

整流侧交流系统故障对高压直流输电系统的影响

张海凤, 朱韬析

(中国南方超高压输电公司广州局, 广州 广东 510405)

摘要: 针对交直流系统并联运行时二者相互影响的问题, 以天广直流输电工程和整流侧交流系统故障的事故为基础, 利用 Matlab 对整流过程做数学仿真, 并采用傅立叶变换分析仿真结果, 从理论的角度阐明了整流侧交流故障时直流电压和电流出现大量二次谐波的原因, 这有利于采取相应的保护和控制措施, 减小谐波的影响和危害; 对更深入的研究交直流并联系统的运行和控制、更有效地处理交直流系统之间的相互影响, 也有一定的帮助。

关键词: 直流输电; 整流侧; 交流系统故障; 谐波

Influence of rectifier AC fault on HVDC transmission system

ZHANG Hai-feng, ZHU Tao-xi

(Guangzhou Bureau, CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510405, China)

Abstract: This paper is based on Tian-Guang HVDC transmission project and AC fault took place on the rectifier side recently, and uses Matlab to simulate the convert process. The result which is analyzed through Fourier transform could illustrate why DC voltage and current contain vast 100Hz harmonics during rectifier AC fault. The conclusion is useful to take corresponding and effectual step of control and protection to reduce the influence of harmonics, and helpful to deeper research in AC/DC hybrid transmission system.

Key words: HVDC; rectifier; AC fault; harmonic

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)15-0024-04

0 引言

南方电网是中国首个长距离、大容量送电的交直流并联运行电网。2000年12月26日, 天广直流输电工程极 I 投运, 标志着我国第一个交直流并联电网正式形成。目前, 随着高肇直流输电工程、天广四回相继投产, 南方电网在东西方向已经形成了“六交两直”的交直流并列运行模式。“十一五”西电东送期间, 主网架还将重点建设云南—广东±800 kV、贵广二回直流输电等工程。作为世界上少有的交直流混合和直流多落点电网, 南方电网的安全运行, 将面临着更多的问题与挑战^[1]。

进入2006年迎峰度夏期以来, 天广直流输电系统于6月22号、7月10号连续发生两次因整流侧交流故障导致闭锁的事故。根据故障录波图发现, 故障瞬间, 直流电压和电流中均含有大量二次谐波分量, 但西门子资料及国内各种文献对这一现象的产生原因均语焉不详。

本文介绍了交直流输电系统之间的相互影响, 主要以天广直流输电系统出现的一次因整流侧交流

故障而导致跳闸的事故为例, 利用 Matlab 对整流过程做数学仿真, 并根据傅立叶变换分析仿真结果, 从理论上解释了整流侧交流故障时, 直流系统出现大量二次谐波的原因, 这有利于采取相应的应对措施使交直流系统协调配合, 减小谐波的影响和危害; 对更深入地研究交直流并列系统的运行和控制、更有效地处理交直流系统之间的相互影响, 也有一定的帮助。

1 交直流并联运行系统的特点

直流输电的功率调节迅速而灵活, 其本身不存在同步运行的稳定性问题且不会增加交流系统的短路容量, 因而被认为是较理想的超高压、远距离输电方式^[2]。但直流系统的故障率相对较高, 交直流并列运行方式, 就可以避免直流单极闭锁引起的频繁切机, 减少窝电和弃水; 而利用直流输电自身所具有的调节快速性、灵活性, 又能有效地提高整个系统的暂态和动态稳定性^[3]。

但交直流并联运行也存在交直流系统相互影响的问题。尤其是南方电网西电东送主网架呈现“强

直流、弱交流”的特点:直流输电的比例较大,而与其并联运行的交流系统相对较弱,发生直流系统故障时,可能由于大范围的功率转移引起功角稳定、电压稳定破坏^[1],这在一定程度上影响系统的安全稳定和输电通道能力的发挥。同样,对于多馈入直流系统,交流故障不能及时切除也可能导致多条直流同时闭锁,造成系统稳定破坏^[1]。

交流系统故障对直流系统的影响,最常见的就是导致换流器换相失败,逆变侧交流系统的故障是造成逆变站换相失败的主要原因^[4]。据统计,进入2006年迎峰度夏期以来,天广直流因逆变侧交流系统故障便发生了三次换相失败。

