

# 特高压直流保护逻辑元件对保护特性的影响研究

李豹, 熊双成, 李金安, 赖桂森

(中国南方电网超高压输电公司广州局, 广东 广州 510405)

**摘要:** 为了研究特高压直流保护逻辑元件对保护特性的影响, 针对保护的硬件构成, 分析了信号处理回路数字滤波器的滞后效应和保护判据出口元件的积分累积效应, 对逻辑元件的工作原理进行了说明。结合实际故障案例论述其对保护特性的影响, 研究了通过修改逻辑元件内部配置以改善其工作特性的优化措施。通过对以往故障波形进行回放, 验证了逻辑元件的工作特性得到了改善, 保护没有发生误动作, 可靠性得到了提高。部分优化措施已经在工程实践中得到应用, 对直流系统运行维护和后续工程设计有一定参考意义。

**关键词:** 特高压; 直流保护; 逻辑元件; 保护特性; 判据

## Study on the influence of logical module on UHVDC protective characteristics

LI Bao, XIONG Shuangcheng, LI Jinan, LAI Guisen

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

**Abstract:** In order to investigate the impact of the UHVDC protection logic module on the protective properties, according to protection hardware configuration, the recursive lagged effects of filter module in the signal processing circuit and the integral cumulative effects of the protection criterion export module are analyzed, the working principle of the module is described, and combined with the actual failure cases its impact on the protection characteristic is discussed and the optimization measures by modifying the internal configuration of the logic module to improve its operating characteristics are researched. It is verified by the previous fault waveforms playback, characteristics of logic element is improved, no protection misoperation occurs, which can improve the reliability of UHVDC protection. Some optimization measures has already been applied in engineering practice, it has certain reference value on the operation and maintenance in other HVDC system and the design of the subsequent project.

**Key words:** UHV; DC protection; logical module; protective characteristics; criteria

中图分类号: TM772 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)02-0133-05

## 0 引言

±800 kV特高压直流系统是世界上电压等级最高的直流输电系统, 承担着大容量、远距离输电任务。特高压直流采用双12脉动换流器串联的接线方式, 与常规±500 kV高压直流相比, 需要考虑运行方式改变时保护判据的调整、双换流器的相互配合以及更高的可靠性及更小的停运率, 对特高压直流保护系统提出了更高的要求<sup>[1-4]</sup>。同时, 特高压直流保护系统的可靠性对交直流混联电网的稳定运行有着重要影响, 直接关系到整个直流系统以及相关交流系统的安全运行。

本文将介绍基于SIEMENS硬件平台的特高压直流保护系统, 在此基础上研究保护逻辑元件对保护特性的影响, 分别以信号处理回路和出口回路为

例分析相关逻辑元件在不同配置情况下的工作特性, 并结合实际故障案例对保护特性的影响进行说明。针对存在的问题, 研究改善保护特性的优化措施, 并通过波形回放验证其可行性, 部分优化措施已经在工程实践中得到应用, 可以提高特高压直流保护的可靠性。

## 1 特高压直流保护的构成

基于SIEMENS硬件平台的特高压直流保护系统采用完全双重化配置, 实现数据采集、保护判断、动作出口的相互独立, 这种配置简化了保护系统结构, 提高了保护的可靠性。保护系统硬件采用了SIMATIC TDC平台, 与传统SIMADYN D平台相比, 其集成度更高, 数据处理能力更强大, 运行速度更快<sup>[5-7]</sup>。

同时,与传统高压直流系统测量值由光纤直接送至保护系统不同,特高压直流设计有两套独立冗余的测量系统,每套测量系统包括公共测量、极测量、高端换流器测量、低端换流器测量四个部分。测量系统完成互感器数据的采集和预处理,并通过TDM(Time Division Multiplex)总线传输给直流保护装置,如图1所示。采用独立的测量系统解决了保护系统中的快速通信、固定延时、同步采样等关键技术问题,使得可靠性进一步提高。测量系统设置有两套TDM总线,按照交叉冗余的原则进行连接,高冗余度确保了数据传输的可靠性。同时,保护装置通过现场总线、控制总线、I/O接口同其他保护控制进行数据交换,保护装置通过TDM总线获取采样数据,结合换流器设备运行状态,按照保护逻辑完成保护功能,故障时选择不同的动作出口,同时启动录波记录模拟数字量的变化。

