

SSR 阻尼控制器在高岭背靠背直流工程中的应用

张望, 曹森, 郭宏光, 李天锋

(许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 高岭背靠背直流输电工程是西北电网和华北电网之间的直联工程。由于直流换流站和绥中电厂之间的电气距离比较近, 理论分析和时域仿真表明, 在一些运行方式下直流系统和电厂的大型汽轮发电机组之间存在发生次同步谐振的风险。针对高岭背靠背直流工程的需要, 通过在直流控制系统中增加 SSR 阻尼控制器, 实现了次同步振荡抑制功能。阻尼控制器的性能在 RTDS 实时模拟系统上进行了试验验证, 试验结果表明该控制器可以有效地抑制次同步振荡, 并且不会对整个控制系统的动态性能产生任何不利的影响, 即将在高岭工程中应用。

关键词: 背靠背; 直流输电; 次同步振荡; RTDS 仿真

Application of SSR damping controller in Gaoling back to back HVDC project

ZHANG Wang, CAO Sen, GUO Hong-guang, LI Tian-feng

(XJ Electric Corporation Ltd, Xuchang 461000, China)

Abstract: Gaoling Back-to-Back Project is the HVDC link which connects Northeast China and North China Grids. The Gaoling Converter Station is very close to Suizhong Power Plant. Analysis and Time Domain Simulation show that there are risks of Sub-Synchronous Oscillation (SSO) between the Converter Station and the large steam turbine-generators in Suizhong Power Plant. Based on the requirement of the Gaoling Project the SSR Controller was implemented and concerned damping functions are realized in the control system. The performance of the SSR Controller was verified by the RTDS system. The results indicate that it mitigates SSO effectively and does not have any negative effect to the overall dynamic response of the original control system. The SSR Controller will be applied in Gaoling project.

Key words: back-to-back; HVDC; SSR; RTDS

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)15-0027-06

0 引言

高岭背靠背换流站实现了东北和华北两大电网之间的直流互联。在东北电网侧, 换流站通过高(岭)一沙(河营)两回 500 kV 交流线路接入东北主网, 同时, 绥中电厂两台 800MW 发电机组通过两回 500kV 交流线路接入换流站。由于绥中电厂距离换流站很近, 同时换流站与东北主网的电气联系又比较薄弱, 理论分析和时域仿真表明, 高岭换流站投运后, 其与绥中电厂大型汽轮发电机组之间存在发生次同步振荡的风险。

直流输电系统与汽轮发电机组之间的次同步振荡是一个非常复杂的机电和电磁过程, 它包括了发电机轴系、发电机电磁系统、交流网络、直流输电及其控制系统等几大部分的相互作用。HVDC 一方面可能成为次同步振荡的诱发因素, 另一方面, 由

于 HVDC 的快速可控性, 可以通过采取适当的控制措施, 使 HVDC 成为抑制次同步振荡的手段。

1 直流换流站次同步振荡的基本原理

直流输电的整流侧一般采用定功率或者定电流运行方式, 逆变站一般采用定电压或定熄弧角运行方式。在没有并联交流线路的情况下, 整流站的控制规律为:

$$\Delta\alpha = \frac{K}{1+sT} \Delta I_{dr}$$

其中: K 和 T 分别为直流控制系统闭环的比例系数和时间常数; ΔI_{dr} 为直流电流 I_{dr} 的偏差值; $\Delta\alpha$ 为整流侧换流器导通角 α 的偏差值; s 为复频率。

图 1 和图 2 为从发电机一端看到的电气系统的阻尼系数 D_e , 随 K 、 T 变化的曲线。从图中可以看到: ①在整流站定电流控制方式下, 在频率较低的

区段内, 阻尼系数为负值, 这是造成次同步振荡的根本原因; ②随着比例系数 K 的增大或时间常数 T 的减小, 会出现负阻尼的频率由低频向高频扩展的现象, 从而有可能诱发更多扭振状态的不稳定。

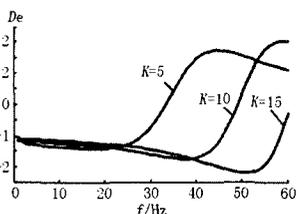


图 1 不同比例系数 K 下阻尼系数的频率响应
Fig.1 Frequency response of the damping coefficient with different gain K

