

DOI: 10.7667/PSPC161224

基于广义变比的换流站集成保护新方法

金恩淑¹, 许晶², 金雨薇¹, 张恺¹, 李登¹

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 国网吉林省电力有限公司吉林供电公司, 吉林 吉林 132011)

摘要: 随着交直流混联输电技术的发展, 换流站保护的研究日益重要。根据换流站交流母线电压和换流器输出直流电压之间的换流关系, 定义了广义变比, 提出了基于广义变比的换流站集成保护新方法。该方法运用集成保护的思想对换流站进行区域划分, 利用广义变比实现换流元件异常或故障的实时在线监测, 并根据换流变压器阀侧套管 CT 电流特征进行故障元件的准确定位。通过故障分析和 EMTDC/PSCAD 仿真验证, 保护在换流元件各种故障情况下均能正确动作。

关键词: 集成保护; 换流站; 广义变比

A new method based on generalized ratio of converter station integrated protection

JIN Enshu¹, XU Jing², JIN Yuwei¹, ZHANG Kai¹, LI Deng¹

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;

2. Jilin Power Supply Company of State Grid Jilin Electric Power Co., Ltd., Jilin 132011, China)

Abstract: With the development of AC and DC hybrid transmission technology, research on the protection of converter is becoming more and more important. According to the commutation relation between bus voltage of converter station and the output DC voltage of converter. The generalized ratio is defined, and a new method of converter station integrated protection based on generalized ratio is proposed. This method uses the idea of integrated protection to divide the converter station into regions. The generalized ratio is used to achieve real-time online monitoring of fault element anomalies and failures. And in accordance with CT current characteristics of the valve side of converter transformer bushing CT, it can accurately locate the fault current signature element. Through failure analysis and EMTDC/PSCAD simulation, protection under various fault conditions commutation element can operate correctly.

Key words: integrated protection; converter station; generalized ratio

0 引言

随着“西电东送, 南北互供, 全国联网”电网发展战略的全面实施, 这种交直流并重的输电模式, 其工作机理、运行方式、故障电气特征与传统交流电力系统有很大差异^[1-4]。交直流混联系统中换流变压器和换流器是电能系统中实现交流与直流间进行转换的节点, 其可靠安全运行也是直流输电系统安全稳定运行的基础。

目前, 换流变压器和换流器主保护均为电流差动保护。由于换流器是非线性元件, 对交流侧来说是主要的谐波电流源, 使换流变压器差动保护在正常情况要承受较大的谐波电流, 从而对其励磁涌流

和 CT 互感器饱和判据产生很大影响^[5-7]。同时两侧交流系统故障时出现的低电压特征以及电流失衡, 引发直流保护误动, 导致直流闭锁等事故时有发生^[8]。由于换流变差动保护和换流器差动保护只在时限上配合, 而整定值之间并无配合, 当出现交直流暂态入侵时, 可能引起换流器保护与换流变压器保护之间权责不清^[9-11], 因此有必要将两个元件进行整体的保护整定与性能分析。

电力系统集成保护可以实现信息的高度共享和高效的计算方法, 使保护处于最佳状态。将集成保护的思想运用在特高压直流输电系统换流站中, 可提高直流输电的可靠性。目前, 学者主要针对各种直流输电工程控制保护系统通用水平较差的问题, 开发了一种新型适用于多种直流输电工程的换流站通用集成控制保护平台^[12], 但该平台仅实现了控制的集成, 并未实现元件保护的集成。

基金项目: 国家重点研发计划智能电网技术与装备重点专项 (2016YFB0900600)

本文由设备元件的角度出发, 划分换流站集成保护区, 提出一种基于广义变比的换流站集成保护新方法。该方法不仅能够正确判断集成保护区内外故障, 且能够实现故障元件的准确定位, 有选择性地切除故障, 从而提高直流输电系统的供电可靠性。

1 换流站集成保护区划分

1.1 UHVDC 高压直流系统结构

±800 kV 特高压直流输电系统主要由换流站(整流站、逆变站)和直流输电线路组成, 为两端双极系统, 其结构如图 1 所示。

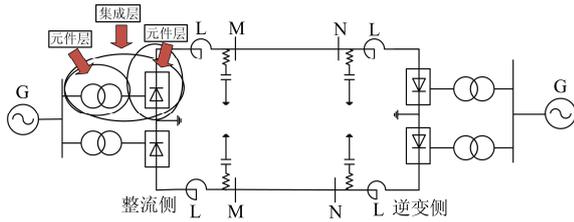


图 1 高压直流输电系统

Fig. 1 HVDC transmission system

换流站每极由两个 12 脉动换流器串联组成, 每个 12 脉动换流器电压等级为 400 kV, 每极中任何一个 12 脉动换流器退出运行, 均不影响剩余换流器构成不完整的单极运行。整流侧换流变压器额定容量 760 MVA, 额定电压为 525 kV/170 kV, 接线方式分别为 Y/Y、Y/Δ。

