

直流输电系统 100 Hz 保护的相关问题研究

周红阳, 余江, 黄佳胤, 赵曼勇

(中国南方电网电力调度通信中心, 广州 510623)

Relative Issues of 100 Hz Protection for HVDC Systems

ZHOU Hong-yang, YU Jiang, HUANG Jia-yin, ZHAO Man-yong

(Dispatching Center of China Southern Power Grid, Guangzhou 510623, China)

Abstract: It is indicated by operation experience that 100 Hz protection for HVDC systems may react even as AC system fault location is far away from converter stations. This paper discusses the mechanism of 100 Hz component occurring in DC line current, and presents a new principle for coordinating 100 Hz protection with AC system protection, that is, to take 100 Hz protection as the backup protection to AC system fault, and consider its time delay co-ordination with the maximum backup fault clearing time without paying attention to the overload capability of HVDC equipments. The influence of long existing 100 Hz current to HVDC equipments such as valves and transformers, and transmission power fluctuating is also analyzed, showing no harm at all. The new principle for setting 100 Hz protection has been used in GG1, GG2 and TSQ projects.

Key words: HVDC; 100 Hz protection; negative sequence voltage; over load

摘要: 运行经验表明, 在距离换流站较远的地方发生交流系统故障, 仍有可能导致换流站内 100 Hz 保护动作。从直流线路电流中 100 Hz 分量的产生机理着手, 提出 100 Hz 保护主要作为交流系统故障时直流的后备保护, 不需考虑交直流系统及阀故障时直流设备的过负荷能力, 保护动作延时只需考虑交流系统后备保护清除故障时间的原则, 并就直流 100 Hz 电流长时间存在时对阀、换流变等直流设备以及系统功率波动的影响进行了深入分析, 结果显示不会对现有直流设备造成危害。新的 100 Hz 保护设置原则已用于天广、高肇、兴安直流工程。

关键词: 直流输电; 100 Hz 保护; 负序电压; 过负荷

南方电网直流与直流、直流与交流之间的动态过程强烈耦合、交互影响, 系统的动态特性非常复杂。据分析, 当南方电网 79 个厂站范围发生交流故障时, 如果主保护或开关拒动, 直流 100 Hz 保护动作导致多回直流同时降功率或闭锁, 整个系统将难以通过现有的或新增的安全稳定控制措施维持电网稳定^[1-3]。

以往在直流保护的功能配置中一直遵循交流系统故障期间直流保护应尽量不动作的原则。然而, 在 2006 年 6 月 23 日, 云南罗平 500 kV 变电站发生开关本体故障, 交流故障持续了近 3 s, 由线路对侧的后备保护动作切除故障。在此期间, 发生了天广直流 100 Hz 保护动作, 双极闭锁。由此提示了对直流 100 Hz 保护的作用以及整定原则还有待进一步认识。

通过机理分析, 可以看出换流母线中的负序基波和直流分量是导致直流线路电流中产生的 100 Hz、50 Hz 分量的最主要原因。如果阀故障和交流系统故障期间, 直流线路电流中的 100 Hz、50 Hz 分量具有不同特征, 就可以简化 100 Hz 保护的作用, 使其仅作为交流系统故障的后备保护。

如果 100 Hz 保护动作时间与交流系统保护配合, 有必要延长现有 100 Hz 保护动作延时。为了确保新方案的可行性, 还需要分析 100 Hz 保护动作延时后对直流设备及交流系统的影响。相关的研究将利用国际通用的电磁暂态仿真分析软件 EMTDC/PSCAD。若新方案可行, 将较好地解决南方电网中交流保护与直流 100 Hz 保护之间的配合关系。

1 100 Hz 分量产生机理

直流输电采用等间隔触发原理, 换流器阀侧电气量的频率特性实际上体现的是换流站交流母线电压的空间旋转矢量与触发脉冲的空间旋转矢量的相对频率^[4]。由于锁相与同步环节的作用, 各阀的触发脉冲的基波空间旋转矢量与换流母线的正序基波电压同步旋转(逆时针)。换流站交流母线 k 次正序分量在直流侧产生 $k-1$ 次逆时针旋转的矢量; 换流站交流母线 k 次负序分量在直流侧产生 $k+1$ 次顺时针旋转的矢量; 换流站交流母线的零序电压的空间旋转矢量为坐标原点, 在换流器阀侧不产生任何电压, 如图 1 所示。

