

# 高岭背靠背直流 50 Hz 和 100 Hz 保护动作分析

徐海军<sup>1</sup>, 阮思焯<sup>1</sup>, 吕鹏飞<sup>2</sup>

(1. 国网运行分公司, 北京 100005; 2. 国家电力调度通信中心, 北京 100031)

**摘要:** 在详细介绍 50 Hz 和 100 Hz 保护原理的基础上, 结合高岭背靠背直流工程调试阶段出现的 50 Hz 和 100 Hz 保护动作情况, 利用 PSCAD/EMTDC 数字仿真软件对高岭背靠背直流系统 50 Hz 和 100 Hz 保护动作情况及保护配合关系进行了深入研究, 论证了保护动作的正确性。分析结果对于直流换流站现场运行维护具有一定的指导和帮助作用。

**关键词:** 高岭; 背靠背; 直流; 50 Hz 和 100 Hz 保护

## Study of 50 Hz and 100 Hz protection in Gaoling back-to-back HVDC system

XU Hai-jun<sup>1</sup>, RUAN Si-ye<sup>1</sup>, Lü Peng-fei<sup>2</sup>

(1. State Grid Operation Co., Beijing 100005, China; 2. State Grid Dispatch and Communication Center, Beijing 100031, China)

**Abstract:** The 50 Hz and 100 Hz protection setting principles are introduced. The actions of 50 Hz and 100 Hz protections during Gaoling back-to-back HVDC system commission test are studied. The digital simulation software PSCAD/EMTDC is applied to study the action and cooperation of 50Hz and 100Hz protections in Gaoling back-to-back HVDC system, by which the correctness of above-mentioned protections are verified. The analytical results are instructional and helpful for the operation and maintenance of HVDC station.

**Key words:** Gaoling; back-to-back; HVDC; 50 Hz and 100 Hz protection

中图分类号: TM77; TM933 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)04-0054-04

## 0 引言

高岭背靠背直流工程是实现华北、东北联网的第一个直流输电工程, 单个换流单元是世界上背靠背直流工程中换流容量最大的。该工程完全实现自主创新, 是直流设备国产化的标志性工程。

高岭换流站一期工程有两个换流单元, 每个单元额定容量750 MW, 额定直流电压±125 kV, 额定直流电流3 kA。东北侧交流滤波器配置4组HP12/24, 1组HP3, 3组SC; 华北侧交流滤波器共配置4组HP12/24, 2组HP3, 2组SC<sup>[1-2]</sup>。直流控制保护系统采用许继电气公司的DSP2000系统, 控制系统双重化冗余配置, 保护系统三重化配置, 采用“三取二”动作逻辑<sup>[3]</sup>。高岭背靠背直流工程主接线形式如图1所示<sup>[4]</sup>。

该工程于2008年6月开始调试, 于2008年11月投入试运行。从调试及试运行总体情况来看, 系统运行稳定、状况良好。但在调试期间, 发生一次由于单元2解锁后回检脉冲丢失造成阀触发脉冲异常, 导致50 Hz和100 Hz保护告警, 最后50 Hz保护跳闸, 单元2停运的情况。由于50 Hz和100 Hz

保护在直流保护中属于后备保护, 直流输电系统发生50 Hz和100 Hz保护动作的概率较低, 实际工程中尤其在背靠背直流工程中50 Hz/100 Hz保护的产生机理以及对于直流运行的影响的认识还不够全面。为了进一步加深对该保护的认识, 结合本次跳闸情况, 在对50 Hz和100 Hz保护原理介绍的基础上, 通过PSCAD/EMTDC仿真软件对该保护原理进行仿真模拟, 详细分析了引起该保护动作的原因、产生机制以及对整个系统的影响。这对现场运行维护人员有一定指导和帮助作用, 尤其对高岭背靠背直流二期工程有着很好的借鉴作用。