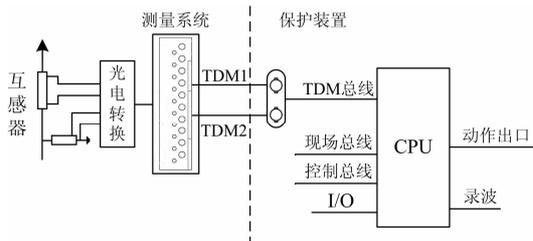


图1 特高压直流保护系统结构

Fig. 1 Systematic structure of the UHVDC protection

## 2 信号处理逻辑元件对保护特性的影响

根据保护的不同功能需求,需要对采集的电压、电流信号进行处理,经过A/D转换后的数字信号首先在测量系统进行预处理,该部分是独立于保护装置的,经过预处理后通过TDM总线送给保护装置,根据各个保护元件的不同需求对采集信号进行再处理,主要包括滤波、数值换算、调整等。在保护动作逻辑中,信号处理是动作逻辑的重要组成部分,直接决定了保护的動作特性<sup>[8-10]</sup>。

以极母线差动保护(87HV)为例,取直流线路电流 $I_{dLH}$ 和高压直流母线电流 $I_{dCH}$ 作为保护判断量,保护动作逻辑为 $|I_{dLH}-I_{dCH}|>0.3 \text{ p.u.}(938 \text{ A})$ ,延时10 ms 出口跳闸,保护逻辑没有考虑直流滤波器电流(双换流器全压运行时为25 A)以及暂态过程的影响,通过设定定值和延时来防止保护误动。

保护装置从TDM总线获取 $I_{dCH}$ 和 $I_{dLH}$ 采样值,由于 $I_{dCH}$ 未经过直流滤波器滤波,因此在保护逻辑中设有低通滤波器单元IIR2S(二阶无限脉冲响应滤波器),如图2所示, $I_{dCH}$ 经过低通滤波后与 $I_{dLH}$ 进

行比较,其差值取绝对值后送入特殊保护元件DISA中,当满足保护判据逻辑并持续10 ms后出口跳闸。

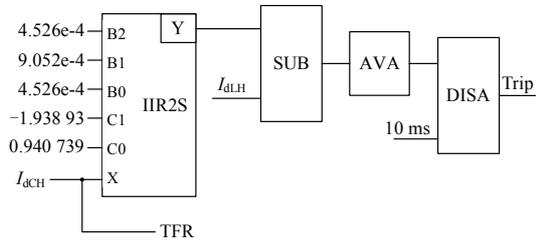


图2 极母线差动保护动作逻辑

Fig. 2 Schematic of the 87HV protection action logic

极母线差动保护87HV中信号处理主要由IIR2S元件完成,其差分方程如式(1)所示。

$$Y_{(k)} = \sum_{n=0}^2 B_{(2-n)} \times X_{(k-n)} - \sum_{n=1}^2 C_{(2-n)} \times Y_{(k-n)} \quad (1)$$

式中: $X_{(k)}$ 为当前输入; $Y_{(k)}$ 为当前输出; $X_{(k-1)}$ 、 $X_{(k-2)}$ 为前两个采样周期输入; $Y_{(k-1)}$ 、 $Y_{(k-2)}$ 为前两个采样周期输出; $B_{(2)}$ 、 $B_{(1)}$ 、 $B_{(0)}$ 、 $C_{(1)}$ 、 $C_{(0)}$ 为滤波系数。

