到达检测装置的时间,再通过式(6)计算故障发生处的位置,即可判断是否发生区内故障。该保护判据:

$$x = \frac{1}{2} (t_2 - t_1) v \quad (6)$$

式中: v 为波速度, t_1 , t_2 分别为初始行波和反射行波到达检测母线的的时间。对故障反射波的识别是要解决的难点问题。

2.4 行波极性比较式方向保护

保护的基本思想为:根据故障初期行波电压和电流的相对极性来判别故障位置。当线路发生故障时,在故障点将产生向线路两端传播的电流、电压行波,如果为内部故障,在线路两端检测到的电压行波为同极性,电流行波也为同极性,而同端的电压、电流行波为反极性。当规定线路两端电流的正方向为母线指向被保护线路时,线路两端各自比较行波电压和电流极性,相异为正方向,相同为反方向,将各自的比较结果通过通道向对端发送,在确定自己与对方同为正向时,判为区内故障,反之为区外故障。

还可以基于被保护线路两端的行波电流的相对极性来判别区内、外故障。当规定行波电流的正极性为由母线指向线路时,线路两端的行波电流极性同相时判为区内故障,异极性则为区外故障。本端电流的极性由通道传给对端。

3 单端无通信暂态保护

高压输电线路故障时产生的高频暂态分量包含相当宽的频带范围,研究和利用行波的故障分量的不同频率分量在故障线路和非故障线路上的不同表现是构成超高速暂态保护的基本思路。保护通道的存在使得保护动作变慢、可靠性降低、成本增大、构成复杂。目前两种基本的单端无通信暂态保护,是分别利用故障时暂态高频电压信号和电流信号实现的。

利用故障暂态电压高频分量的单端无通信暂态

保护又称为噪声保护。保护的基本思想:利用输电线现有的高频阻波器或者对其进行改造,将一定频率范围内的暂态高频电压信号封闭在被保护线路以内,而将区外故障时产生的暂态高频电压信号阻挡在被保护线路之外。在此基础上,利用特别设计的带通滤波器对 CVT 进行改造,将高频阻波器阻带内的暂态高频电压信号提取出来,以实现单端无通信暂态保护。利用故障暂态电流高频分量的单端无通信暂态保护又称为边界保护。保护的基本思想为:利用故障暂态电流的不同频率成分的衰减差别来区分区内和区外故障。母线的等效电容对于高频暂态信号有分流作用。外部故障时,由于电容分流,较少的高频信息被检测到;内部故障时,母线尚没有分流,较多的高频暂态信息被检测到。根据这个差别,可构成边界保护。

4 行波保护发展中存在的问题

行波保护概念在 20 世纪 50 年代被提出,70 年代末 80 年代初是行波保护研究的高潮期,第一套行波保护装置由瑞典通用电气公司在 1976 年研制成功,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研制成功行波差动保护继电器。中国在 20 世纪 80 年代初从瑞典引进两套 RALDA 型行波极性比较式方向保护装置,分别安装在东北电网 500 kV 锦辽线上和华中电网 500 kV 平武线上。但是由于行波本身的高频暂态性质、原理缺陷及数学工具、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,可靠性差,一些试运行的行波保护装置先后被退出,成果未能推广普及。20 世纪 90 年代后,基于行波信息的单端无通信暂态保护原理受到了人们的关注,进而研制出了保护装置,通过高压实验室试验后投入现场试运行,其可靠性与经济性以及算法实现仍需进一步观察考证、改善。随着行波保护原理与算法研究的逐步深入,近年来结合先进的数字信号处理技术和传感技术的行波试验装置和研发平台在国内外也不断涌现。

综合行波保护中有待解决的问题,有如下三个方面:①行波信息与所在母线结构和故障发生的类型与时刻相关,导致行波信号的不确定性;②对高频行波信息的准确捕捉与精确识别问题;③由于输电线路的某些正常操作,如空载线路合闸或雷击同样会产生行波信号,且与线路发生故障时的暂态过程十分相似。

另外行波信号易于和噪声干扰(如 TA、TV 及测量仪器中的噪声)相混淆。这些情况都可能造成行波保护装置误动作失败。对以上问题的解决目前所做的研究包括:进一步对传输线在各种母线结构和运行方式下更精确的高频传输数学模型的建立与解析;进一步结合高响应速度和保真的数据采集与处理硬件,如 DSP 技术与新型光传感器的应用;利用小波分析在时域和频域都具有良好的局部化性质,将其与故障行波信息检测进一步结合起来。

5 在中国高压电网中的应用前景

在“西电东送、南北互供、全国联网”的指导方针下,近年来更多的超高压远距离输电网络在中国相继投入运行,特高压电网的建设也提在议事日程上。由此系统中出现了许多新情况,如输电距离增长,负荷加重,故障暂态过程中的暂态分量大大增加,持续时间变长。以上情况对传统保护正确动作产生不利影响,甚至不能正确运行,如果加滤波环节,则保护动作速度将变慢,这是高压电网所要求保护的灵敏性和快速性难以容忍的。中国建设特高压电网,其线路继电保护在世界范围内都还没有成熟的解决方案。特高压线路充电电容电流过大,使得其差动保护作为主保护整定困难,必须开发更合理的保护方式。