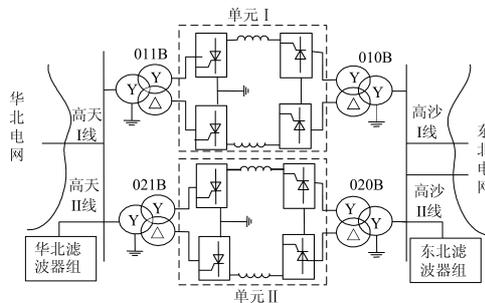


图1 高岭背靠背直流输电系统模型

Fig. 1 Model of Gaoling back-to-back HVDC system

## 1 50 Hz 和 100 Hz 保护动作情况

2008 年 10 月 19 日, 高岭系统调试过程中, 单元 2 解锁, 功率方向东北送华北, 系统采用电流控制方式, 电流定值为 600 A (150 MW)。由于可控硅建立正向电压的回报信号脉冲丢失造成阀触发脉冲丢失, 50 Hz 和 100 Hz 保护相继报警并切换极控系统。

由于切换后系统直流电流和直流电压仍然不稳, 50 Hz 保护跳闸动作, 闭锁直流。OWS 事件记录如表 1 所示。故障期间直流电流存在较大波动, 如图 2 所示, 直流电流建立到一定值后立即下跌, 如此反复, 直流电流总体而言呈现出 50 Hz 的锯齿波形状。

表 1 OWS 事件记录

Tab.1 Records in OWS

时间	类型	主/从	设备	事件描述	级别
2008-10-19,19:53:05:118	直流SER事件	主	单元2极控B	[26665]单元2 50 Hz保护1 II段报警——产生	警告
2008-10-19,19:53:05:118	直流SER事件	主	单元2极控B	[26785]单元2 50 Hz保护2 II段报警——产生	警告
2008-10-19,19:53:05:132	直流SER事件	主	单元2极控B	[26905]单元2 50 Hz保护3 II段报警——产生	警告
2008-10-19,19:53:29:151	直流SER事件	主	单元2极控B	[26788]单元2 100 Hz保护2 II段报警——产生	警告
2008-10-19,19:53:29:152	直流SER事件	主	单元2极控B	[26668]单元2 100 Hz保护1 II段报警——产生	警告
2008-10-19,19:53:29:202	直流SER事件	主	单元2极控B	[26908]单元2 100 Hz保护3 II段报警——产生	警告
2008-10-19,19:53:32:848	直流SER事件	主	单元2极控B	[26666]单元2 50 Hz保护1 III段跳闸——产生	紧急/故障
2008-10-19,19:53:32:861	直流SER事件	主	单元2极控B	[26786]单元2 50 Hz保护2 III段跳闸——产生	紧急/故障

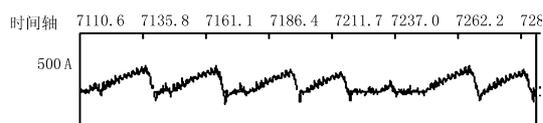


图 2 单元 II 直流电流

Fig.2 DC current in HVDC unit II

## 2 50 Hz 和 100 Hz 保护原理介绍

50 Hz 和 100 Hz 保护是用于检测阀干扰或控制系统异常造成触发脉冲异常或交流系统扰动导致一个 6 脉动桥臂或双 12 脉动桥臂中一个或多个桥臂不正常触发, 从而导致直流电流中产生大量 50 Hz 或 100 Hz 分量的情况<sup>[5-7]</sup>。

保护对直流电流中的 50 Hz 和 100 Hz 分量进行滤波, 若 50 Hz 或 100 Hz 分量超过预定参考值, 保护动作。保护判据为:  $I_{d1}(50\text{ Hz}/100\text{ Hz}) > \Delta$  或  $I_{d2}(50\text{ Hz}/100\text{ Hz}) > \Delta$ , 保护有 3 段定值及相应的延时。

表 2 50 Hz 和 100 Hz 保护设置

Tab.2 Settings of 50 Hz and 100 Hz protections

1 段:	检测到故障时, 首先延时 $t_1$ , 发出启动极控系统切换命令到极控系统。
2 段:	延时 $t_2$ 后 II 段动作, 发降电流运行命令到极控系统, 将电流降到典型值 $0.3 \times I_{dn}$ , 以保护故障阀。
3 段:	经过延时 $t_3$ 后 III 段动作, 发移相闭锁命令到极控系统, 同时跳两侧交流断路器、起两侧断路器失灵保护和两侧交流断路器锁定继电器。

