

高压直流输电中谐波对换流变压器差动保护的影响

乔小敏, 王增平, 文俊

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 由于高压直流输电系统特有的优点,使高压直流输电系统得到越来越广泛的应用。但高压直流输电系统具有其本身的特点,使得换流变压器与普通电力变压器在构造上有一些不同,高压直流输电系统中换流器是非线性元件,产生大量谐波,谐波对换流变压器保护动作有影响,再加上直流控制系统对故障的控制和调节作用,导致换流变压器和传统电力变压器保护存在差异。基于PSCAD/EMTDC仿真程序研究了CIGRE直流输电标准测试系统在正常运行,换流变压器内部故障和整流侧换流阀短路典型故障情况下的特点。并用Matlab分析了各种情况下的数据,并得出换流变压器差流中谐波的特点及对换流变压器差动保护的影响。

关键词: 高压直流输电; 换流变压器; 差动保护; PSCAD/EMTDC仿真; Matlab

Influence of converter transformer differential protection by harmonic in HVDC transmission system

QIAO Xiao-min,WANG Zeng-ping,WEN Jun

(North China Electric Power University, Beijing 102206,China)

Abstract: As the special merits of HVDC system, it becomes more and more popular. In HVDC system the valve is non-linear component and brings out a lot of harmonic, which affects the protection of the converter transformer. The converter transformer has something different with power transformer in structure, in addition, the control and adjust action to fault from the direct current control systems, which makes the protection exist differences between the converter transformer and the power transformer. This paper researches different typical conditions of the CIGRE HVDC standard test system based on PSCAD/EMTDC simulator, which includes good running, internal fault of the converter transformer and valve fault at rectifier. Finally, it analyzes the data of different conditions and draws the conclusion of the differential current harmonic traits and the converter transformer differential protection influenced by harmonic.

Key words: HVDC transmission system; converter transformer; differential protection; PSCAD/EMTDC; Matlab

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)10-0111-04

0 引言

高压直流输电由于其特有的优点,得到了越来越广泛的应用。这些优点包括:不须考虑稳定性问题;线路故障恢复能力较强;调节速度快,更有利于交流系统的稳定;减少互联交流系统的短路容量;可实现电力系统之间的非同步联网;超过一定距离建设投资更经济等^[1]。中国的高压直流输电发展迅速,相继建成投产了天广(天生桥-广州)、三常(三峡-常州)、三广(三峡-广东)和贵广(贵州-广东)等多项高压直流输电项目。

高压直流输电系统中,换流变压器是最重要的设备之一,它处于交流电和直流电互相交换的核心位置。可以提供相位差为30度的12脉波交流电压,降低交流侧谐波电流;作为交流系统和直流系统的电气隔离,提供阀的换相电抗;通过换流变压器可

以在较大范围内调节交流电压,使直流系统运行在最优状态。

高压直流输电的另一主要设备换流器是非线性元件,对交流侧来说是主要的谐波电流源,产生大量的谐波对换流变压器保护,特别是对依靠谐波原理闭锁的保护产生影响。

换流变压器配置的主保护有比率差动、差动速断、工频变化量比率差动、零序比率差动保护,后备保护包括过流、零序过流、过电压、零序过电压保护等。

换流变压器的可靠安全运行是直流输电系统可靠安全运行的基础。差动保护作为换流变压器的主保护,其可靠安全动作对整个直流输电系统的安全稳定可靠运行至关重要。

1 CIGRE 直流输电标准测试系统简介

本文采用国际上通用的电力系统电磁暂态仿真程序 PSCAD/EMTDC 来研究直流输电系统在正常运行和各种故障情况下的响应特性。为了获得直流输电系统在各种情况下的典型响应特性,所有的仿真都是在 CIGRE 直流输电标准测试系统上进行。