根据公式可知,这是递归型的线性时不变因果系统,当前时刻的输出 $Y_{(k)}$ 除了与当前时刻的输入 $X_{(k)}$ 有关外,还与前两个时刻的输入 $X_{(k-1)}$ 、 $X_{(k-2)}$ 和输出 $Y_{(k-1)}$ 、 $Y_{(k-2)}$ 有关,该元件可以设置公式中的系数实现不同的性能。IIR滤波器的优点在于,其设计可以直接利用模拟滤波器设计的成果,因为模拟滤波器本身就是无限长冲激响应的。重大缺点在于,由于存在反馈,其稳定性不能得到保证;另外,反馈还使IIR滤波器的数字运算可能溢出;因此其输出相对输入呈现一定的滞后效应,滞后时间与所取的滤波系数有关。

在特高压直流系统运行期间,发生过测量装置断电重启过程中,极母线差动保护(87HV)动作跳闸事故,保护动作录波如图3所示。

$T_1$ 时刻开始,保护获取的 $I_{dCH}$ 采样值发生突变,从2390 A降到1078 A,而 $I_{dLH}$ 值基本维持不变, $T_2$ 时刻TDM总线发生切换,由总线1切至总线2运行, $T_3$ 时刻采样值恢复正常, $T_4$ 时刻保护动作出口闭锁换流器,其中 $T_2-T_1$ 为2 ms, $T_3-T_1$ 为6 ms, $T_4-T_1$ 为14 ms。通过录波可以看出故障持续时间不超过6 ms,没有达到保护的動作出口延时,保护仍然出口跳闸。

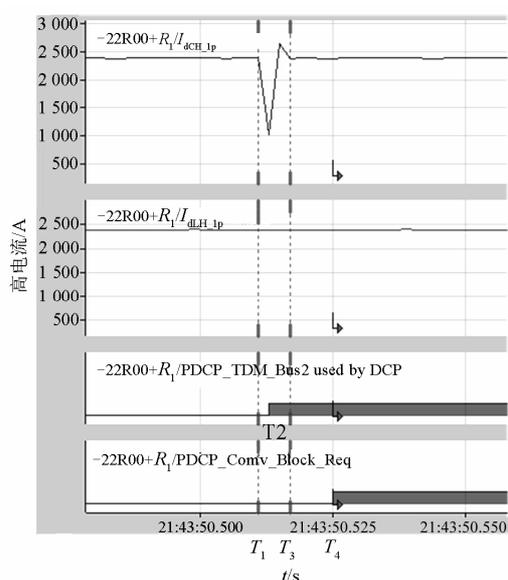


图 3 保护动作录波图

Fig. 3 Waveform record of the protection action

由于故障录波所采集的信号未经过信号处理元件, 不能准确反映保护的实际行动情况。根据递归算法和滤波参数, 建立信号处理单元的数学模型, 观察故障时其传递特性, 如图 4 所示。

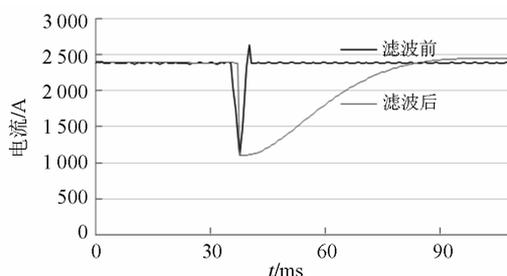


图 4 信号处理元件传递特性

Fig. 4 Transfer characteristic of signal processing module

IIR2S 元件在总线切换后第一个数据采样周期里, 所有历史输入输出全部强行置位, 使其能够快速反映当前输入, 即

$$\begin{aligned} Y_{(k)} &= Y_{(k-1)} = Y_{(k-2)} = X_{(k)} \\ X_{(k-1)} &= X_{(k-2)} = X_{(k)} \end{aligned} \quad (2)$$