50 Hz 保护逻辑如图 3 所示, 100 Hz 保护逻辑如图 4 所示<sup>[8]</sup>。

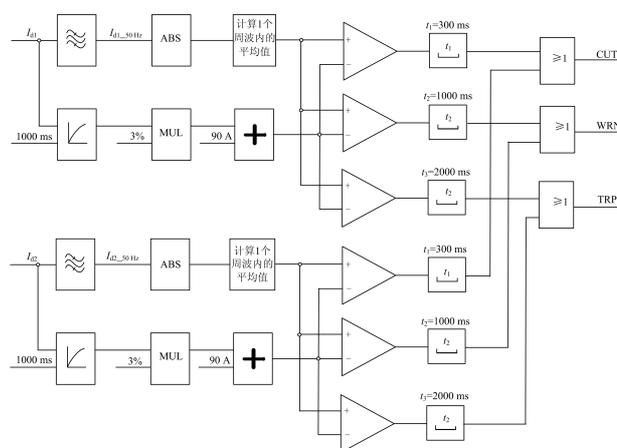


图 3 50 Hz 保护框图

Fig. 3 Block of 50 Hz protection

50 Hz 保护 I 段动作延时 350 ms 进行系统切换, 排除由于控制系统异常造成一个 6 脉动阀触发脉冲异常的情况; II 段动作延时 1 s 降电流至 0.3 p.u., 防止由于系统输送功率较大产生振荡的情况; III 段动作延时 2 s 移相闭锁, 动作时间应与换相失败保护最长动作时间配合。

100 Hz 保护 I 段动作延时 350 ms 进行系统切换, 排除由于控制系统异常造成双 12 脉动阀触发脉冲异常的情况; II 段动作延时 2 s 降电流至 0.3 p.u.,

防止由于系统输送功率较大产生振荡的情况，时间与 50 Hz 保护 II 段相配合；III 段动作延时 5 s 移相闭锁，动作时间应与交流系统主保护拒动后备保护动作切除故障时间配合。

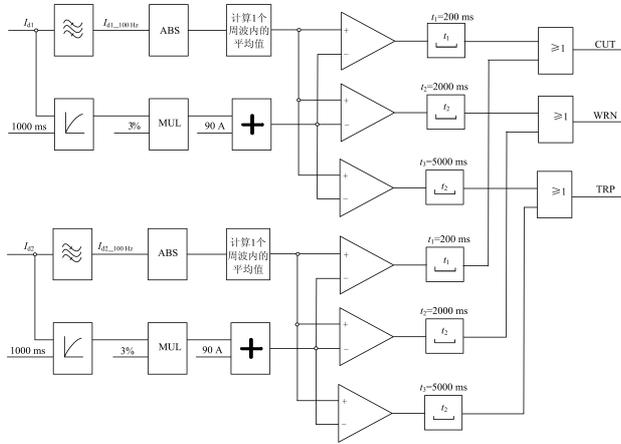


图 4 100 Hz 保护框图

Fig.4 Block of 100 Hz protection

### 3 仿真分析

为验证2008年10月19日保护动作正确性以及研究高岭背靠背直流系统中50 Hz和100 Hz保护的动作用场合，本文利用PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真软件对高岭背靠背直流系统的单元II进行建模仿真研究，并重点讨论交流系统不对称故障和换流阀故障两种情况下系统和保护动作的响应。仿真模型运行工况为：电流定值为600 A，直流电压±125 kV，由东北往华北送电。

下列各图中 $I_d$ 为直流电流； $I_{50\text{Hz}}$ 、 $I_{100\text{Hz}}$ 表示直流线路电流中的50 Hz和100 Hz分量； $I_{\text{com}}$ 为直流50 Hz和100 Hz的保护定值。

#### 3.1 交流系统不对称故障

交流系统不对称故障是导致交流系统中出现基频负序电压最常见的原因。在换流器的作用下，交流系统中的基频负序电压会导致在直流系统中产生二次谐波电势，二次谐波电势则在直流侧生成二次谐波电流<sup>[9-10]</sup>。