CIGRE 直流输电标准测试系统的原型是一个海底电缆直流输电系统,它的主要目的是测试各种直流控制器在弱交流系统下的行为,其控制策略具有普遍适用性,同时也用以考核各种仿真工具对直流输电系统模拟的精确度。

该直流系统的额定电压为 500 kV,额定容量为 1000 MW,换流器为 12 脉动,直流系统单极运行。交流侧由固定电容器和阻尼型滤波器进行无功补偿和滤波,交流系统很弱,其短路比 SCR 在 2.5 左右。1# 和 2# 换流变压器的一次侧和二次侧线电压分别是 345 kV 和 211.42 kV。3# 和 4# 换流变压器的一次侧和二次侧线电压分别是 230 kV 和 211.42 kV。该测试系统的模型如图 1 所示^[2]。

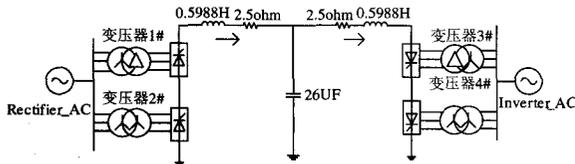


图 1 CIGRE 直流输电标准测试系统的直流系统模型

Fig.1 DC system model of CIGRE HVDC Benchmark Model

2 差动电流仿真计算

电力变压器以差动保护和瓦斯保护为主保护,可以对变压器绕组、套管以及引出线的各种短路故障进行保护。换流变压器差动保护和交流系统变压器差动保护原理基本相同,都是反应的工频分量,也都是建立在变压器功率平衡的原理之上。

目前广泛应用的是微机保护,在微机保护中,电流互感器都采用 Y 形接线直接接入保护装置内,接线组别引起的相位差和幅值都由计算机的软件进行计算校正。

在 Y/D-11 变压器中,设 I_A 、 I_B 、 I_C 和 I_a 、 I_b 、 I_c 分别是 Y 和 D 侧的经过电流互感器的二次电流,以高压侧为基准,引入一个平衡系数 K_{ph} 。

$$K_{ph} = \frac{N_{TAL}}{N_B N_{TAH}} \quad (1)$$

其中: N_B 为变压器的变比, N_{TAL} 、 N_{TAH} 分别为低压侧和高压侧电流互感器的变比。这时流入继电器的各相差动电流 I_{cda} 、 I_{cdb} 、 I_{cdc} 的计算式如式(2)

所示。

$$\begin{cases} I_{cda} = (I_A - I_B) - I_a \cdot K_{ph} \\ I_{cdb} = (I_B - I_C) - I_b \cdot K_{ph} \\ I_{cdc} = (I_C - I_A) - I_c \cdot K_{ph} \end{cases} \quad (2)$$

本文中主要给出了图 1 所示系统中 1# 换流变压器 A 相的两侧波形和差流波形。其中 I_{act1} 和 I_{aact1} 分别为 1# 换流变压器的网侧和阀侧的 A 相电流波形, I_{d11} 为 1# 换流变压器 A 相的差流波形。下面是在正常运行、换流变压器内部故障(三相短路)、整流侧换流阀短路情况下的仿真波形。

2.1 正常运行

在系统正常运行时的 A 相差流波形如图 2 所示。

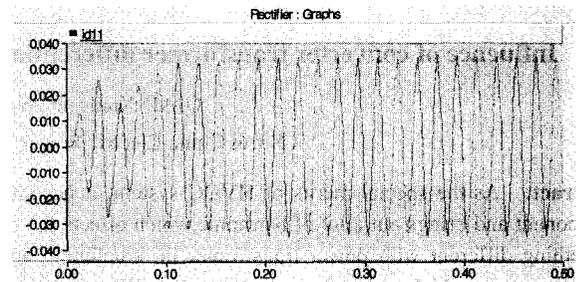


图 2 正常运行时的 1#换流变压器 A 相差流

Fig.2 A phase differential current of 1# converter transformer for normal running