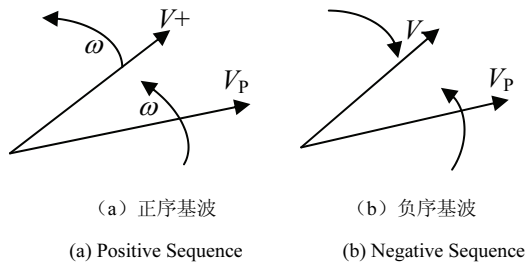


图 1 交流正、负序电压在直流侧的响应示意图
Fig.1 Response of Positive and Negative Sequence of AC Voltage on DC Side of Converter

交流系统正、负序电压在换流器直流侧产生的电压可以通过开关函数法计算。由于直流换流器的理想换流过程具有周期性和等间隔性的特性, 结合傅立叶分析, 可以推导出交流侧正、负、零序电压分量在直流侧产生的电压。文献[5-8]利用开关函数法分析了交流系统谐波对直流运行的影响, 在此不累述。

但这些分析都只局限于分析交流侧电压中的各频率分量对换流器空载直流电压的影响, 或者换流器直流侧电流对交流系统电流的影响, 没有将交流系统和直流系统作为一个整体进行分析。实际上, 即使不考虑交流系统中的其他非主导性三次谐波源对换流站交流母线电压的影响, 直流侧 100 Hz 电压、电流又将在交流侧产生三次谐波电压、电流。交流侧的负序基波和三次谐波电压、电流与直流侧 100 Hz 电压、电流之间也处于动态平衡。由于交流系统故障期间三次谐波电压源幅值较小而且衰减较快, 交流故障时直流 100 Hz 电压、电流主要是由负

序电压引起, 其关系如图 2 所示^[9]。图 2 中“1”表示换流器电压变换关系, “2”表示换流器电流变换关系。

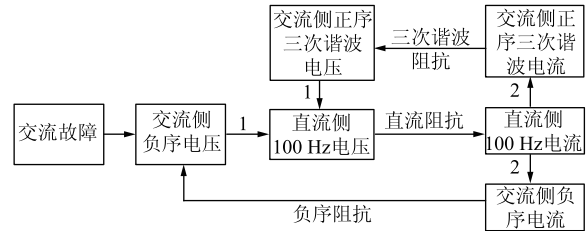


图 2 交流故障在直流侧产生 100 Hz 分量机理示意图
Fig.2 Mechanism of 100 Hz Component in DC Side during AC System Fault

2 100 Hz 保护的作用

根据西门子直流保护的技术规范要求, 在阀故障及交流系统故障期间, 直流 50 Hz、100 Hz 保护都应起到保护作用^[10]。

然而, 进一步仿真分析及直流的运行情况表明, 阀故障及交流系统故障期间, 直流线路电压、电流中的 50 Hz、100 Hz 分量的特性有较大差异:

(1) 在阀丢失脉冲期间, 50 Hz、100 Hz 保护定值相同时 50 Hz 告警段有动作, 但 100 Hz 告警段却没有动作, 表明 50 Hz 保护的灵敏度高于 100 Hz。

(2) 在阀短路故障及直流高压母线故障时, 直流线路中有可能 50 Hz 分量较大, 也有可能 100 Hz 分量较大, 但直流保护中有专门的主保护及后备保护功能可以动作出口闭锁直流, 可以不区分阀故障故障条件下 50 Hz、100 Hz 保护的的动作情况。

(3) 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, 50 Hz 分量数值上也较小且逐渐衰减。

由于阀故障期间和交流系统故障期间, 直流线路中的 50 Hz、100 Hz 分量呈现出不同的特征, 而且阀设备本身异常与交流故障对阀设备的影响程度不同, 因此可以考虑调整 50 Hz 和 100 Hz 保护的作用和定值, 50 Hz 主要作为阀丢失脉冲的保护, 整定主要考虑阀设备的承受能力; 100 Hz 主要作为交流故障的后备保护, 与交流系统的有关定值配合, 可以较好解决目前南方电网 100 Hz 保护的问题^[11]。

采用该方案意味着延长现有 100 Hz 保护的动

作延时, 需要校核直流设备承受交流系统故障的能力, 确保对直流设备以及交流系统没有负面影响。

3 对直流设备的影响

直流线路电流中的 100 Hz 分量长期存在, 对阀及其缓冲回路、换流变、平波电抗器、直流滤波器、交流滤波器的运行会有一定影响。其中, 除交流滤波器的电容器和阀设备外, 其余设备在参数设计中均保证了即使将 100 Hz 保护的動作延时延长到 3 s, 都不会对设备的安全运行造成危害, 而且大多数都有完善的主保护和后备保护。

