

# 贵广直流次同步振荡抑制原理

宋述波, 袁鹏

(中国南方电网超高压输电公司广州局, 广东 广州 510405)

**摘要:** 针对贵广一回直流在送端孤岛运行情况下可能出现的次同步振荡进行了介绍, 并对贵广直流输电系统抑制次同步振荡措施的原理进行了简要的分析, 对西门子 SSR 阻尼控制器的设计进行了介绍, 通过在直流电流、功率控制回路中增加阻尼环节, 以消除次同步振荡的实际效果进行了实域仿真。从运用最优阻尼信号的仿真效果可以看出利用频率或者发电机速度偏差对直流功率进行调制能有效抑制直流系统可能引起的次同步振荡问题。

**关键词:** 次同步; 振荡; 阻尼; 抑制; 功率调制

## Principle of restraint SSR about Guizhou-Guangzhou HVDC

SONG Shu-bo, YUAN Peng

(EHV Transmission Company, Guangzhou 510405, China)

**Abstract:** This paper introduces SSR of Guizhou generators in isolated mode of Guizhou-Guangzhou HVDC, and analyzes restraint principle of the GuiGuang project, and explains the damper's design of Siemens. The effect of best damp signal is also discussed. The SSR can be eliminated by adding damp function in DC power control system. Optimized damp signal used in DC power modulation is useful to restrain SSR.

**Key words:** SSR; oscillation; damp; restraint; power modulation

中图分类号: TM71

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)05-0021-04

## 0 引言

任何物体在特定平面特定方向都有一个弹性形变系数, 特别对于火电机组的轴系, 由于火电机组的轴系相对较长、较细, 并且它由几个主要质量块组成(汽轮机段转子、发动机转子、联轴节和励磁机转子), 通过有限刚度的轴连接起来, 因此, 汽轮发电机受扰动时, 会造成汽轮发电机转子不同段之间的扭动振荡。因此在轴系上发生垂直于轴系平面的扭振可能导致火电机组轴系的损坏<sup>[1]</sup>。由于水电机组的轴系相对较短、较粗, 因此水电机组一般不会发生轴系的扭振。

电网中除有串补电容火电机组有可能产生次同步谐振外, 另外一种形式是由高压直流输电系统与火电机组之间引起的次同步扭振。在电网中有串补电容时由于电气阻尼在特定的频率范围内为一个较大的负值, 故容易发生次同步谐振。如果此时大型机组的固有机械振荡特性与电气特性互补, 此时就会发生次同步扭振, 这很有可能导致轴系的损

毁。

由于贵广直流担负着贵州电力送广东的重任, 贵广直流的快速调节能力对抑制系统低频振荡以及整个南方电网的安全稳定运行具有重要的意义, 但是贵广直流中的功率摇摆稳定功能 PSS 系统以及功率摇摆阻尼 PSD 系统在特定情况下有可能产生负阻尼特性, 在特定的情况下可能与发电机的轴系产生共振, 损坏发电机以及汽轮机轴。

通常大型火电机组的机械扭振频率位于 10~25 Hz 之间。原理上次同步扭振的频率均是由系统中偶然的事件触发的。由于摩擦以及阻尼环的存在, 发电机的机械阻尼特性通常均为正的, 但是如果某个频率下电气阻尼为比较大的负数的话, 此时总的阻尼特性若为负, 就会产生扭振。在机组可能发生次同步扭振的频率范围内, HVDC 系统整流测的电流控制器以及功率控制器有可能激发负的电气阻尼特性。这意味着在一定条件下产生的无阻尼谐振扭转, 有可能导致轴系的损坏。

因此有必要研究在不同潮流下, 贵广直流系统

与大机组轴系之间会不会产生次同步扭振, 以及是否需要采取抑制措施。在大型火电机组的出线直接连到贵广直流交流母线的那些机组尤其有可能发生次同步扭振。

## 1 贵广直流次同步研究的几个方面

贵广直流次同步谐振问题包括以下几个方面:

- 确定南方电网所有机组的单位转矩系数。
- 对贵广直流与安顺和纳雍电厂之间 353 MW

机组之间进行时域分析, 以确定是否会产生次同步谐振。在以上分析中均考虑了电机轴系的数据。

因为高传输功率以及高触发角的情况下容易产生次同步谐振, 故需要考虑以下几种情况:

情况 1: 孤岛运行方式下, 直流在额定电压下传输功率 2 550 MW。

情况 2: 交流强联网下, 直流在额定电压下传输 3 750 MW。

情况 3: 交流弱联网下, 直流在额定电压下传输 3 750 MW。

情况 4: 孤岛运行方式下, 直流在 70% 额定电压下传输 2 100 MW。

情况 5: 交流强联网下, 直流在 70% 额定电压下传输 2 100 MW。

情况 6: 交流弱联网下, 直流在 70% 额定电压下传输 2 100 MW。

孤岛运行方式为纳雍电厂, 安顺电厂及贵广直流与其余交流系统无联系。

交流弱联网为安顺至贵阳仅为 525 kV 双回连接。

交流强联网为安顺至电网所有可能连接的 525 kV 线路均在连接状态。

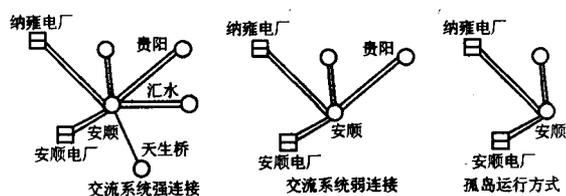


图 1 联网方式

Fig.1 Connecting mode

肇庆侧亦采用单位系数法进行分析, 分析结果表明没有发生次同步谐振的危险。

西门子公司采用 NETOMAC 程序对贵广直流次同步问题仿真的模型包括:

- 纳雍电厂 5 机系统, 安顺电厂 4 机系统, 包

括电压调节器, 汽轮机调节器, 以及轴系数据。

- 高压电网的相关的线路参数, 变压器参数。
- 贵广直流系统的暂态模型, 包括次同步跳闸控制模块。

在建模过程中以下项目是特别需要考虑的:

- 电气负阻尼特性主要是由于高压直流系统的功率与电流控制器产生的。控制器的典型带宽位于 10~30 Hz。当换流器没有任何控制或者跳闸设置时通常是产生正的电气阻尼。

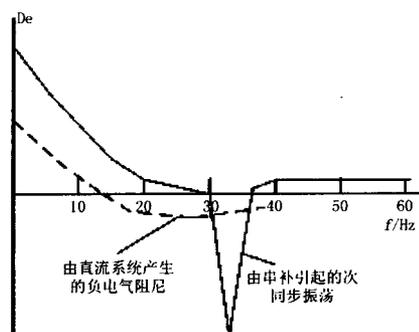


图 2 频率阻尼特性

Fig.2 Damp response of frequency

• 触发设置 (带宽在 2~5 Hz) 通常只影响频率小于 10 Hz 的扭振。从实践经验上说通常采用的等间距触发的效果要差于等角度触发。

• 当位于大型机组附近的换流器处于整流状态时有发生次同步扭振的危险, 因为整流器是处于功率和电流控制模式。逆变站在正常运行的稳态条件下处于电压和熄弧角控制模式。

• 在一个交流系统中的次同步扭振问题不会由直流系统传递到另外一个交流系统中。

• 换流器导致的负阻尼决定于换流器的稳态运行点。传输的功率越大换流器产生的负阻尼越大。

• 此外当直流系统运行在高触发角的情况下由于非特征谐波的影响, 次同步扭振问题更趋严重。

• 通常交流并联有助于改善状况。这意味着仅由 HVDC 系统联系的网络情况最糟。交流并联的系统在时域中的模型可以等值于一个具有小阻抗的恒定电源。

• 除了贵广直流系统中通常的控制功能外, 机组的电压自动调节器和原动机的调节特性, 以及 HVDC 系统的辅助控制功能 (例如功率振荡阻尼控制) 也必须考虑。

## 2 扭振大小的测量方法

简单的测量机组发生次同步扭振的可能性的方法是单位相互作用系数法  $UIF$ 。 $UIF$  的计算公式如下:

$$UIF_i = \frac{MVA_{HVDC}}{MVA_i} \left( 1 - \frac{SC_i}{SC_{TOT}} \right)^2 \quad (1)$$

其中:  $UIF_i$  为第  $i$  台发电机的单位相互系数;

$MVA$  为 HVDC 容量或者第  $i$  台机组的容量;

$SC_{TOT}$  为包括了第  $i$  台机组的 HVDC 交流母线处的短路容量;