从故障录波图 3 和故障仿真图 4 中可以看出, 在故障电流最小时刻, 总线发生切换, 切换后滤波功能暂时退出一个采样周期(0.6 ms), 输入直接反馈到输出, 但由于故障没有消除, 恢复滤波功能后输出呈现滞后效应, 保护逻辑无法复归而动作跳闸。

总线切换后滤波回路特性改变, 当短时故障无法消除时, 保护不可避免地选择出口跳闸。针对该

问题, 建议延长总线切换后的复位信号持续时间, 由一个采样周期延长至三个采样周期, 即三个采样周期内退出滤波功能, 消除短时干扰以利于故障恢复, 其传递特性如图 5 所示。延长后其输出滞后效应得到改善, 可以避免保护的不正确动作。

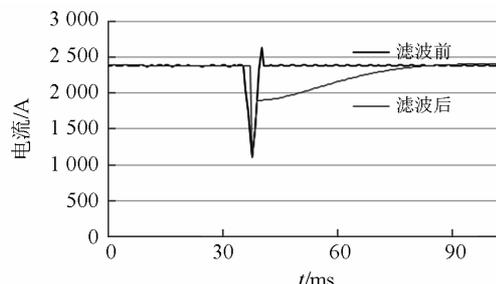


图 5 信号处理元件传递特性

Fig. 5 Transfer characteristic of signal processing module

由于信号处理元件的特性很大程度上取决于滤波系数, 因此调整滤波系数也可以改善保护的動作特性<sup>[11-12]</sup>。

### 3 出口逻辑元件对保护特性的影响

出口元件是保护动作逻辑中直接进行保护判据计算、选择出口功能的元件, 特高压直流中广泛应用的是一种特殊功能保护元件DISA, 其内部采用积分比较逻辑, 设有双向计数器, 当满足保护判据时快速增加计数, 否则慢速减少计数, 当达到延时计数值时, 选择不同的动作出口。

以极差动保护 87DCM 为例, 取极高压侧电流  $I_{dCH}$  和中性侧电流  $I_{dCN}$  作为保护判断量, 其保护逻辑如图 6 所示, 保护判据为:  $\text{abs}(I_{dCH} - I_{dCN}) > I_{set} \times \max(I_{dH}, I_{dN})$ , 当电流差值  $(I_{dCH} - I_{dCN})$  超过浮动门槛  $\max(I_{dH}, I_{dN})$  时进行加计数, 电流差值低于浮动门槛时进行减计数 ( $I=1$ ) 或复归计数 ( $I=0$ ), 当计数值达到计数时间定值时保护动作。其中  $T$  为计数时间,  $TPR$  为预告警时间,  $I$  为积分模式。

某次特高压直流系统发生 500 kV 交流线路单相接地故障, 双极四换流器均发生换相失败, 随后

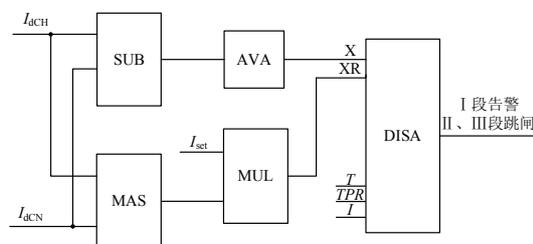


图 6 极差动保护动作逻辑

Fig. 6 Schematic of the action logic of 87DCM protection

极一直流保护系统 1 极差动保护 87DCM 动作, 极一双换流器停运退至备用状态, 直流功率由 5 000 MW 降至 2 750 MW, 故障录波如图 7 所示。