1.2 换流站集成保护区划分

本文以换流变压器和换流器构成集成保护区, 保护区分为两层, 分别为集成层和元件层。如图 1 所示, 换流变压器以及所连接的六脉动换流器划分为集成层, 定义为换流区; 换流变压器、六脉动换流元件划分为元件层。

2 基于广义变比的换流站集成保护新方法

2.1 广义变比的定义

整流站高压桥换流保护区如图 2 所示, 根据 12 脉动可控硅晶闸管元件的三相桥式整流电路, 可得换流器出口直流电压 U_d 与换流变压器阀侧电压 U_2 的关系如式(1)一式(3)所示。

$$U_d = 2 \times \frac{3}{\pi} \int_{\frac{1}{3}\pi+\alpha}^{\frac{2}{3}\pi+\alpha} \sqrt{6}U_{2a} \sin(\omega t) d(\omega t) = 2 \times 2.34U_{2a} \cos \alpha \quad (1)$$

$$U_d = 2 \times \frac{3}{\pi} \int_{\frac{1}{3}\pi+\alpha}^{\frac{2}{3}\pi+\alpha} \sqrt{6}U_{2b} \sin(\omega t) d(\omega t) = 2 \times 2.34U_{2b} \cos \alpha \quad (2)$$

$$U_d = 2 \times \frac{3}{\pi} \int_{\frac{1}{3}\pi+\alpha}^{\frac{2}{3}\pi+\alpha} \sqrt{6}U_{2c} \sin(\omega t) d(\omega t) = 2 \times 2.34U_{2c} \cos \alpha \quad (3)$$

式中, α 为换流器导通角。

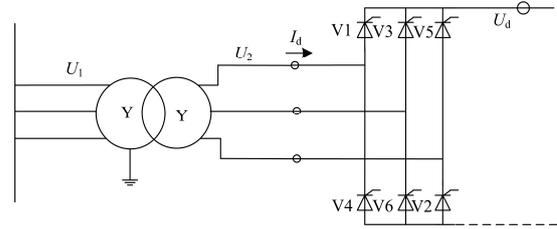


图 2 整流站高压桥换流保护区

Fig. 2 High-voltage bridge converter protection areas

在非内部故障情况下, 换流变压器一次侧电压 U_1 与其二次侧电压(阀侧电压) U_2 之比等于变压器变比 K_T , 如式(4)一式(6)所示。

$$K_{Ta} = \frac{U_{1a}}{U_{2a}} \quad (4)$$

$$K_{Tb} = \frac{U_{1b}}{U_{2b}} \quad (5)$$

$$K_{Tc} = \frac{U_{1c}}{U_{2c}} \quad (6)$$

在换流区非内部故障情况下, 由式(1)一式(6)可得, 换流变压器的一次侧电压 U_1 与换流器出口直流电压 U_d 之间的关系如式(7)一式(9)所示。

$$\frac{U_{1a}}{U_d} = \frac{K_{Ta}}{2 \times 2.34 \times \cos \alpha} \quad (7)$$

$$\frac{U_{1b}}{U_d} = \frac{K_{Tb}}{2 \times 2.34 \times \cos \alpha} \quad (8)$$

$$\frac{U_{1c}}{U_d} = \frac{K_{Tc}}{2 \times 2.34 \times \cos \alpha} \quad (9)$$

令 $K=U_1/U_d$, 定义 K 为广义变比。

换流区非内部故障时, 考虑特高压直流输电系统实际运行时 $\alpha=0^\circ$, 以及换流变压器实际变比, 广义变比 K 为常数, 表示为 K_c , 如式(10)所示。

$$K_c = \frac{U_1}{U_d} = 0.660 \quad (10)$$

低压桥广义变比同理可得。

2.2 集成层故障判别

定义综合误差 δ 如式(11)一式(13)所示。

$$\delta = \frac{U_{1a} - KU_d}{U_1} \quad (11)$$

$$\delta = \frac{U_{1b} - KU_d}{U_1} \quad (12)$$

$$\delta = \frac{U_{1c} - KU_d}{U_1} \quad (13)$$

根据基尔霍夫电流定律可知,当换流区正常运行或外部故障(除换流器出口故障外)时,由于式(10)始终成立,即 $U_1 \approx K \times U_d$, 则 δ 近似为 0。