$SC_i$  为不包括第  $i$  台机组的 HVDC 交流母线处的短路容量。

$UIF_i$  是由电力科学研究院提出的, 用来定量计算机组与高压直流系统以及其他机组的相互作用大小的系数。若某台机组的  $UIF_i$  远小于 0.1, 则认为该机组与换流器之间不会发生次同步扭振。然而必须注意的是, 大型机组的  $UIF$  在 0.1 附近, 在这种情况下需要进行进一步的研究, 如采用频率扫描法以及时域仿真。

机组的电气阻尼系数  $D_e$  定义为

$$\frac{\Delta T_e}{\Delta \omega_G} = D_e + \frac{\omega_b}{s} K_e \Rightarrow D_e = \text{Re} \left\{ \frac{\Delta T_e}{\Delta \omega_G} \right\} \quad (2)$$

其中:  $T_e$  为发电机的单位电气转矩;

$\omega_G$  为发电机的单位电气角速度;

$D_e$  为单位电气阻尼;  $\omega_b$  为旋转角频率;

$K_e$  为同步系数。

由传递函数  $\frac{\Delta T_e}{\Delta \omega_G}$  的相位  $\phi$  可以确定扭振是否

趋于稳定; 若  $-90^\circ < \phi < 90^\circ$  则扭振趋于稳定, 若  $\phi < -90^\circ$  或者  $\phi > 90^\circ$  则扭振趋于不稳定。

### 3 SSR 阻尼控制的设计

西门子在设计 SSR 阻尼控制系统时假定所有机械阻尼为 0。原理上通过调制电流和触发角指令就可以阻尼次同步振荡, 故如图 3 所示可以有两个不同的抑制振荡的阻尼回路。通常只有一个回路是在工作状态, 但两个模块都在控制回路内。通常建议采用电流指令进行调制, 因为电流模块的调制结果

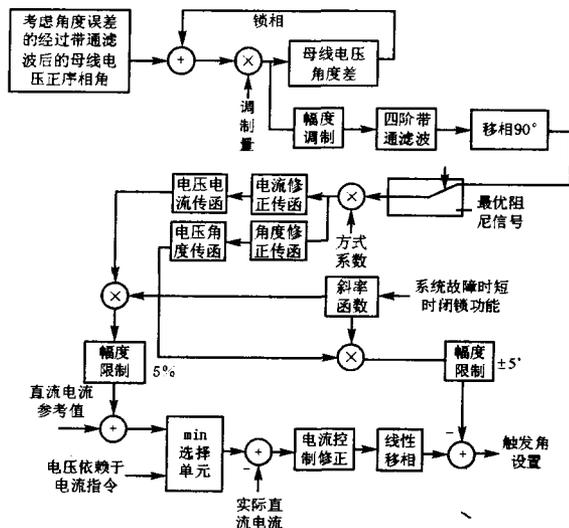


图 3 简化的阻尼控制器的结构

Fig. 3 Predigested flow chart of damp controller

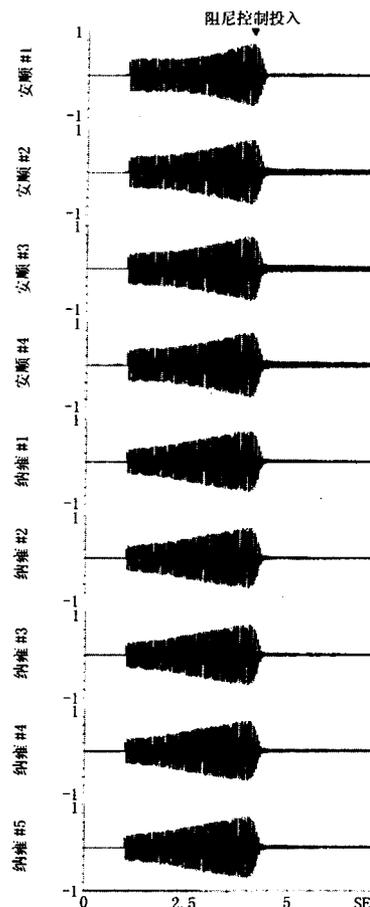


图 4 最优阻尼信号的应用效果

Fig. 4 Optimized damp signal's impact

并不直接用于触发, 而是经过一个比例积分控制器, 这样可以防止噪声干扰。电流输入信号被限制为额定值的 5%, 角度值限制为  $5^\circ$ 。为了阻尼次

同步谐振, 相对于谐振的阻尼角度的相位非常关键。若阻尼信号对于谐振的角度相位相反则谐振不会被削弱反而加强。因此输入信号必须经过传递函数  $H_{id}(s)$  和  $H_{\alpha}(s)$  移相。通常因为比例积分电流控制器对调制信号提供了额外的移相功能。通常次同步是变化缓慢的, 扭振的发生也是缓慢的。因此在系统发生故障以及在故障恢复时, 阻尼控制电路容易产生错误的信号, 必须闭锁。因此在系统发生故障时必须立即闭锁阻尼信号, 当故障消除时应再次使信号使能, 并经过一个斜率函数处理, 以消除开关动作的暂态过程。