图5给出东北（整流侧）高沙II线单相接地故障时保护系统的响应。高沙II线A相经10 Ω电阻接地，100 ms后交流保护动作切除故障相，故障相切除后700 ms重合闸成功。仿真结果表明：

a) 交流不平衡故障主要导致双12脉动发生换相异常，直流电流中100 Hz分量较大，50 Hz分量较小。这是因为直流侧的50 Hz和100 Hz分量分别是由交流侧的直流和负序分量引起的<sup>[11]</sup>，当交流故障时，交流故障产生的直流电压源幅值较小而且

呈衰减趋势，而负序电压源只有在故障点清除后才消失。因此直流线路电流中的100 Hz分量较大，约为0.05 kA；而50 Hz分量数值上只在故障初期和故障清除时出现且之后逐渐衰减为零。

b) 该故障模式下，直流系统的安全主要依靠交流保护的正确动作，50 Hz和100 Hz保护都不动作。一旦交流保护及其它相关保护拒动，将由100 Hz的III段实现直流跳闸，作为交流保护及其它相关保护的后备保护。

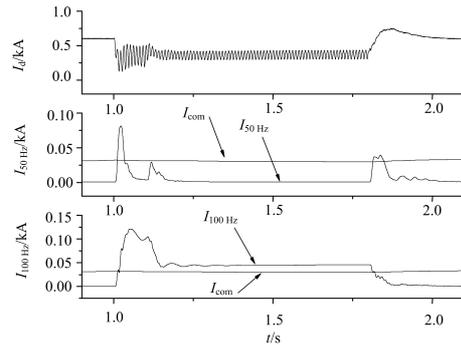


图5 东北(整流侧)进线侧单相接地故障

Fig. 5 Single phase fault in Dongbei side(rectifier)

#### 3.2 换流阀持续脉冲丢失

阀持续不开通故障发生在整流侧和逆变侧时直流系统的响应各不相同。图6中给出华北(逆变侧)Y/Y阀组Y2持续丢失脉冲时的系统响应。图7中给出东北(整流侧)Y/Y阀组Y2持续丢失脉冲时的系统响应。从中可以得出以下结论：

a) 整流侧和逆变侧阀持续不开通都将产生比较恒定的50 Hz和100 Hz电流分量，其中100 Hz分量较小。整流侧故障期间50 Hz和100 Hz电流有效值约为0.08 kA和0.04 kA，逆变侧故障期间50 Hz和100 Hz电流有效值约为0.05 kA和0.033 kA。

b) 整流侧阀持续不开通时，正常的保护动作顺序将是50 Hz和100 Hz的II段告警，之后50 Hz III段跳闸。一旦出现50 Hz保护拒动，将由100 Hz III段来完成直流跳闸，以保护直流设备及交流系统的安全稳定运行。

c) 逆变侧持续不开通故障将引起换相失败，直流电流增加，其处理与对换相失败的处理基本相同。该情况下50 Hz和100 Hz保护作为换相失败保护的后备保护。正常的保护动作顺序将是换相失败跳闸和50 Hz的II段告警，100 Hz保护不动作。一旦出现换相失败保护拒动，将由50 Hz III段来完成直流跳闸。

上述结果表明了高岭背靠背保护逻辑可以成功地区分阀故障和交流故障，同时也验证了2008年10月19日期间高岭单元2由于阀脉冲持续丢失引发

的 50 Hz 和 100 Hz 保护动作的正确性。其中现场 OWS 事件记录与整流侧脉冲丢失仿真中保护动作顺序相一致: 50 Hz 和 100 Hz 的 II 段先告警, 之后 50 Hz III 段跳闸。同时现场录波 (图 2) 和整流侧脉冲丢失的直流电流仿真波形相对应: 整流侧脉冲丢失与直流开路情况较为类似, 直流电流迅速下降, 随后呈现振荡的锯齿波形状。根据以上结果可基本判断出该次故障跳闸主要是由高岭单元 2 整流侧脉冲丢失引起的。