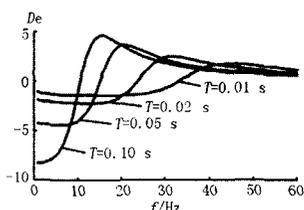


图 2 不同时间常数 T 下阻尼系数的频率响应
Fig.2 Frequency response of the damping coefficient with different time constant T

HVDC 整流器与其附近的汽轮发电机组轴系扭振相互作用的机理, 可做如下解释: 若机组轴系受到电磁转矩的小扰动, 导致某一扭振模态的转速和转角变化, 将引起机端电压幅值与相位的相应变化, 进一步引起换流母线电压幅值与相位的变化。对应于换流母线电压相位的变化将引起整流器触发角产生相同的变化, 从而导致直流电压和电流产生扰动; 而对应于换流母线电压幅值的扰动, 同样也会使直流电压和电流产生波动。

上述两者的作用将导致直流电压和电流偏离平衡状态, 而 HVDC 整流侧的定电流控制器将对这种偏差加以快速校正和调整, 从而引起发电机电磁转矩的变化, 最终又反馈作用于机组轴系。如果发电机转速变化与由此引起的电磁转矩变化之间相位滞后(包括闭环控制系统的附加相位滞后)超过 90° , 则将形成一种正反馈性质的扭振相互作用, 不断助增扰动幅值, 此时系统产生次同步振荡, 导致轴系扭振失稳。

2 影响阻尼次同步振荡的因素

EPRI EL-2708 研究项目的研究结果显示, 直流系统与大型汽轮机组之间的扭振对很多系统参数敏感, 影响最为显著的包括: 交流系统强度、直流功率、直流系统的控制模式等。其中相互影响最大的情况发

生在交流系统非常弱小的工况, 特别在直流输送功率仅由孤立的发电机提供的极端情况下更为严重。

系统中负的电气阻尼的产生主要是由于直流系统的功率电流控制的结果。直流控制器对应的带宽典型位于 $10\sim 30$ Hz 的范围。频率高于此带宽的扭振将呈现正阻尼。同步触发环节(带宽 $2\sim 5$ Hz)一般只对很低的扭振频率有影响, 比如低于 10 Hz 的扭振频率。

因 HVDC 的整流侧采用功率电流控制模式, 靠近大型汽轮机组的整流侧换流器具有引发次同步振荡的风险, 而采用电压与熄弧角控制的逆变器在稳态情况下没有这种风险。这是由于整流器和逆变器对于系统的相位变化响应方式不同造成的。

负阻尼由换流器控制的作用产生, 取决于其稳态运行点。直流传输功率越大其对负阻尼的贡献越大。另外, 整流器大角度运行对引发次同步扭振的影响也将更为严重。

值得注意的是次同步扭振的相互作用特别针对汽轮机组, 水轮机组不存在这些问题。

除了常规的直流控制之外, 还需考虑机组的自动电压调节和气门控制, 以及直流系统的一些辅助控制功能, 如功率阻尼控制 (POD) 等因素的影响。

3 高岭工程中的 SSR 阻尼

图 3 为高岭背靠背直流工程控制系统中阻尼控制器的原理框图。阻尼控制器的输入采用交流电压的相角信号, 输出为电流调制信号。阻尼控制器通过感知换相电压相角的变化动态的改变直流系统的运行电流或功率, 从而对发电机轴系的机械转矩产生作用, 使得从发电机一侧所看到的电气阻尼系数成为正值, 抑制次同步谐振的产生和发展。阻尼控制器的电流输出对电流参考值的修正范围为额定电流的 $\pm 5\%$ 之内, 该值的大小可以根据工程需要进一步优化。

阻尼控制信号相对谐振信号的相位非常重要。如果施加的控制信号与谐振信号是相对的, 不仅不能对振荡产生阻尼, 反而会激发振荡。因此, 阻尼控制器的校正环节需采用合适的传递函数对信号进行移相, 以保证获得良好的阻尼效果。