正常运行时,从图 2 可以看出波形有畸变,谐波含量比纯交流系统要大,但换流变压器差流中谐波幅值较小。

2.2 换流变压器(1#)内部三相故障

1# 换流变压器网侧发生三相故障时的 A 相差流波形如图 3 所示。

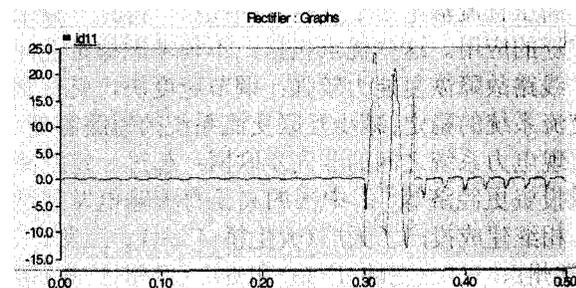


图 3 换流变压器(1#)内部故障的 A 相差流

Fig.3 A phase differential current of 1# converter transformer for internal fault (1#)

在 1# 换流变压器网侧发生内部三相故障时,网侧电流较大,阀侧电流几乎为零。故障时间为 0.3~0.35 s,差流在故障期间很大。

2.3 整流侧换流阀短路故障

整流侧换流阀短路是在 2# 换流变压器阀侧 C 相接地, 这时对 2# 换流变压器连接的换流器 C 相与大地连接的阀来说可视为广义上的换流阀短路, 换流阀短路时的 A 相差流波形如图 4 所示。

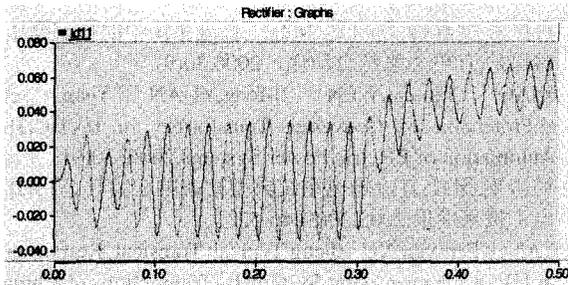


图 4 整流侧换流阀短路时的 A 相差流

Fig.4 A phase differential current of 1# converter transformer for valve fault at rectifier

整流侧换流阀短路是换流变压器最严重的区外故障, 故障时间 (0.3~0.35 s), 这时换流变压器铁心饱和, 电流畸变, 谐波含量较大。

3 数据分析

3.1 谐波分析和危害

3.1.1 Matlab 中 FFT 函数谐波分析基础

Matlab 中 FFT 函数谐波分析, 主要是利用傅立叶算法。 $f(\omega t)$ 代表以 T 为周期的电压和电流, 若它满足于狄里赫利条件, 则可分解为傅里叶级数形式^[3]:

$$f(\omega t) = A_{(0)} + \sum_{n=1}^{\infty} (A_{(n)} \cos n\omega t + B_{(n)} \sin n\omega t) \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} A_{(0)} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) d(\omega t) \\ A_{(n)} &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos(n\omega t) d(\omega t) \\ B_{(n)} &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin(n\omega t) d(\omega t) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$n = 1, 2, 3, \dots$

$$f(\omega t) = A_{(0)} + \sum_{n=1}^{\infty} C_{(n)} \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (5)$$

$A_{(0)}$ 称为的恒定分量或直流分量;
 $C_{(1)} \sin(n\omega t + \varphi_1)$ 称为基波分量或第一谐波分量;
 $C_{(n)} \sin(n\omega t + \varphi_n)$ 的频率为工频频率 (既基波频率) 的整数倍 ($n=2, 3, 4, \dots$), 按 n 的大小分别称为 n 次谐波分量。

3.1.2 谐波危害

由于换流器的非线性, 在交流侧产生谐波电流。对于换流变压器, 主要流过特征谐波电流, 即 $pn+1$ 次和 $pn-1$ 次谐波电流 (p 为脉波数, n 为任意正整数)。运行中, 谐波电流使换流变损耗和温升增加、产生局部过热、发出高频噪声和对通信设备产生干扰。