当换流区出口故障时,由于 U_d 降为 0,导致式(10)不成立,但由式(11)一式(13)可得此时 $\delta=1$ 。

当换流区内部故障时,显然式(11)一式(13)不再成立。但由于 U_d 始终大于 0,因此 δ 应处于 0~1。

根据上述分析可知,利用综合误差 δ 的大小可以正确判断换流区内外故障。

考虑到电流互感器误差,以及计算换流变压器变比时忽略漏抗产生压降, h_1 取 0.1。

通过上述原理可以判断换流区故障,但无法判断是换流器还是换流变压器发生的故障,因此需要进行进一步故障元件定位。

2.3 元件层故障定位

如图 2 所示, I_d 为换流变压器阀侧套管 CT 电流,换流元件正常运行时, I_d 为共阴极及共阳极换流阀组电流和。当 Y/Y 换流变压器发生故障时, I_d 仅为共阴极组换流阀组电流,即降为额定电流的一半;而当换流器发生故障时, I_d 剧增为额定电流的几倍甚至十几倍。

因此可利用 I_d 大小准确定位故障元件,即若满足式(14)一式(16),则判为换流器故障,否则判为换流变压器故障。

$$I_{da} > h_2 \quad (14)$$

$$I_{db} > h_2 \quad (15)$$

$$I_{dc} > h_2 \quad (16)$$

工程上通常将 h_2 取为额定电流。其原理框图如图 3 所示。

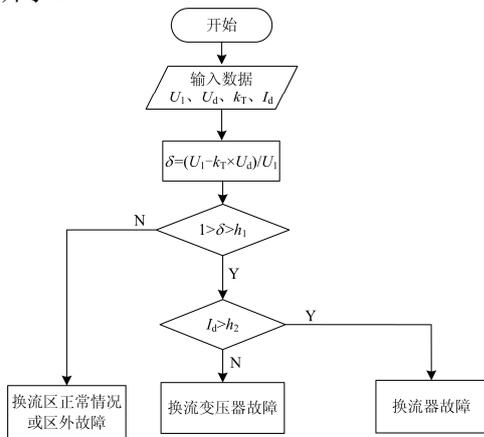


图 3 原理框图

Fig. 3 Protection logic scheme

3 仿真验证

运用 PSCAD 仿真软件,建立图 1 所示的 ± 800 kV 双极直流输电系统仿真模型。其控制系统参照模型主要包括定电流控制、定电压控制及定功率控制。由于控制系统从接收到调节指令至一次电流发生变化的固有延迟在 5 ms 以上。因为本文时间窗长度选为 5 ms,可忽略控制系统的影响^[13]。输送功率为 5000 MW,额定电流为 3.125 kA,输送距离为 2000 km,两极直流线路采用同杆并架,直流输电线路采用 6 分裂钢芯铝绞线,额定横截面积为 630 mm², $R = 14.97 \Omega$ 。输电线路压降计算: $dU = I_N R = 3.125 \times 14.97 = 46.78$ kV。故障时刻为 40 ms。本文仅给出 A 相仿真结果。

3.1 换流区正常运行

当换流区正常运行,分别给出换流器出口直流电压 U_d (如图 4 电压曲线虚线所示)以及换流变压器一次侧电压 U_1 (图 4 实线所示)、综合误差 δ 以及换流变压器阀侧套管 CT 电流 I_d 、保护的动作用输出信号如图 4 所示。

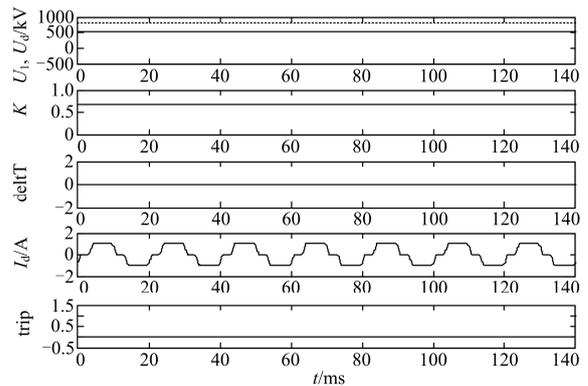


图 4 换流区正常运行

Fig. 4 Normal operation of converter area

由图 4 可知,当换流区正常运行时, U_1 与 U_d 之比即广义变比近似为常数 K_C , 综合误差 δ 为 0, I_d 为额定电流,保护可靠不动作。

3.2 换流区内部故障

3.2.1 换流器故障

共阴极组换流阀 V1 短路故障(见图 2)时, U_1 、 U_d 、综合误差 δ 以及 I_d 波形如图 5 所示。

由图 5 可知,当换流器发生故障时,直流电压 U_d 和换流变压器一次侧电压 U_1 均下降,广义变比 K 增大,误差综合值 δ 增大,超过阈值 h_1 ,判断为换流区内部故障;由于 I_d 剧增,近似为额定电流的 16