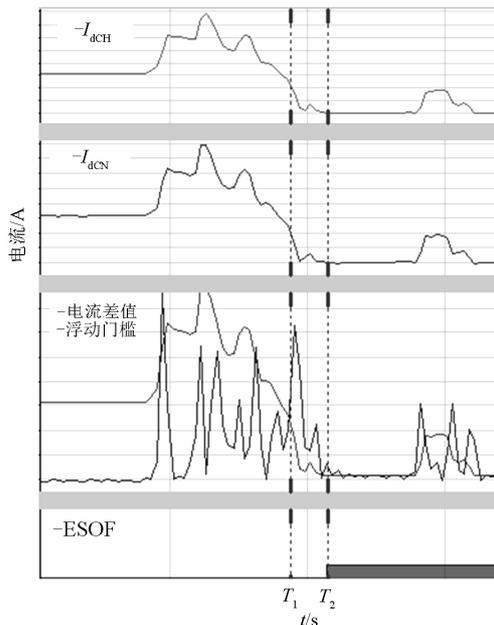


图 7 保护动作录波图

Fig. 7 Waveform record of the protection action

极差动保护 87DCM 采用单段式保护逻辑, 使用制动特性, 制动系数为 0.15, 积分模式  $I$  设为 1, 保护最低启动定值为 0.2 p.u.(625 A), 延时 5 ms 跳闸。

$T_1$  时刻, 电流差值超过浮动门槛值,  $T_2$  时刻计数值达到计数时间定值, 保护出口跳闸。保护动作原因在于 DISA 元件积分模式  $I$  设为 1, 当电流差值低于浮动门槛时由于积分累积效应保护不能自动复归, 加之保护出口延时较短, 无法有效地防止小电流扰动造成的保护动作<sup>[13-16]</sup>。

通过修改 DISA 元件积分模式可以解决以上问题, 即将积分模式  $I$  设为 0, 则在  $T_2$  时间前, 电流差值低于浮动门槛时计数器将自动复归, 保护不会出口动作, 只有当电流差值超过浮动门槛并持续到出口时间时, 保护才会动作。

同时, 将保护出口分为三段, I 段为告警段, 保护定值 0.03 p.u., 最低启动定值为 0.03 p.u.(94 A), 延时 100 ms 发信号, II 段为速动段, 保护定值 0.2 p.u., 最低启动定值为 0.2 p.u.(625 A), 延时 5 ms 跳闸, III 段为灵敏段, 保护定值 0.05 p.u., 最低启动定值为 0.05 p.u.(156 A), 延时 150 ms 跳闸。

应用波形回放对以上优化措施进行仿真验证, 多次试验两套直流保护均不动作, 直流保护的可靠

性得到了增强。通过修改积分模式可以防止保护误动作, 但由于保护的速动性和积分累积效应存在冲突, 且在保护装置运行速度一定的前提下无法加快积分的累积过程, 因此对于延时较短的保护功能, 尽量不要采用积分延时。

## 4 结论

介绍了特高压直流保护的特点和系统构成, 分析了信号处理回路滤波元件的递归滞后效应和保护判据出口元件的积分累积效应, 研究其对直流保护特性的影响。针对保护逻辑元件存在的问题, 提出了通过修改逻辑元件内部配置以改善其工作特性的优化措施, 并通过波形回放验证其可行性, 部分优化措施已经在工程实践中得到应用, 可以提高特高压直流保护的可靠性。

## 参考文献

- [1] 石岩, 韩伟, 张民, 等. 特高压直流输电工程控制保护系统的初步方案[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 11-15.  
SHI Yan, HAN Wei, ZHANG Min, et al. A preliminary scheme for control and protection system of UHVDC project[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 11-15.
- [2] 傅闯. 高压直流输电控制保护系统新技术——WIN-TDC[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(9): 72-77.  
FU Chuang. Technologies in HVDC control and protection system WIN-TDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(9): 72-77.
- [3] 王徕. 特高压直流输电控制与保护技术的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(15): 53-58.  
WANG Yao. Study on the control and protection system of ultra high voltage direct current transmission[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(15): 53-58.
- [4] 田杰. 高压直流控制保护系统的设计与实现[J]. 电力自动化设备 2005, 25(9): 10-14.  
TIAN Jie. Design and realization of HVDC control and protection system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(9): 10-14.
- [5] 毛晓明, 管霖, 张尧, 等. 超高压大功率直流输电系统的先进控制技术应用及发展[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(9): 91-95.  
MAO Xiaoming, GUAN Lin, ZHANG Yao, et al. Application and development of advanced control technologies in HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(9): 91-95.
- [6] 张望, 黄利军, 郝俊芳, 等. 高压直流输电控制保护系统的冗余设计[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(13): 88-91.