对于交流滤波器中的电阻器, 仿真计算结果表明, 电阻器承受故障的时间受到电阻器热容量的限制。故障类型不同、故障持续时间不同、交流滤波器小组投退情况不同, 交流系统故障期间在三次谐波滤波器电阻器上产生的热量不同。电阻元件的过负荷保护通过专门的过负荷保护解决更为合适, 不应通过 100 Hz 保护定值^[12]。

本节主要分析交流系统故障长期存在对阀设备的影响。

3.1 阀的过负荷分析

采用 EMTDC/PSCAD 仿真分析工具, 模拟交流系统故障时阀电流的波形, 利用式 (1) 计算阀的发热情况。

$$P_{\text{Valve}} = I_{\text{Valve}}^2 R_{\text{Valve}} t. \quad (1)$$

式 (1) 中, I_{Valve} 、 R_{Valve} 分别为阀电流和等效电阻。假设阀的等效电阻在故障期间不发生变化, 则故障前后 P_{Valve} 的比值就反映了交流故障期间阀的过负荷情况。

经过分析计算, 天广、高肇直流工程中, 无论是整流、逆变侧故障, 虽然故障后短时间内阀的过负荷倍数可以达到最大负荷运行时的 200%, 但持续时间不超过 5 ms, 3 s 内的发热不超过额定运行时的 125%。

对照表 1 中高肇直流阀的过负荷能力^[13-14] (天广直流阀的过负荷能力比高肇直流大), 即使交流系统故障持续时间达到 3 s, 也不会导致阀过负荷。

除了校核阀自身的过负荷能力外, 还需要校核阀的缓冲回路承受过负荷的能力。由于阀的设计能够承受 1 s 的 600 Hz 断续电流, 交流系统故障长期存在只可能产生 100 Hz 的断续电流, 发热远小于

600 Hz 断续电流, 因此延长 100 Hz 保护的動作延时不会危害到阀的缓冲回路。

表 1 高肇直流阀 (高坡站) 的过负荷能力 I/I_{rms}

参数	过载持续时间	温度					
		0°C	10°C	15°C	20°C	25°C	35°C
带额外冷却	不断	2 096	2 096	2 096	2 096	2 096	1 916
	2 h	2 186	2 186	2 186	2 186	2 186	2 006
	10 s	2 369	2 369	2 369	2 369	2 369	2 096
	5 s	2 460	2 460	2 460	2 460	2 460	2 278
	3 s	2 645	2 645	2 645	2 645	2 645	2 460
不带额外冷却	不断	1 916	1 916	1 916	1 916	1 916	1 732
	2 h	2 096	2 096	2 096	2 096	2 096	1 916
	10 s	2 369	2 369	2 369	2 369	2 369	2 096
	5 s	2 460	2 460	2 460	2 460	2 460	2 278
	3 s	2 645	2 645	2 645	2 645	2 645	2 460

3.2 阀过流分析

交流系统故障, 尤其是故障点距离换流站很近时, 阀换流器中会流过短时尖峰电流。对于出现的尖峰电流, 阀本身具有承受短时 (1~2 周波) 的浪涌电流的能力, 电流峰值按照下式计算:

$$I_{\text{peak}} = \frac{U_N}{U_k \%}. \quad (2)$$

式 (2) 中, U_N 为换流站母线额定电压, $U_k\%$ 为换流变的短路阻抗。通常根据式 (2) 计算得到的浪涌峰值电流都可以达到额定电流的 10 倍, 例如高肇直流为 38 kA。因此, 天广和高肇直流整流、逆变侧交流故障后的短时尖峰电流不会超出阀承受浪涌电流的能力。

4 输送功率分析

直流输送功率的瞬时值可以用直流电压和电流按照式 (3) 计算得到。

$$P_d(t) = I_d(t) \times U_d(t), \quad (3)$$

式中, $P_d(t)$ 、 $I_d(t)$ 、 $U_d(t)$ 分别为直流功率、直流电流和直流电压的瞬时值。

若直流电流和直流电压中只含有直流分量, 式 (3) 计算得到的直流输送功率应为恒定的直流分量。实际上由于直流电压电流中均有谐波成分, 即使直流系统处于稳定运行状态, 直流输送功率也存

在小幅波动。交流系统故障时, 直流线路电压、电流中将发生畸变, 谐波成分以 100 Hz 分量为主。直流的输送功率波动幅度显著增加。以 100 Hz 谐波分量为例分析其对直流输送功率的影响。