倍, 判断为换流器故障, 保护在故障后 2 ms 动作。

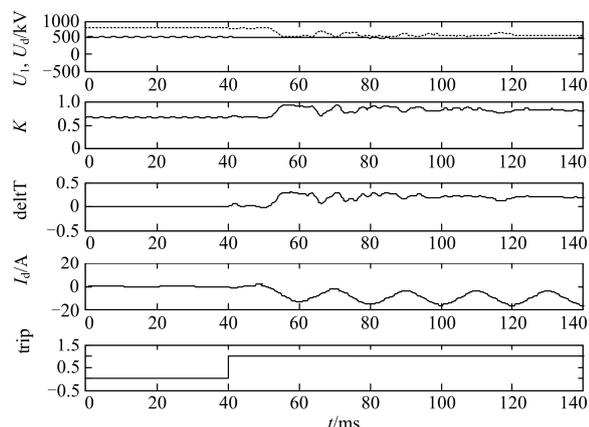


图 5 换流器故障

Fig. 5 Converter fault

3.2.2 换流变压器故障

换流变压器一次侧发生 A 相接地故障时, U_1 、 U_d 、综合误差 δ 以及 I_d 波形如图 6 所示。

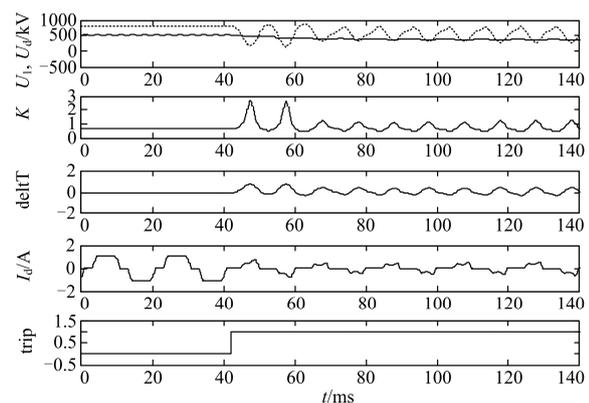


图 6 换流变压器故障

Fig. 6 Converter transformer fault

由图 6 可知, 当换流变压器发生故障, 换流变压器一次侧电压 U_1 下降, 由于交流功率穿越^[14-15], 直流电压 U_d 波形为衰减正弦波形, 广义变比增大, 综合误差 δ 增大, 超过阈值 h_1 , 判断为换流区内部故障; 而换流变压器阀侧套管 CT 电流降为额定电流的一半, 判断为换流变压器故障, 保护在故障后 3 ms 可靠动作。

各种故障类型的综合误差 δ 范围以及保护动作情况如表 1 所示。

由上述分析可知, 当换流区内部故障时, 广义变比不再为常数 K_c , 综合误差值 δ 均增大, 集成保护能够正确可靠动作且实现故障元件的准确定位, 均在故障发生 5 ms 内迅速动作。

表 1 各种故障类型分析

Table 1 Failure analysis of various types		
故障类型	综合误差 δ 范围	保护动作情况
换流变压器单相接地故障(A相)	0.76~0.2	动作
换流变压器相间故障(AB两相)	0.29~0.12	动作
共阴极换流阀故障(VT1、VT3、VT5)	0.3~0.14	动作
共阳极换流阀故障(VT2、VT4、VT6)	0.3~0.14	动作
换流区外部故障	0	不动作

4 结论

本文根据换流站交流母线电压和换流器输出直流电压之间的换流关系, 以及换流变压器阀侧套管 CT 电流特征, 提出基于广义变比的换流站集成保护新方法。该方法可实现换流元件异常或故障的实时在线监测, 并进行故障元件的准确定位。大量仿真结果表明, 该方法简单, 故障特征明显, 在各种工况下, 均能快速、灵敏、可靠动作, 从而提高特高压直流输电系统的供电可靠性。