3.2 数据分析

Matlab 编程, 主要用 FFT 函数, 对整流侧 1# 换流变压器的 ABC 三相差流进行分析。模型是 12 脉动整流器, 12 脉动整流器由两个 6 脉动整流器串联组成, 当一个 6 脉动整流器发生故障时, 影响另一个 6 脉动整流器。下面对 1# 换流变压器 ABC 三相差流中的 2、3、4、5、7 次谐波的含量进行分析, 表格中的数据为各次谐波对基波比值的百分比。

3.2.1 正常运行

表 1 正常运行时差流谐波与基波比值

Tab.1 The ratio of harmonic to fundamental wave of differential current for normal running

谐波与基波百分比	2 次	3 次	4 次	5 次	7 次
I_{aa_cd1}	0.059	0.059	0.024	1.670	1.056
I_{bb_cd1}	0.064	0.058	0.025	1.667	1.058
I_{cc_cd1}	0.076	0.055	0.031	1.670	1.051

由表 1 可以看到正常运行时, 差流中各次谐波含量较少, 其中特征谐波 5, 7 次谐波相对大一些, 主要原因是换流器交流侧产生 5, 7 次谐波, 但其与基波比值较小, 不会对保护有很大影响。

3.2.2 换流变压器内部故障

表 2 换流变压器内部故障 (1# 三相故障) 时差流谐波与基波比值

Tab.2 The ratio of harmonic to fundamental wave of differential current for internal fault (1# three-phase fault)

谐波与基波百分比	2 次	3 次	4 次	5 次	7 次
I_{aa_cd1}	23.83	19.03	10.12	9.92	6.29
I_{bb_cd1}	17.37	13.60	8.274	6.758	4.809
I_{cc_cd1}	16.57	11.24	7.92	5.44	3.86

换流变压器内部故障是对换流变压器网侧发生三相短路时的情况进行仿真分析。

表 2 可以看出各次谐波与基波比值含量增加, 其中二次谐波与基波比值含量最大, 电力变压器保护中通常根据二次谐波与基波比值的含量来区分励磁涌流和内部故障, 此时二次谐波与基波的比值已经超过了二次谐波制动比 (通常为 15%~17%), 内部故障闭锁保护, 造成继电保护拒动。三次谐波和五次谐波与基波比值含量也明显增加, 对三次谐波制动和五次

谐波制动原理的过励磁保护有一定影响,当含量超过其相应的制动比时,会造成保护的拒动。

3.2.3 整流侧换流阀短路故障

表 3 整流侧换流阀短路故障时差流谐波与基波比值

Tab.3 The ratio of harmonic to fundamental wave of differential

current for valve fault at rectifier					
谐波与基波 百分比	2 次	3 次	4 次	5 次	7 次
I_{aa_cd1}	15.28	8.76	5.21	4.14	2.90
I_{bb_cd1}	12.95	4.51	2.25	1.43	1.03
I_{cc_cd1}	23.28	8.68	5.75	4.52	3.20

整流侧换流阀短路是换流阀内部或外部绝缘损坏或被短接造成的故障,这是换流器最为严重的一种故障。这时交流侧交替发生两相短路和三相短路,交流侧电流激增,使换流阀和换流变压器承受比正常运行时大得多的电流。

如果故障发生在换流变保护区域外,对换流变压器来说属于外部故障,谐波含量高保护可靠闭锁,不会造成误动;但故障发生在换流变保护区域内,对换流变压器来说是内部故障。此时,由于阀的单向导电性,故障电流半周电流大,半周电流小,导致差电流中含有较大的二次谐波,这种情况下换流变压器比例差动保护很容易受到励磁涌流判据的闭锁而不能出口,造成保护拒动。