- ZHANG Wang, HUANG Lijun, HAO Junfang, et al. Redundant design of control and protection system for HVDC transmission[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(13): 88-91.
- [7] 李延龙, 杨亚璞, 李楠. 高压直流输电控制保护系统的冗余可靠性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(16): 59-62.
- LI Yanlong, YANG Yapu, LI Nan. Reliability research for HVDC transmission control and protection system redundancy[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(16): 59-62.
- [8] 王俊生, 李海英, 曹冬明.  $\pm 800$  kV 特高压直流保护阀组区测量点配置的探讨[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(22): 81-84.
- WANG Junsheng, LI Haiying, CAO Dongming.  $\pm 800$  kV ultra HVDC system protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(22): 81-84.
- [9] 朱艺颖, 蒋卫平, 吴雅妮. 特高压直流输电控制保护特性对内过电压的影响[J]. 电网技术, 2008, 32(8): 6-9.
- ZHU Yiyang, JIANG Weiping, WU Yani. Influence of UHVDC control and protection characteristics on inner overvoltage[J]. Power System Technology, 2008, 32(8): 6-9.
- [10] 陈锡磊, 周浩. 向家坝—上海 $\pm 800$  kV 特高压直流保护功能研究[J]. 华东电力, 2011, 39(4): 600-603.
- CHEN Xilei, ZHOU Hao. DC protection of  $\pm 800$  kV UHV DC Project from Xiangjiaba to Shanghai[J]. East China Electric Power, 2011, 39(4): 600-603.
- [11] 王俊生, 沈国民, 李海英, 等.  $\pm 800$  kV 特高压直流输电双极区保护的若干问题探讨[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(23): 85-88.
- WANG Junsheng, SHEN Guomin, LI Haiying, et al. Discussion on some problems in bi-pole area of  $\pm 800$  kV ultra HVDC system protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(23): 85-88.
- [12] 朱韬析. 提高南方电网直流保护动作可靠性的建议[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(5): 64-67.
- ZHU Taoxi. Suggestions to improve the reliability of HVDC protection in CSG[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(5): 64-67.
- [13] 张民, 石岩, 韩伟. 特高压直流保护动作策略的研究[J]. 电网技术, 2007, 31(10): 10-16.
- ZHANG Min, SHI Yan, HAN Wei. Research on action strategy of UHVDC protection[J]. Power System Technology, 2007, 31(10): 10-16.
- [14] 陈仕龙, 束洪春, 谢静, 等. 特高压直流输电线路故障暂态信号高频特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(21): 84-89.
- CHEN Shilong, SHU Hongchun, XIE Jing, et al. High frequency characteristic analysis of fault transient signal at UHVDC transmission lines fault[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(21): 84-89.
- [15] 周静, 马为民, 石岩, 等.  $\pm 800$  kV 直流输电系统的可靠性及其提高措施[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 7-12.
- ZHOU Jing, MA Weimin, SHI Yan, et al. Study on reliability of  $\pm 800$  kV UHVDC power transmission and its improvement measures[J]. Power System Technology, 2007, 31(3): 7-12.
- [16] 朱韬析, 刘东, 郭卫明, 等. 南方电网直流输电工程的光测量系统典型异常及处理方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 147-152.
- ZHU Taoxi, LIU Dong, GUO Weiming, et al. Typical abnormalities and their treatments of optic-electric measurements used in HVDC transmission projects in CSG[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 147-152.

收稿日期: 2014-03-25; 修回日期: 2014-04-12

作者简介:

李 豹 (1983-), 男, 硕士, 工程师, 从事高压直流输电系统设备运行与维护方面的研究和工作。E-mail: libao@ehv.csg.cn