2 直流系统整流侧交流故障过程简介

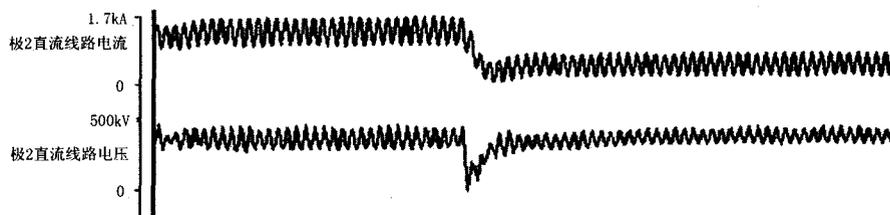


图1 整流侧交流系统故障瞬间的直流电压和电流的暂态录波图

Fig.1 Transient fault record of DC voltage and current for rectifier AC fault

整流侧交流故障瞬间,直流电压和电流中为什么会出现大量的二次谐波分量?对此,外方资料^[10]仅简单说明“当交流系统出现单相故障时,直流电压和电流中出现100 Hz分量”;文献[11]介绍:在整流侧交流系统发生故障的瞬间,直流电流和直流电压的谐波分量都不大;文献[12]则简单介绍当整流器交流侧发生单相故障时,直流系统中会出现不少非特征谐波,以2次谐波的幅值最为显著,但都没有阐明其形成原因。

谐波对电力系统的影响和危害十分严重,可能会产生局部的并联或串连谐振,放大谐波分量,并因此增加由于谐波所产生的附加损耗和发热,可能造成设备故障;谐波的存在,还会增加系统中元件的附加谐波损耗,降低发电、输电及用电设备的使用效率;同时,谐波将使电力设备元件加速绝缘老化,缩短使用寿命^[2];而且,直流电压和电流中的谐波,还将导致换流站的交流系统产生相应的谐波^[12]。

所以,我们必须对整流侧发生交流单相故障时直流系统产生大量二次谐波的原因进行分析,以便采取有效的应对措施,减小谐波的影响和危害。

3 整流侧发生单相故障时直流系统产生二次谐波的原因分析

国内外学者对直流系统逆变侧交流故障的影响做出了大量的研究结论^[5~9],但整流侧交流系统故障可能造成的后果,却缺乏深入的研究。

2006年6月22号,因天广直流整流侧一500 kV变电站开关单相发生绝缘击穿事故,造成整流侧交流电压发生严重畸变,导致天广直流天生桥换流站双极换流变中性点零序过流保护和基频保护(100 Hz)动作,直流系统双极闭锁。这是天广直流投运至今第一次发生因整流侧交流系统故障直接导致直流系统闭锁,根据故障暂态录波图(见图1)可以较直观地发现,故障瞬间,直流电压和电流中均出现了较大的二次谐波分量。

为了便于分析,采用了以下假设条件:

- 1) 正常情况下,交流电压是三相对称、平衡的正弦电压,除了基波以外,没有任何谐波分量;
- 2) 三相中换相电感相等,每一次换相的时间相等;
- 3) 暂不考虑控制系统的调节作用。

结合天广直流输电工程的参数^[12],利用Matlab仿真如下:

3.1 换流装置直流侧产生的特征谐波

天广直流系统整流侧交流侧额定电压为230/ $\sqrt{3}$ kV,换流变星形绕组和角形绕组额定电压分别为208.6/ $\sqrt{3}$ kV和208.6 kV,故正常情况下整流侧交流系统相电动势的瞬时值为:

$$e_a = 230\sqrt{\frac{2}{3}} \sin(100\pi t + \pi/6)$$

$$e_b = 230\sqrt{\frac{2}{3}} \sin(100\pi t - \pi/2)$$

$$e_c = 230\sqrt{\frac{2}{3}} \sin(100\pi t + 5\pi/6)$$

经过Y/Y/ Δ 换流变压器后,星侧的相电压瞬时值为:

$$e_{aY} = 208.6\sqrt{\frac{2}{3}}\sin(100\pi t + \pi/6)$$

$$e_{bY} = 208.6\sqrt{\frac{2}{3}}\sin(100\pi t - \pi/2)$$

$$e_{cY} = 208.6\sqrt{\frac{2}{3}}\sin(100\pi t + 5\pi/6)$$

三角侧的相电压瞬时值为:

$$e_{aD} = 208.6\sqrt{\frac{2}{3}}\sin 100\pi t$$

$$e_{bD} = 208.6\sqrt{\frac{2}{3}}\sin(100\pi t - 2\pi/3)$$

$$e_{cD} = 208.6\sqrt{\frac{2}{3}}\sin(100\pi t + 2\pi/3)$$

经过整流装置(设触发角为额定触发角,为 15°)后,直流电压波形如图2所示。

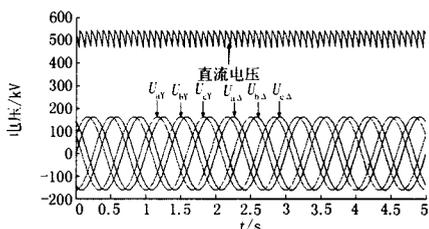


图2 正常情况下的阀侧交流电压和直流电压波形

Fig.2 AC voltage of valve and DC voltage

利用傅立叶变换,分析直流电压所含的谐波^[2],结果如图3所示。

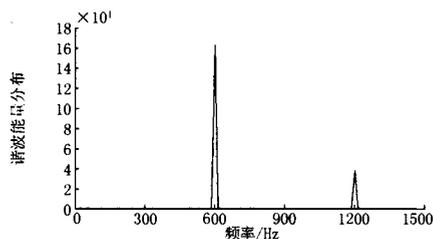


图3 正常情况下直流电压的谐波频谱图

Fig.3 Frequency content of DC voltage

很明显,此时直流电压中存在的谐波分量为12次、24次、……谐波,这与文献^[2]的结论也是一致的。

3.2 整流侧交流系统发生单相故障时直流电压中的谐波分量分析

不妨假设整流侧交流系统C相发生故障,文献^[12]介绍:在与天广直流输电系统整流侧换流母线相连的线路上发生接地故障时,换流母线电压将会下降10%到20%,而只有在换流母线附近发生低阻抗

接地故障时,换流母线电压才会下降至接近于0,而发生此类故障的机率微乎其微。因此,不妨假设C相发生了单相故障,故障瞬间C相电压下降20%,变为:

$$e_c = 184\sqrt{\frac{2}{3}}\sin(100\pi t + 5\pi/6)$$

此时阀侧A、B相电压基本保持不变,C相电压对应变为:

$$e_{cY} = 168.88\sqrt{\frac{2}{3}}\sin(100\pi t + 5\pi/6)$$

$$e_{cD} = 168.88\sqrt{\frac{2}{3}}\sin(100\pi t + 2\pi/3)$$

经整流装置后,直流电压波形如图4所示。

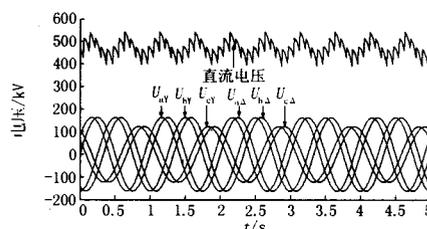


图4 整流侧交流系统单相故障时的阀侧交流电压和直流电压波形

Fig.4 AC Voltage of valve and DC voltage for single-phase rectifier AC fault

利用傅立叶变换,分析此时直流电压所含的谐波^[2],结果如图5所示。

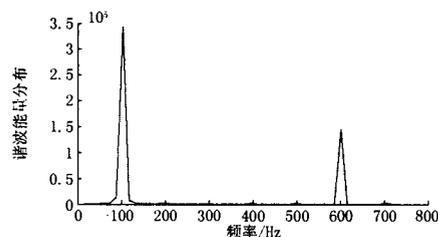


图5 整流侧交流系统单相故障时直流电压的谐波频谱图

Fig.5 Frequency content of DC voltage for single-phase rectifier AC fault

显然,此时直流电压中含有较大的二次谐波分量;根据文献^[2]可知,此时直流电流中也相应地含有较大的二次谐波电流,这与事故现象也比较吻合。

5 结论

1) 本文以2006年天广直流输电系统因整流侧交流系统故障而导致直流系统闭锁的事故过程为基础,利用Matlab模拟整流器换流过程,通过对仿真

结果的傅立叶分析,从理论的角度阐明了整流侧交流故障时直流电压和电流中出现大量二次谐波的原因,这有利于采取相应的保护和控制措施,减小谐波的影响和危害;有助于确保研究交直流并列系统安全稳定运行。

2)交流系统故障如主保护拒动或断路器失灵时,直流系统100 Hz保护可能动作,将引发单回或多回直流系统同时降功率甚至闭锁,对整个电网造成灾难性后果。所以,首先应根据电网结构,研究哪些厂站发生故障可能会对直流输电系统造成重大影响,然后重点加强对其断路器及主保护的运行维护工作,严防误动、拒动;其次,应更合理地设置交直流保护动作时间、优化交直流保护的配合,在发生交流系统故障时,可以尽可能地防止多回直流系统同时降功率或闭锁,又避免对直流设备造成影响。