参考文献

- [1] 李晓华, 蔡泽祥, 黄明辉, 等. 交直流电网故障暂态功率倒向解析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10): 61-66. LI Xiaohua, CAI Zexiang, HUANG Minghui, et al. Transient power converse in an AC/DC interconnected power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(10): 61-66.
- [2] 曾宪刚, 王志滨, 吕伟权. 交直流混合系统中交流故障对直流的影响分析[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 29-32. ZENG Xiangang, WANG Zhibin, LÜ Weiquan. Analysis on influence of AC system fault in AC/DC hybrid system on HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 29-32.
- [3] 李兆伟, 翟海保, 刘福锁, 等. 多馈入交直流混联受端电网直流接入能力研究评述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 142-148. LI Zhaowei, ZHAI Haibao, LIU Fusuo, et al. DC access capability study for multi-infeed HVDC power transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 142-148.
- [4] 董飞飞. 特高压输变电技术的现状分析和发展趋势研究[J]. 陕西电力, 2016, 44(11): 1-3. DONG Feifei. Research on situation and development trend of UHV power transmission and transformation technology[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(11): 1-3.
- [5] 乔小敏, 王增平, 文俊. 高压直流输电中谐波对换流

- 变压器差动保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(10): 111-114.
- QIAO Xiaomin, WANG Zengping, WEN Jun. Influence of converter transformer differential protection by harmonic in HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(10): 111-114.
- [6] 刘剑, 范春菊, 邵能灵. 考虑直流控制系统影响的 HVDC 输电线路后备保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 73-80.
- LIU Jian, FAN Chunju, TAI Nengling. Backup protection research for HVDC transmission line considering the impact of DC control system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 73-80.
- [7] 马成廉, 潘文明, 姚天亮, 等. VSC-HVDC 在交流电网非故障时的控制策略研究[J]. 东北电力大学学报, 2015, 35(6): 27-32.
- MA Chenglian, PAN Wenming, YAO Tianliang, et al. Research on control strategy of VSC-HVDC in AC power grid[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2015, 35(6): 27-32.
- [8] 李佳曼, 蔡泽祥, 李晓华, 等. 直流系统保护对交流故障的响应机理与交流故障引发的直流系统保护误动分析[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 953-960.
- LI Jiaman, CAI Zexiang, LI Xiaohua, et al. Response mechanism of UHVDC system protection to faults in UHVDC system and analysis on malfunction of UHVDC protection caused by faults in UHVDC system[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 953-960.
- [9] 徐敏, 蔡泽祥, 韩昆仑, 等. 交直流混联电网中交流暂态侵入对直流继电保护的影响分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3618-3625.
- XU Min, CAI Zexiang, HAN Kunlun, et al. Influence analysis of AC system transient invasion on DC protective relaying in AC/DC hybrid power system[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3618-3625.
- [10] 何竟松, 彭光强, 王学之, 等. 高压直流变压器中直流电源故障诊断方法的改进研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 33(1): 8-12.
- HE Jingsong, PENG Guangqiang, WANG Xuezhi, et al. Improvement of fault diagnosis method for DC power supply in high voltage DC transformer[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 33(1): 8-12.
- [11] 傅旭, 杨欣, 苗淼, 等. 青海交直流混合送端电网暂态稳定性分心[J]. 陕西电力, 2016, 44(9): 20-25.
- FU Xu, YANG Xin, MIAO Miao, et al. Study on the transient stability of hybrid sending systems in qinghai power grid[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(9): 20-25.
- [12] 胡静, 赵成勇, 赵国亮, 等. 换流站通用集成控制保护平台体系结构[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(22): 133-140.
- HU Jing, ZHAO Chengyong, ZHAO Guoliang, et al. System architecture of a universal integrated control and protection platform for converter stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(22): 133-140.
- [13] 束洪春, 张斌, 张广斌, 等. 基于可拓融合的 ± 800 kV 直流输电线路雷击干扰识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(7): 102-111.
- SHU Hongchun, ZHANG Bin, ZHANG Guangbin, et al. Identification of lightning disturbance in UHVDC transmission lines using extension theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(7): 102-111.
- [14] 刘毅力, 贾轩涛, 戴国安, 等. 永仁-富宁直流工程三种功率输送方式自动转换顺序控制及影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 139-146.
- LIU Yili, JIA Xuanta, DAI Guoan, et al. Analysis of auto-sequence control and influence of three power transmission modes in Yongren-Funing HVDC Project[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 139-146.
- [15] 郭琦, 徐东旭, 林雪华, 等. CDSM-MMC 直流侧故障隔离原理及重启动策略[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(8): 7-12.
- GUO Qi, XU Dongxu, LIN Xue hua, et al. Principle of the DC side fault isolation and its restart strategy for CDSM-MMC[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(8): 7-12.

收稿日期: 2016-08-04; 修回日期: 2016-11-15

作者简介:

姜恩淑(1972—), 女, 博士, 研究方向为电力系统保护方向; E-mail: jes222@aliyun.com

许晶(1992—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护。E-mail: 1554051887@qq.com

(编辑 姜新丽)