4 结论

以上是在直流控制系统起作用的情况下得到的数据,本文分析了正常运行以及对保护影响较大的内部故障和整流侧换流阀短路故障情况。通过分析可得到以下结论。

正常运行时,虽然换流变压器差流中谐波含量较纯交流时大,但从仿真的数据来看,对保护并没有很大的影响。

在换流变压器区域内故障时,各次谐波与基波比值含量明显增加,二次谐波、三次谐波和五次谐波与基波比值含量较大,对相应谐波制动的差动保护有影响,可能使保护拒动。

在整流侧换流阀短路时,当故障发生换流变压器保护区域内,换流变压器的二次谐波与基波比值较大。此时,相当于换流变出口的两相或三相短路,流过的电流较大,很容易引起换流变压器铁心和 CT 的饱和,这种情况下由于谐波含量比较大(尤其是二次谐波),换流变压器比例差动保护很容易受到励磁涌流判据的闭锁而不能出口。造成保护拒动。

对于换流变压器内部故障和整流侧换流阀短路故障时谐波含量高引起的保护拒动,特别对于受到

励磁涌流判据闭锁的原因引起的拒动,可以考虑进一步改善判据来避免保护的拒动,比如增大保护整定值的方法。当然这还有待进一步的研究来提高换流变压器继电保护的可靠性。

参考文献

- [1] 肖燕彩,文继锋,袁源,等.超高压直流系统中的换流变压器保护[J].电力系统自动化,2006,30(9).
XIAO Yan-cai,WEN Ji-feng,YUAN Yuan, et al.Protection of Converter Transformer in HVDC[J].Automation of Electric Power Systems,2006,30(9).
- [2] 杨汾艳,徐政.直流输电系统典型暂态响应特性分析[J].电工技术学报,2005,20(3):46-52.
YANG Fen-yan,XU Zheng.Typical Transient Responses in HVDC Transmission System[J].Transactions of China Electrotechnical Society,2005,20(3):46-52.
- [3] 夏道止,沈赞坝.高压直流输电系统的谐波分析和滤波[M].北京:水利电力出版社,1994.
XIA Dao-zhi,SHEN Zan-xun.The Harmonic Analysis and Filtering of HVDC Transmission System[J].Beijing:Hydraulic and Electric Power Press,1994.
- [4] 直流输电.浙江大学发电教研组直流输电教研组[M].北京:电力工业出版社,1982.
HVDC.Zhejiang University HVDC Research Center[M].Beijing:Electrical Industrial Press,1982.
- [5] 赵晓君.高压直流输电工程技术[M].北京:中国电力出版社,2004
ZHAO Wan-jun.The Engineering Technology of HVDC Transmission[M].Beijing:China Electric Power Press,2004.
- [6] 李达义,陈乔夫,贾正春.基于 Matlab 中 FFT 函数的电力谐波分析方法[J].电测与仪表,2002,39(7).
LI Da-yi,CHEN Qiao-fu,JIA Zheng-chun. Harmonic Analysis of Electrical Power System Based on Matlab[J].Electrical Measurement and Instrumentation,2002,39(7).
- [7] Szechtman M,Wess T, Thio C V. A Benchmark Model for HVDC System Studies[A]. In:International Conference O11 AC and DC Power Transmission[C].1991.374-378.
- [8] 戴熙杰.直流输电基础[M].北京:水利电力出版社,1990.
DAI Xi-jie.DC Transmission Base[M].Beijing:Hydraulic and Electric Power Press,1990.

收稿日期:2008-07-03; 修回日期:2008-08-12

作者简介:

乔小敏(1982-),女,硕士研究生,主要研究电力系统自动化、电力系统继电保护方向;E-mail:qiaoxiaomin2008@163.com

王增平(1964-),男,教授,博士生导师,主要研究领域为电力系统自动化、继电保护、变电站综合自动化等;

文俊(1963-),女,副教授,从事高压直流输电系统运行分析与规划的研究与教学工作。