不失一般性, 设 100 Hz 直流电压、电流用式 (4)、(5) 表示:

$$u_{100}(t) = \sqrt{2}U_{100} \cos \omega t, \quad (4)$$

$$i_{100}(t) = \sqrt{2}I_{100} \cos(\omega t + \alpha). \quad (5)$$

直流电压、电流用式 (6)、(7) 表示:

$$u_d(t) = U_{dc} + \sqrt{2}U_{100} \cos \omega t, \quad (6)$$

$$i_d(t) = I_{dc} + \sqrt{2}I_{100} \cos(\omega t + \alpha), \quad (7)$$

式中, U_{dc} 、 I_{dc} 为直流电压、电流中的直流分量。

将式 (6)、(7) 代入式 (3), 可得:

$$P_d(t) = P_{dc} + P_{100} \cos(\omega t + \beta) + P_{200} \cos(2\omega t + \alpha), \quad (8)$$

$$\beta = \arctg\left(\frac{B}{A}\right), \quad (9)$$

$$A = U_{dc}I_{100} \cos \alpha + I_d U_{100}, \quad (10)$$

$$B = U_{dc}I_{100} \sin \alpha, \quad (11)$$

其中, 恒定功率:

$$P_{dc} = U_{dc}I_{dc} + U_{100}I_{100} \cos \alpha; \quad (12)$$

100 Hz 波动功率幅值:

$$P_{100}(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{A^2 + B^2}; \quad (13)$$

200 Hz 波动功率幅值:

$$P_{200}(t) = U_{100}I_{100} \cos(2\omega t + \alpha). \quad (14)$$

从式 (9) — (11) 中可以看出, 出现 100 Hz 直流电压、电流, 会导致直流输送功率的恒定直流分量发生变化, 增加了 $U_{100}I_{100} \cos \alpha$, 同时出现幅值分别为 P_{100} 、 P_{200} 的 100 Hz、200 Hz 的波动功率。

以“6·23”事故的直流电压、电流录波数据为例, 对直流输送功率进行了分析。表 2 是根据“6·23”事故中马窝、广州侧极 2 的录波数据计算的功率波动情况。

表 2 功率波动情况计算表

Tab. 2 Calculation of DC Power

来源	数据	马窝		广州	
		降功率前	降功率后	降功率前	降功率后
	U_{dc}/kV	-481	-488	-4564	-478
	I_{dc}/A	1346	472.3	1294	446.2
现场	U_{100}/kV	22	14.9	44.4	35.8
录波	I_{100}/A	255.1	200.2	197	128
	$\alpha / (^\circ)$	252	253	-220	-223
	P_{dc}/MW	655	250	605	235
式(12)	P_{dc}/MW	645	230	583	210
式(13)	P_{100}/MW	191	141	196	104

根据表 2 的计算结果, 直流输送功率应该有很明显的波动。然而, 从录波数据文件得到的直流输送功率却看不到如此明显的功率波动。这是由于双极直流功率数值在接入故障录波器之前经过了平滑处理。如果在仿真模型中增加了相同功率的对应模块, 计算得到的功率波动幅度明显降低。

图 3 是经平滑处理后的直流双极功率与录波结果的对照图, 图中虚线为录波的双极功率, 实线为计算的双极功率。两条曲线的波动特性基本一致, 表明录波器中的直流输送功率的确是实际直流输送功率经过平滑处理后的数据。

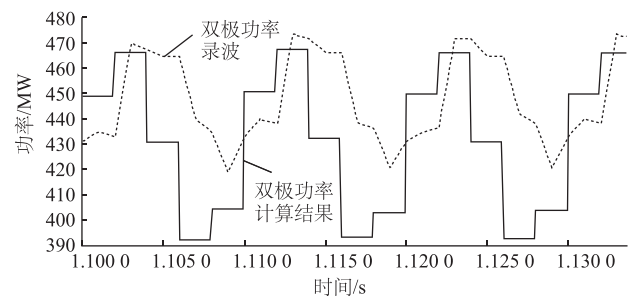


图 3 降功率后双极功率曲线 (广州)

Fig. 3 Bipole DC Power Curve after Power Reduced

任何电力系统中的电量平衡都是实时的, 既然没有储能元件的存在, 直流系统实际输出功率是不经过任何平滑环节的。关于直流功率的波动所导致的交流系统的功率波动情况还有待进一步研究。

5 结 语

本文就直流线路电流中 100 Hz 电流产生机理、直流 100 Hz 电流长期存在对直流设备及系统运行的影响,直流 100 Hz 保护作用等问题进行了深入分析,主要结论如下:

(1)交流系统故障在换流母线上产生的负序电压是直流线路电流中出现 100 Hz 分量的最主要的原因。

(2) 100 Hz 保护宜作为交流系统故障时直流系统侧后备保护,动作时间与交流系统后备保护动作时间相配合,阀故障的后备保护主要由 50 Hz 保护承担。

(3)即使交流系统故障由后备保护清除,直流线路电流中 100 Hz 分量对阀及其缓冲回路、换流变、平波电抗器、直流滤波器、交流滤波器、中性母线避雷器的影响有限。相应设备应根据需要配置过负荷及过电压保护,不应使设备的过负荷能力成为限制 100 Hz 保护整定、影响直流系统运行的制约因素。

(4)直流线路电流中存在 100 Hz 分量时,直流系统的输出功率存在明显波动,对交流系统设备以及系统功率波动的影响还有待分析。

天广直流马窝侧三次谐波滤波器的低压电阻已更换完毕,目前,天广、高肇、兴安直流已将直流 100 Hz 保护的延时延长到 3 s,以便与交流系统保护的后备距离保护动作时间相配合。

参考文献:

- [1] 曾勇刚,李建设,唐红兵,等.中国南方电网 2007 年年度运行方式[R].广州:中国南方电网电力调度通信中心,2007.
ZENG Yong-gang, LI Jian-she, TANG Hong-bing, et al. Operation Plan of year 2007 of China Southern Grid[R]. Guangzhou: Dispatching Center of China Southern Power Grid, 2007 (in Chinese).
- [2] 余江,黄佳胤.高压直流输电的保护系统研究[R].广州:中国南方电网电力调度通信中心,2006.
YU Jiang, HUANG Jia-yin. Study Report of Protection System of HVDC[R]. Guangzhou: Dispatching Center of China Southern Power Grid, 2006(in Chinese).
- [3] YU Jiang, ZHOU Hong-yang, HUANG Jia-yin, et al. A Practical Method to Analyze the Operation of 100 Hz Protection during AC System Fault in Multi-feed HVDC System [C], Proceeding of 2007 HVDC Users Conference, Yichang, China, 2007.
- [4] 孙树勤.无功补偿的矢量控制[M].北京:中国电力出版社,1998.

- SUN Shu-qin. Vector Control of Reactive Power Compensation [M]. Beijing: China Electric Publisher, 1998(in Chinese).
- [5] Hu Li-hua, YACAMINI R. Harmonic transfer through converters and HVDC links[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1992, 7(3): 514-525.
- [6] 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.
XU Zheng. Dynamic Performance of AC/DC System[M]. Beijing, Mechanical Industry Press, 2004 (in Chinese).
- [7] 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. Technology of HVDC[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004(in Chinese).
- [8] 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]. Proceeding of CSEE, 2006, 26 (11): 144-149(in Chinese).
- [9] 余江,黄佳胤,陈朝晖.多馈入直流系统 100 Hz 保护交流故障时动作特性研究[R].广州:中国南方电网电力调度通信中心,2007.
YU Jiang, HUANG Jia-yin, CHEN Zhao-hui. Characteristic of 100 Hz protection of Multi-feed HVDC System during AC Fault[R]. Guangzhou: Dispatching Center of China Southern Power Grid, 2007(in Chinese).
- [10] PRIEBE. Study Report of DC Protection Co-ordination (GG1), Germany[R]. SIEMENS, 2003.
- [11] 傅闯, PRIEBE T, KUMAR D. 高压直流输电系统 100 Hz 保护研究报告[R].广州:中国南方电网技术研究中心,2007.
FU Chuang, PRIEBE T, KUMAR D. Study Report of HVDC 100 Hz Protection[R]. Technical Guangzhou: Research Centre of China Southern Power Grid, 2007(in Chinese).
- [12] ZHOU Hong-yang, YU Jiang, HUANG Jia-yin, et al. Improvements of 100 Hz Protection in China Southern Grid[C]. Proceeding of 2007 HVDC Users Conference, Yichang, China, 2007.
- [13] PRIEBE. Study report of Thermal Requirement of Key Equipment (GG1) [R]. SIEMENS, 2002.
- [14] PRIEBE. Study report of Overload (GG1)[R]. SIEMENS, 2002.

收稿日期:2007-10-09

作者简介:

周红阳(1969-),男,高级工程师,从事继电保护生产运行管理及研究工作。

余江(1975-),女,高级工程师,从事继电保护运行管理及研究工作。

黄佳胤(1978-),男,工程师,从事继电保护生产运行管理及研究工作。

(本文责任编辑 张亚拉)