

高压直流输电线路保护的探讨

艾琳¹,陈为化²

(1.浙江省电力试验研究所,浙江 杭州 310014; 2.浙江省电力设计院,浙江 杭州 310014)

摘要:对高压直流输电线路的故障特征及其线路保护进行了分析与探讨,针对直流线路故障的特点,对各种保护原理进行了简要分析,认为行波保护作为 HVDC 系统线路保护的主保护符合高压直流输电线路故障特征并具有绝对的优越性,为高压直流输电线路行波保护的分析和研究提供了理论基础。

关键词:高压直流输电;线路保护;行波保护

中图分类号: TM77 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)04-0061-03

0 引言

高压直流输电近年来在世界上得到了迅速的发展,到目前为止,总容量达 50 GW 左右。其中,在我国相继建成了 100 kV 舟山海底电缆送电工程、500 kV 葛上直流输电工程、500 kV 天广直流输电工程,以及正在建设的三峡直流输电工程。因此,如何提高直流线路运行的安全性与可靠性已成为迫切需要解决的问题,而高压直流线路保护则是直流线路安全稳定运行的基本保障,因此,有必要对直流线路保护的主保护——行波保护的原理与保护方案进行进一步的研究与改进。

1 HVDC 系统故障特征及其线路保护

1.1 高压直流输电技术的优越性及其应用

现代直流输电技术普遍采取交流-直流-交流的换流方式,高压直流输电技术之所以得到如此蓬勃的发展,是因为它和交流输电相比,具有明显的优越性:

- 1) 同样截面的导线能输送更大的功率,并且有功损耗更小;
- 2) 直流输电能迅速精确地实现多目标控制,以提高电能质量和供电可靠性;
- 3) 直流只有正负两极导线,输电线路结构简单,而且当输电距离大于交直流输电等价距离时直流线路更节省投资;
- 4) 每根导线都可以作为一个独立回路运行,并且可以采用大地或海水作回路;
- 5) 直流线路在稳态运行时没有电容电流,沿线电压分布比较平稳,并且没有集肤效应;
- 6) 电缆线路可以在较高的电位梯度下运行;
- 7) 直流输电的两端交流系统之间不存在同步

运行稳定问题;

8) 可以联络两个不同频率的交流系统,联络线上的功率易于控制。

目前,高压直流输电技术在远距离大容量输电、海底电缆输电、两个交流系统的互联、大城市地下输电、减小短路容量、配合新能源输电等方面都得到了广泛的应用。

1.2 直流线路故障过程

直流架空线路发生故障时,从故障电流的特征而论,短路故障的过程可以分为行波、暂态和稳态三个阶段。

1) 初始行波阶段

故障后,线路电容通过线路阻抗放电,沿线路的电场和磁场所储存的能量相互转化形成故障电流行波和相应的电压行波。其中电流行波幅值取决于线路波阻抗和故障前瞬间故障点的直流电压值。线路对地故障点弧道电流为两侧流向故障点的行波电流之和,此电流在行波第一次反射或折射之前,不受两端换流站控制系统的控制。电压、电流行波的波动

方程分别为:
$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

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

上式的达朗贝尔解为:

$$u = u_f(t - \frac{x}{v}) + u_b(t + \frac{x}{v})$$

$$i = \frac{1}{Z_c} [u_f(t - \frac{x}{v}) - u_b(t + \frac{x}{v})]$$

式中: $Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}}$ 是波阻抗,波速为 $v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, $u_f(t - \frac{x}{v})$ 是指一个前行电压行波 (forward wave), $u_b(t + \frac{x}{v})$

$\frac{x}{v}$) 则是指反向电压行波 (backward wave)。

2) 暂态阶段

经过初始行波的来回反射和折射后,故障电流转入暂态阶段。直流线路故障电流主要分量有:带有脉动而且幅值有变化的直流分量(强迫分量)和由直流主回路参数所决定的暂态振荡分量(自由分量)。在此阶段,控制系统中定电流控制开始起到较显著的作用,整流侧和逆变侧分别调节使滞后触发角增大,抑制了线路两端流向故障点的电流。