次同步振荡一般以相对慢的速度发展。因此在交直流系统故障及故障恢复期间, 为了防止阻尼控制器的不正确响应, 需要闭锁其控制作用。故障恢复后阻尼控制功能的开放采用缓慢加入的方式, 避免在阻尼次控制功能的突然的投入对系统造成冲击。

3.1 阻尼控制器组成

高岭工程的 SSR 阻尼控制器包括如下几个环节: 锁相同步环节、信号滤波环节、带通滤波器、

校正环节和电流控制环节。

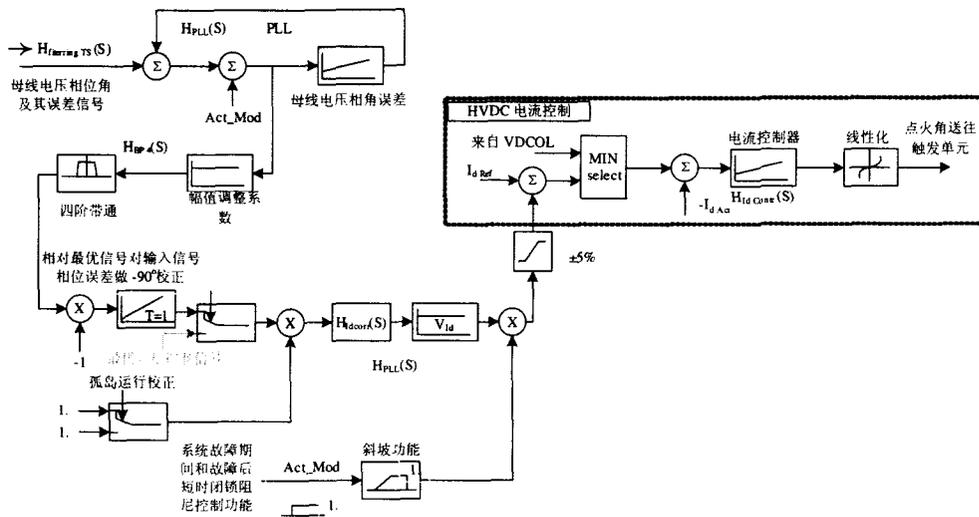


图 3 高岭工程阻尼控制器的原理框图

Fig.3 Schematic diagram of the damping controller for Gaoling project

(1) 锁相同步环节

锁相同步环节控制器的比例系数为 1；控制器的时间常数为 100 ms。

(2) 电流控制环节

采用常用的 PI 控制算法，比例系数取 0.9，积分时间常数为 25 ms。

(3) 校正环节

该环节需要根据整个系统的相-频和幅-频特性对相关参数进行优化。

3.2 校正环节配置

在配置阻尼控制器的校正环节时做了如下考虑：

不可能保证机组正好在某个频率点发生振荡，因此控制系统应该考虑在发生振荡的频率范围（10~30 Hz）内进行阻尼设计，保证在该频率范围内系统的阻尼系数为正。

理论上阻尼信号的相角范围应保持在 $-90^\circ < \Phi(f) < +90^\circ$ 之内。考虑安全裕度，高岭工程中相角范围确定为 $-45^\circ < \Phi(f) < +45^\circ$ ；