最优阻尼信号在图 3 中是 22.9 Hz, 为母线的频率偏差 ( $\Delta f = f_{\text{actual}} - f_{\text{rated}}$ ), 或者发电机质块的速度偏差 ( $\Delta n = n_{\text{actual}} - n_{\text{rated}}$ )。从图 3 中可以看出, 阻尼信号投入以前, 振荡为发散的, 当最优阻尼信号投入后振荡很快平息。图中的轨迹为安顺有扰动时, 安顺电厂以及纳雍电厂机组中汽轮机质块与发电机质块之间的扭振轨迹。系统运行方式为孤岛运行方式, 直流电压为降压运行方式 70% 额定电压 (提高触发角)。

#### 4 贵广直流次同步谐振保护逻辑

SSR 次同步谐振保护逻辑见图 5。

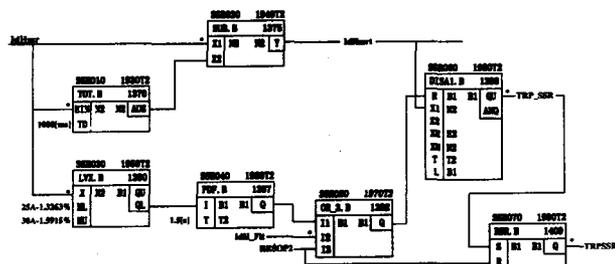


图 5 SSR 次同步谐振保护逻辑

Fig. 5 Protection logic diagram of SSR

其中: SSR010. EIN 为本极次同步谐振电流高;  
SSR030. X 为本极次同步谐振电流高;  
SSR020. X1 为本极次同步谐振电流高;  
SSR020. Y 为本极次同步谐振电流高;  
SSR050. I2 为 IdH 测量故障;  
SSR060. QU 为次同步谐振保护出口;  
SSR070. Q 为次同步谐振保护出口;

保护动作结果: 闭锁相应极;

动作条件:

$I_{dH} (15\text{Hz} \dots 25\text{Hz}) > 0.0159\text{pu}$ ;

出口时间: 1 000 ms;

后备保护: 对站直流保护中的 SSR 保护作为本站 SSR 保护的后备保护<sup>[2]</sup>。

#### 5 结论及建议

单位互转矩系数  $UIF$  揭示了安顺与纳雍母线上有可能与高压直流系统相互作用发生次同步扭振的机组。肇庆侧的单位互转矩系数比较低, 不存在发生次同步扭振的危险。

在次同步谐振频率范围内有 22.9 Hz 与 33 Hz 两个机械扭振模态。实域的仿真分析表明 33 Hz 的模态即使在机械阻尼为零的最恶劣的情况下也不会发生谐振。

实域仿真分析表明在纳雍及安顺机组与贵广一回直流之间会出现 22.9 Hz 发散振荡, 利用 PI 控制器滤波后的电流量进行控制能有效消除干扰信号, 使得调制更精确。因此必须在贵广一回直流安顺侧设置次同步扭振阻尼控制器<sup>[3]</sup>。仿真分析表明阻尼控制器投入后能有效阻止在所考虑的 6 种运行方式时发生 22.9 Hz 次同步振荡。

#### 参考文献

- [1] 电力系统稳定与控制[Z]. PRABHA KUNDUR. Stabilization and Control of Power System[Z]. PRABHA KUNDUR.
- [2] Gui-Guang HVDC Transmission Project: 913Z\_ Subsynchronous Torsional Interaction[Z].
- [3] Gui-Guang HVDC Transmission Project: DC Protection Manuals[Z]. Germany: Siemens, 2002.

收稿日期: 2006-09-02; 修回日期: 2006-12-19

作者简介:

宋述波 (1978-), 男, 工程师, 硕士研究生, 从事高压直流输电系统的运行维护工作; Email: songshubo@126.com

袁 鹏 (1979-), 男, 工程师, 学士, 从事高压直流输电系统管理工作。