3) 稳态阶段

最终,故障电流进入稳态,两侧故障电流提供的故障电流稳态值被控制到分别等于各自定电流控制的整定值,两侧流入故障点的电流方向相反,故障点电流为两者之差,即为电流裕额 I_d 。

1.3 高压直流线路保护的要求与配置

直流线路发生故障时,一方面可以利用桥阀控制极的控制来快速地限制和消除故障电流;另一方面由于定电流调节器的作用,故障电流与交流线路相比要小得多。因此,对直流线路故障的检测,不能依靠故障电流大小来判别,而需要通过电流或电压的暂态分量来识别。

然而,系统中运行的绝大多数继电保护都是反映于故障后稳态工频信息而动作的,例如电流增大、电压降低、电流和功率方向改变、测量阻抗减小等故障信息。并且这类保护依靠的是稳态工频量信息,需要较长的时间(数据窗)来获取,限制了微机保护动作的速度;电流互感器饱和造成二次传变电流失真,使得微机保护中的计算值与实际故障电流的差别很大,从而引起保护装置的不正确动作;工频距离保护不能正确区分线路区内故障和系统振荡。可见,依赖工频量信息的传统保护已经不能适应超高压长距离直流输电的需要了。因此,一种基于故障暂态信息的新原理保护——行波保护成为解决问题的关键。

目前,世界上广泛采用行波保护作为高压直流线路保护的主保护,它是利用故障瞬间所传递的电流、电压行波来构成超高速的线路保护。由于暂态电流、电压行波不受两端换流站的控制,其幅值和方向皆能准确反映原始的故障特征而不受影响,可见其可靠性是很高的。而且,同基于工频电气量的传统保护相比,行波保护具有超高速的动作性能,其保护性能不受电流互感器饱和、系统振荡和长线分布电容等的影响。

另一方面,相比于交流系统,在直流系统中行波保护具有更明显的优越性。首先,在交流系统中,如果在电压过零时刻(初相角为0°)发生故障,则故障线路上没有故障行波出现,保护存在动作死区;直流系统中不存在电压相角,则无此限制。其次,交流系统中电压、电流行波的传输受母线结构变化的影响较大,并且需要区分故障点传播的行波和各母线的反射波以及透射波,难度较大;由于高压直流线路结构简单,也不存在上述问题。

目前,高压直流线路保护普遍以行波保护(traveling wave protection)作为主保护,当直流线路发生故障时,从故障点到两端换流站会分别反射不同的故障电压、电流行波,据此可以检测故障。行波保护动作时,将起动直流线路故障恢复顺序控制(整流侧),即按预先设定的次数,按一定的去游离时间,全压起动或降压起动故障的直流极;若经重起动后仍不成功,将闭锁两端阀组。

同时,高压直流线路保护采用低电压保护(low voltage protection)、斜率保护(derivative and level protection)、纵差保护(longitudinal differential protection)等作为行波保护的后备保护。

2 行波保护的分类与 HVDC 发展动向

迄今为止,国内外学者提出了基于多种原理的行波保护,按照有无通道分,主要有两类:有通道保护和无通道保护,如表1所示:

表1 行波保护的分类

Tab. 1 Classification of traveling wave protection

行 波 保 护	有 通 道 保 护	行波差动保护
		行波判别式方向保护
		行波极性比较式方向保护
		行波幅值比较式方向保护
		行波电流极性比较式方向保护
	无通道 保护	行波距离保护
		利用噪声的保护

目前,高压直流输电正处于大力发展阶段。我国和世界上其它许多国家一样,正在现有的建设和运行经验的基础上,积极开展直流输电技术的研究和发展工作。由于高压直流输电技术所涉及的问题非常广泛,为了突出重点,下面简要介绍直流输电的几个主要发展方向以及研究课题:

1) 输电参数越来越高。目前世界上运行参数最高的巴西伊泰普(Itapu)直流输电工程的运行参数

已经达到: ± 600 kV, 3150 MW, 783 km。

- 2) 基于串联电容换相的换流器技术。
- 3) 基于电压源换流器的轻型直流输电系统。
- 4) 研制高参数大容量可控硅元件,改进换流阀的机、电、热各方面的结构,以进一步降低换流器的造价和提高可靠性。
- 5) 研究交、直流的并列(或并联)运行和调节,以提高输送功率的极限。
- 6) 研制直流断路器和多端直流系统。
- 7) 紧凑型换流站的设计和应用。
- 8) 应用新技术缩短直流线路的保护动作时间和提高保护动作的可靠性。

3 结论

本文对高压直流输电的故障特征及其线路保护进行了一些探讨,可得出以下结论:

- 1) 高压直流输电的故障特征和对线路保护的要求决定了行波保护作为线路保护主保护的地位。
- 2) 基于现有的 CT、PT 的传变特性,可采用前述的检测电压下降率,行波突变量以及地模波极性的方法来作为行波保护判据,其动作性能具有一定的可靠性。
- 3) 随着光 CT、光 PT、高速数据采集技术、数字

信号处理技术以及 GPS 的应用,基于小波变换的行波距离保护作为一种高速可靠的行波保护方案,已具有实用性。

参考文献:

- [1] 浙江大学发电研究室(Generation Lab of Zhejiang University). 直流输电(HVDC) [M]. 北京:水利电力出版社(Beijing: Water and Power Press), 1984.
- [2] 董新洲,葛耀中,等(DONG Xin-zhou, GE Yao-zhong, et al). 输电线路行波保护的现状与展望(Status and Prospect of Traveling Wave Protection of Transmission Lines) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2000, 24(10).
- [3] Hermann W D, John M. High Speed Relaying Using Traveling Wave Transient Analysis[J]. IEEE, 1978.
- [4] Liang J, Elangovan S, Devotta J B X. Application of Wavelet Transform in Traveling Wave Protection[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2000, 22.

收稿日期: 2003-05-13; 修回日期: 2003-05-29

作者简介:

艾琳(1978-),女,硕士,研究方向为电力系统继电保护;

陈为化(1978-),男,硕士,研究方向为电力系统分析与控制。

Discussion on line protection of HVDC transmission line

AI Lin¹, CHEN Wei-hua²

(1. Electric Power Research Institute of Zhejiang, Hangzhou 310014, China;

2. Electric Power Design Institute of Zhejiang, Hangzhou 310014, China)

Abstract: This paper discusses the fault characteristics and line protection of HVDC transmission line. As to the characteristics of DC line faults, the paper simply analyses all kinds of protection principles, and draws to the conclusion that it is in accord with HVDC line fault characteristics and has absolute superiority when using traveling wave protection as the main protection of HVDC line.

Key words: HVDC; line protection; traveling wave protection

(上接第 52 页 continued from page 52)

Abstract: This paper presents a constituent scheme of measurement and analysis system for online harmonics of power network. The basic design idea of this scheme is virtual instrument(VI). Conventional instrument is replaced by this virtual instrument, thus the measurement and analysis of harmonics are realized. Also, the system of multipoint measurement and analysis for harmonics is realized based on this instrument. Synchronous clock of GPS is utilized to achieve time standard of synchronous measurement in this system, therefore multipoints can be measured synchronously and data can be transferred synchronously, too. During the analysis of harmonics, FFT algorithm with high accuracy and Recursive FFT(RFFT) algorithm are both programmed and dynamically used to improve accuracy and speed of harmonics analysis.

Key words: harmonic; GPS; virtual instrument(VI); recursive fast Fourier transform(REFT); FFT algorithm with high accuracy