幅值保持在 0.8~1.2 之间。

在不考虑校正环节情况下，控制系统的频率响应如图 4 所示，阻尼调制信号的相角超过了 $+90^\circ$ 范围。

增加了校正环节的频率响应如图 5 所示，可以看出增加校正环节之后，最终控制系统在次同步振荡频率范围内的相角差被调整到 $\pm 45^\circ$ 范围内。

4 仿真试验验证

控制系统中增加阻尼控制器之后，利用 RTDS

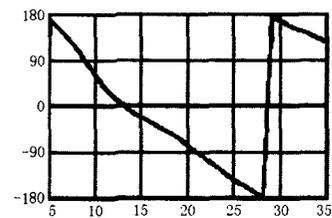


图 4 没有校正之前控制系统的频率响应

Fig.4 Frequency response without phase correction

系统对其性能进行了仿真和试验验证。试验在不同的系统接线和运行方式下进行，并通过交直流故障试验考察了 SSR 阻尼控制器对整个控制系统响应的影响。

4.1 含 220 kV 电磁环网运行方式

该运行方式下电网等值图如图 6 所示。试验考虑正常接线方式及检修方式，具体方式如下：

(1) 全接线方式一：高沙双线运行，绥中两机满发，高岭换流站满功率运行；

(2) 高沙 I 线检修方式一：高沙 I 线检修，绥中两机满发，高岭换流站满功率运行；

(3) 全接线方式二：高沙两回运行，绥中 #1 机组满发，高岭换流站满功率运行；

(4) 高沙 I 线检修方式二：高沙 I 线检修，绥中 #1 机组满发，高岭换流站满功率运行；

(5) 高沙 I 线检修方式三：高沙 I 线检修，绥中两机运行且满发，高岭换流站半功率运行；

(6) 高沙 I 线检修方式四：高沙 I 线检修，绥中两机运行且满发，高岭换流站单元满功率；

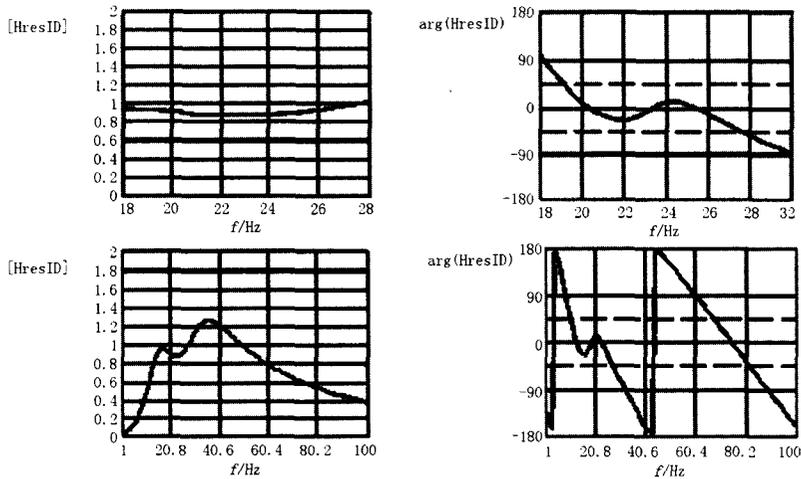


图 5 增加校正网络之后控制系统的频率响应

Fig.5 Frequency response with phase correction

表 1 含 220 kV 电磁环网运行方式的试验结果对比

Tab.1 Test results under the operation mode of 220kV network connected

运行方式	控制模式	无阻尼控制器	有阻尼控制器
全接线运行方式一：高沙双线运行，绥中两机满发	定功率	稳定	稳定
高沙 I 线检修方式一：高沙 I 线检修，绥中两机满发，高岭换流站满功率	定功率	收敛缓慢、等幅振荡	稳定
	定电流	收敛缓慢、等幅振荡	稳定
全接线运行方式二：高沙两回运行，绥中 #1 满发，高岭换流站满功率	定功率	稳定	稳定
高沙 I 线检修方式二：高沙 I 线检修，绥中 #1 满发，高岭换流站满功率	定功率	稳定	稳定
高沙 I 线检修方式三：高沙 I 线检修，绥中两机满发，高岭换流站半功率	定功率	收敛缓慢、等幅振荡	稳定
高沙 I 线检修方式四：高沙 I 线检修，绥中两机满发，高岭换流站单元满功率	定功率	稳定	稳定
高沙 I 线检修方式五：高沙 I 回线检修，绥中单机满发，高岭换流站单元满功率	定功率	稳定	稳定

表 2 绥中联变断开运行方式的试验结果对比

Tab.2 Test results under operation mode of without the 220 kV connection

运行方式	控制模式	无阻尼控制器	有阻尼控制器
高沙双回运行，绥中两台机组满发，高岭换流站满功率	定功率	稳定	稳定
高沙 I 回检修，绥中两台机组满发，高岭换流站满功率	定功率	收敛缓慢、等幅振荡	稳定
	定电流	收敛缓慢、等幅振荡	稳定
高沙 I 回运行，绥中 #1 满发，高岭换流站满功率	定功率	稳定	稳定
高沙 I 回线检修，绥中两台机组满发，高岭换流站半功率	定功率	稳定	稳定