参考文献

- [1] 袁懋振.南方交直流混合电网的发展与挑战[A].亚太地区IEEE/PES输配电国际会议上的报告[C].2005.
- [2] 浙江大学发电教研组直流输电教研组.直流输电[M].北京:水利电力出版社,1985.
- [3] 郭强,张运洲,吕健.我国未来同步电网构建研究[J].电网技术,2005,29(22):14-18.
GUO Qiang, ZHANG Yun-zhou, LU Jian. Study on Scheme for Structure and Construction of Synchronous Power Grid in China from 2010 to 2020[J]. Power System Technology,2005, 29(22):14-18.
- [4] 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,2005,29(22):14-18.
YANG Fen-yan, XU Zheng. Typical Transient Responses in HVDC Transmission System[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005,29(22):14-18.
- [5] 洪潮,饶宏.南方电网直流多落点系统实时仿真研究[J].中国电机工程学报,2005,25: 29-35.
HONG Chao, RAO Hong. Real Time Simulation Studies of China Southern multi-Infeed HVDC System[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25: 29-35.
- [6] 陈树勇,李新年,余军,等.基于正余弦分量检测的高压直流换相失败预防方法[J].中国电机工程学报,2005,25(14):1-6.
CHEN Shu-yong, LI Xin-nian, YU Jun, et al. A Method Based on the Sin-Cos Components Detection Mitigates Commutation Failure in HVDC[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(14): 1-6.
- [7] 徐政,蔡晔,刘国平.大规模交直流电力系统仿真计算的相关问题[J].电力系统自动化,2002, 26(15): 4-8.
XU Zheng, CAI Ye, LIU Guo-ping. Some Problems in the Simulation of Large-scale AC/DC Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2002, 26(15): 4-8.
- [8] Thio C V,Davies J B,Kent K L. Commutation Failures in HVDC Transmission Systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery,1996,11(2): 946-957.
- [9] Kristmundsson G M,Carroll D P. The Effect of AC Systems Frequency Spectrum on Commutation Failure in HVDC Inverter[J].IEEE Trans on Power Delivery, 1990,5(2): 1121- 1128.
- [10] 天广直流输电工程换流变压器维护手册[Z].1999.
Tian-Guang HVDC Transmission Project Maintenance Manual of Converter Transform[Z]. 1999.
- [11] 黄方能,梁小冰.直流输电系统在交流故障下的谐波分析[J].广西电力, 2000,(4): 1-5.
HUANG Fang-neng, LIANG Xiao-bing. The Analysis of Harmonic HVDC System During AC-Side Fault[J]. Guangxi Electric Power, 2000,(4): 1-5.
- [12] 黄方能,梁小冰,顾南峰.天广交直流并联输电系统的谐波分析[J].广西电力, 2002,(3): 1-9.
HUANG Fang-neng, LIANG Xiao-bing, GU Nan-feng, et al. Harmonic Analysis in Parallel Operation of TSQ-GBJ HVDC/AC Transmission System[J]. Guangxi Electric Power, 2002,(3): 1-9.

收稿日期:2006-10-30; 修回日期:2007-04-29

作者简介:

张海风(1976-),男,工程师,从事高压直流系统技术管理工作; E-mail:zhanghaifeng@spsc.com.cn

朱韬析(1980-),助理工程师,从事直流输电运行工作。
E-mail:taoxi_zhu@hotmail.com

(上接第17页 continued from page 17)

- [8] 王建学,王锡凡,张显,等.电力备用市场的竞价模型[J].电力系统自动化,2003,27(2):7-11.
WANG Jian-xue,WANG Xi-fan,ZHANG Xian,et al.Bidding model of reserve capacity in electricity market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003,27(2):7-11.
- [9] 曹世光,杨以涵,于尔铿.缺电成本及其估算方法[J].电网技术,1996,20(11):72-74.
CAO Shi-guang,YANG Yi-han,YU Er-keng.Power Outage Cost and Its Estimation[J].Power System

Technology, 1996,20(11):72-74.

收稿日期:2006-12-08; 修回日期:2007-01-31

作者简介:

丁明(1956-),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统安全经济运行、规划、可靠性; E-mail:mingding@mail.hf.ah.cn

安玲(1978-),女,硕士研究生,研究方向为电力市场、电力系统规划及可靠性;

齐先军(1977-),男,讲师,研究方向为电力市场、电力系统规划及可靠性。