行波线路保护不仅具备原理简单,动作速度远快于基于工频电气量的传统保护的特点,而且还具有不受过渡电阻、电流互感器饱和、系统振荡和导线分布电容等影响的独特优点。行波保护的上述优点正是高压长距离输电线路所要的,当然如何将行波保护的优点与高压网络的需求有效结合是需要科技工作者们努力攻关的。

在高压电网中处于中枢地位的大型变压器,其基于工频量差动的主保护原理在识别匝间短路、克服励磁涌流所产生的误动等方面,力有不及,这也是变压器保护动作正确率不高的主要原因。如何利用暂态行波量检测变压器的匝间短路,区分空载合闸时的涌流存在进一步研究的空间。

6 结论与展望

特高压、超高压电力传输及联网是中国电网的发展方向,而安全性是大电网运行首要考虑的问题。正

在建设中的特高压电力传输的继电保护问题还没有很好的解决,这些需求为传输线上的行波保护提供了前进的动力,而不断更新的计算机技术、信号处理和通信技术为行波信息的应用搭建了发展的舞台。行波保护原理上特有的高速性和高频特征抗干扰性强在高压输电线的保护上存在优势,但对于该信号的实际应用目前仍有很多的理论探索和装置改进工作要做,基于故障行波信息的新的保护原理开拓和保护动作特性算法也是发展的重要方向。可以设想高压输电线上行波保护的原理、方案以及产品将会被不断地完善,推陈出新。

参考文献

[1] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 西安交通大学出版社, 2007.

[2] 董新洲, 葛耀中, 贺家李, 郭效军, 薄志谦. 输电线路行波保护的现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(11): 56—61.
[3] 董新洲. 故障信息、小波变换与继电保护[J]. 中国电力, 2001, 34(12): 22—26.
[4] 罗四倍, 段建东, 张保会. 基于暂态量 EHV/UHV 输电线路超高速保护研究现状与展望[J]. 电网技术, 2006, 30(22): 32—41.
[5] 薄志谦. 新一代电力系统继电保护——暂态保护[J]. 电网技术, 1997, 20(3): 34—36.
[6] 张言苍. 基于小波变换的行波保护装置的设计(硕士学位论文)[D]. 西安: 西安交通大学, 2001.

作者简介:

党晓强(1975—), 男, 四川西昌人, 博士, 讲师, 从事电气设备故障诊断方面的教学和研究工作。

(收稿日期: 2007—10—23)

(上接第 25 页) 该母线上所有线路的端子箱和隔离开关的机构箱内的控制回路, 其连接回路很长, 必然存在一定的接地电容, 在这种情况下, 即便控制回路中母线接地刀闸的辅助接点 1GD 和 2GD 断开, 其保持回路仍然能通过 N2 接地母线的对地电容形成交流通路得以保持, 当断开部分线路的控制回路后, 对地电容减小, 容抗增大, 不能达到保持电压, 其控制和返回回路才恢复了正常。

3 解决措施

发现问题后, 对该控制回路进行了认真分析, 研究了较多的解决方案, 并进行了实际验证, 比较有效的主要有以下两个方案。

3.1 控制回路的 L 和 N 互换

该设计回路从原理上完全满足要求, 主要是因为 N2 接地母线太长, 存在对地电容所致。在设备验收过程中, 将控制回路中的末端 N3 接地点改接电源的 L1 接线, 将控制回路的首端 L1 改接电源的 N1, 其他间隔的控制回路也照此改接, 改接后电源端连接所有的端子箱和机构箱, 接地端 N1 只接本线路的回路, 其连接长度短了很多, 改接后控制和返回正常。

3.2 空开 QF1 和 QF2 连动

以上的试验是在空开 QF1 和 QF2 不同时操作时发现的, 即是在断开电机电源空开, 使控制回路先保持的情况下再操作电机电源空开, 当然实际倒闸操作

中这种可能性较小, 若能使空开 QF1 和 QF2 连动, 当在使控制回路保持时, 即按下合闸或分闸按钮时, 能马上听见电机运转的声音, 不存在检修后只使控制回路保持的问题, 通过检查隔离开关的位置, 便能避免发生恶性误操作事故。具体办法是将 QF1 三极空开和 QF2 两极空开更换为四极空开。

4 结束语

近来, 电力系统内因电气闭锁回路问题引发的恶性误操作事故时有发生, 通过对该站 220 kV 隔离开关电气闭锁回路的认真验收检查, 发现了闭锁回路上难以发现的问题, 并提出了解决方案。笔者认为, 将控制回路的 L 和 N 互换, 实践证明是比较有效的方案, 但该方案导致了电源回路的增长, 发生接地短路或绝缘降低的可能性增大, 该接线工作量相对较大, 但只要加强设备的运行维护, 该问题完全能解决。实现空开 QF1 和 QF2 的连动方案, 需要对机构箱内的回路进行改接, 并受到机构箱内继电器等设备的安装位置限制, 特别是在电源缺相的情况下, 该问题仍然不能解决。隔离开关的电气闭锁回路虽然在很大程度上防止了电气误操作事故的发生, 但实际倒闸操作过程中, 不能仅仅相信电气闭锁回路的可靠性而忽略了对设备状态的检查和确认。

(收稿日期: 2007—11—18)