(7) 高沙 I 线检修方式五：高沙 I 回线检修，绥中单机运行且满发，高岭换流站单元满功率。

各种运行方式下的仿真结果如表 1 所示。从表 1 可以看出，在没有阻尼控制器的情况，部分线路

检修情况下, 轴系振荡的收敛速度较慢, 并最终形成等幅振荡。控制系统增加阻尼控制器之后, 整个系统趋于稳定。

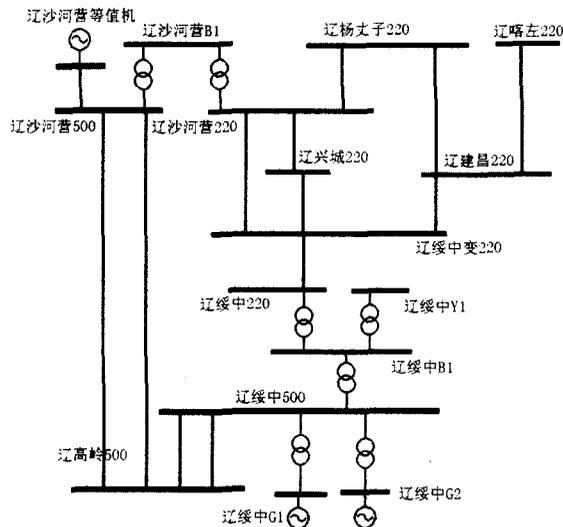


图 6 含 220kV 电磁环网运行方式

Fig.6 Operation with the 220 kV network connected

4.2 绥中联变断开运行方式

该运行方式下电网等值图如图 7 所示。试验考虑正常接线方式及检修方式, 具体方式如下:

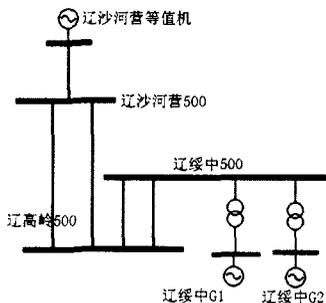


图 7 绥中联变断开运行方式

Fig.7 Operation without the 220 kV connection

(1) 高沙双回线运行, 绥中两台机组运行且满发, 高岭换流站满功率运行;

(2) 高沙 I 回线检修, 绥中两台机组运行且满发, 高岭换流站满功率运行;

(3) 绥中 #1 运行且满发, 高沙 I 回运行, 直流满功率运行;

(4) 高沙 I 回线检修方式, 绥中两台机组运行且满发, 高岭换流站半功率运行;

以上各种方式, 无阻尼控制器、有阻尼控制器时的不同的试验结果如表 2 所示, 从该表中可以看出阻尼控制器可以抑制该运行方式下出现的 SSR 振荡。

4.3 孤岛运行方式

为了验证极端情况下, 高岭换流站运行对绥中机组的影响, 并且验证阻尼控制器的有效性, 试验中增加了孤岛运行方式(图 8)。尽管该方式并非高岭换流站设计的运行方式, 但在故障情况下孤岛运行方式是可能出现的。试验考虑正常接线方式及检修方式, 具体方式如下:

(1) 绥中两机两线带直流满功率

(2) 绥中两机两线带直流半功率

(3) 绥中两机两线带直流单元单元满功率

(4) 绥中两机两线带直流单元单元半功率

(5) 绥中单机两线带直流单元单元满功率

(6) 绥中单机两线带直流单元单元半功率

(7) 绥中单机单线带直流双单元半功率

(8) 绥中单机单线带直流单元单元满功率

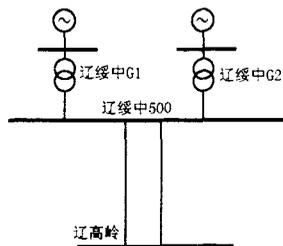


图 8 孤岛运行方式

Fig.8 Islanded operation

表 3 孤岛运行方式的试验结果对比

Tab.3 Test results under islanded operation

运行方式	控制方式	无阻尼控制器	有阻尼控制器
孤岛双机双单元满功率	定电流	发散	收敛
	定功率	发散	收敛
孤岛双机双单元半功率	定功率	轻微发散	收敛
孤岛双机单单元满功率	定功率	轻微发散	收敛
孤岛单机双单元半功率	定功率	严重发散	收敛
孤岛单机单单元满功率	定功率	发散	收敛
孤岛单机单单元半功率	定功率	轻微发散	收敛
孤岛单机双单元半功率	定功率	严重发散	收敛
孤岛双机满功率带负荷	定功率	收敛	收敛