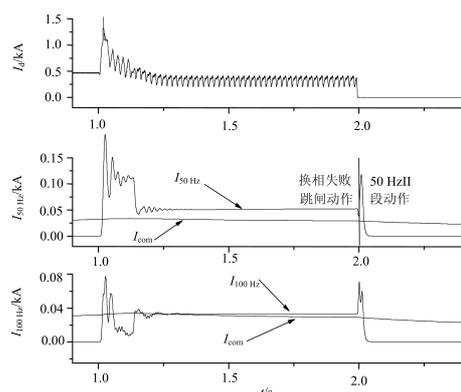


图 6 华北 (逆变侧) Y/Y 阀组 Y2 持续丢失脉冲  
Fig.6 Continual loss of pulse in Huabei side's Y2

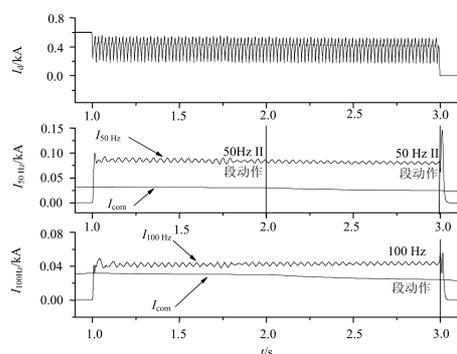


图 7 东北 (整流侧) Y/Y 阀组 Y2 持续丢失脉冲  
Fig.7 Continual loss of pulse in Dongbei side's Y2

## 4 结论

本文介绍了高岭背靠背直流系统中 50 Hz 和 100 Hz 保护的机理。结合高岭背靠背直流系统调试期间出现的阀触发异常导致 100 Hz 保护告警、50 Hz 保护动作的现场情况, 利用 PSCAD/EMTDC 仿真软件, 对直流保护系统中 50 Hz 和 100 Hz 保护动作机理及响应特性进行了深入研究, 阐明了不

同故障条件下直流系统中 50 Hz 与 100 Hz 谐波分量的特征情况, 讨论不同工况下 50 Hz 和 100 Hz 的保护动作后果, 证明了高岭背靠背直流调试期间 50 Hz 和 100 Hz 保护的正确性。

## 参考文献

- [1] 国网运行有限公司. 高岭换流站运行规程—设备概况[Z]. 2009.
- [2] 许继集团有限公司. 高岭 750 MW  $\pm$  125 kV 背靠背联网直流输电工程阀基电子设备[Z]. 2007.
- [3] 许继集团有限公司. 东北—华北联网背靠背高岭换流站工程控制保护系统[Z]. 2007.
- [4] 许继集团有限公司. 东北—华北联网背靠背高岭换流站工程换流站设备[Z]. 2007.
- [5] 浙大直流输电教研组. 直流输电[M]. 北京: 电力工业出版社, 1982.
- [6] 赵晓君, 等. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [7] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [8] 许继集团有限公司. 高岭换流站直流保护系统设计规范书[Z]. 2007.
- [9] Lihua H, Yacimini R. Harmonic Transfer Through Converters and HVDC Links[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1992, 7 (3): 514-524.
- [10] 马玉龙, 肖湘宁, 江旭. 交流系统接地故障对 HVDC 的影响分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(11): 144-149. MA Yu-long, XIAO Xiang-ning, JIANG Xu. Analysis of the Impact of AC System Single-Phase Earth Fault on HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(11): 144-149.
- [11] Sarshar A, Irvani M R. Calculation of HVDC Converter Noncharacteristic Harmonics Using Digital Time Domain Simulation Method[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11 (1): 335-344.

收稿日期: 2009-03-23; 修回日期: 2009-05-20

作者简介:

徐海军 (1977-), 男, 工程师, 从事直流输电运行工作;  
阮思焯 (1982-), 男, 博士, 工程师, 从事电力系统分析以及直流输电控制的研究;

吕鹏飞 (1979-), 男, 工程师, 从事直流输电调度管理工作。E-mail: Lv-pengfei@sgcc.com.cn