表 3 汇总了孤岛运行方式下的各种工况在有和没有阻尼控制器情况下, 轴系振荡收敛的情况。可以看出, 孤岛运行方式下, 没有阻尼控制器系统会发生振荡失稳, 系统存在 SSR 问题。当直流控制系统中增加阻尼控制器之后, 系统可以很好地收敛并且稳定运行。说明阻尼控制器的作用可以保证在极端的孤岛运行方式下, 系统不会发生次同步振荡。

4.4 控制系统动态性能试验验证

为了验证阻尼控制器对整个控制系统动态性能的影响, 在投入阻尼控制器的情况下重新进行了直流控制系统动态性能试验, 试验内容包括:

(1) 交流线路故障

交流线路靠近换流站一侧发生单相接地短路故障, 100 ms 后故障相单相切除, 1 100 ms 时重合闸不成功, 切三相。

交流线路靠近换流站一侧发生单相接地短路故障, 100 ms 后故障相单相切除, 1 100 ms 时重合闸成功。

交流线路靠近换流站的一侧发生三相接地短路故障, 100 ms 后切三相。

(2) 换流母线故障

换流母线单相接地短路故障, 故障相电压降至故障前的 10%, 故障持续时间 100 ms。

换流母线单相接地短路故障, 故障相电压降至故障前的 10%, 故障持续时间 500 ms。

换流母线三相接地短路故障, 电压降至故障前的 10%, 持续时间 100 ms, 故障由主保护切除。

(3) 损失一个换流单元故障

(4) 功率阶跃试验

(5) 电流阶跃试验

上述试验的结果和没有阻尼控制器的控制系统的动态性能试验进行了对比。结果表明, 各种动态情况下有阻尼控制器和没有阻尼控制器, 动态响应特性相似。从而可以得出结论, 控制系统增加阻尼控制器不影响系统原有的动态性能。

5 结论

在控制系统中增加 SSR 阻尼控制器是直流输电系统常用的抑制次同步振荡的措施。针对高岭工

程的实际情况, 在其直流控制系统中增加了次同步振荡阻尼控制器并进行了 RTDS 仿真试验。试验结果表明, 即便是在发电机孤岛运行这一最为严酷的系统条件下, SSR 阻尼控制器也可以有效抑制次同步振荡。此外通过追加的各种故障试验和阶跃响应试验, 表明增加的阻尼控制器不影响控制系统总体的动态性能和控制品质, SSR 阻尼控制器可以在高岭背靠背工程中应用。

参考文献

[1] 北京网联直流工程公司. 东北—华北联网背靠背高岭换流站成套设计技术报告: 主回路参数[R]. 2005. BDCC. System Design Technical Report of the Gaoling Back-to-Back Converter Station for DC Connection of Northeast China and North China Networks: Main Circuit Parameters[R].2005.

[2] Subsynchronous Torsional Interaction, Study Report CSG/GG2/ED1.913.XS-0[R].2006.

[3] TRC of CSG Guizhou-Guangdong II Line $\pm 500\text{kV}$ DC Transmission Project, SSTI Study Report CSG/GG2/ED1.020.XS-a[Z].2005.

[4] XJ Electric Corporation Ltd. Guizhou-Guangdong II Line $\pm 500\text{kV}$ DC Transmission Project, Pole Control System Information Manuals CSG/GG2/EB2.341.XS-0[Z]. 2006.

[5] 许继电气股份有限公司. 东北—华北联网背靠背高岭换流站工程直流极控系统设计规范书, ED4 341 GL-0[Z]. 2007. XJ Electric Corporation Ltd. Design Specification of the Gaoling Back-to-Back Converter Station for DC Connection of Northeast China and North China Networks: Pole Control System ED4 341 GL-0[Z]. 2007.

收稿日期: 2009-07-01

作者简介:

张望(1950-), 男, 高级工程师, 长期从事高压直流输电控制保护系统的设备开发和工程; E-mail:wangzh@xjgc.com