

# 某水电站发电机组PSS试验分析

曹慧明 董宜琛 喻 叶

中国长江电力股份有限公司 湖北宜昌 443000

**摘要:** 本文利用 Philips–Heffron 模型在理论上推导出低频振荡的产生的机理, 详细说明了 PSS 的作用原理, 并具体分析了某水电站发电机组 PSS2A 的模型结构。以某水电站某发电机组 PSS 的现场试验为基础, 对试验方法及数据进行了研究分析, 验证了该发电机组的 PSS 能够为系统提供正阻尼, 可以有效抑制低频振荡。

**关键词:** 低频振荡; PSS2A; 励磁系统

## PSS test analysis of a generator set in a hydroelectric power plant

Huiming Cao, Yichen Dong, Ye Yu

China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443000, China

**Abstract:** In this paper, the reason of low-frequency oscillation is deduced theoretically by using Philips Heffron model. The working principle of PSS is explained in detail, and the model structure of PSS2A of a generator unit in a hydroelectric power plant is analyzed in detail. Based on the field test of PSS of a generator set in a hydroelectric power plant, the test method and data are studied and analyzed. It is verified that the PSS of the generator set can provide positive damping for the power system and effectively suppress low-frequency oscillation.

**Keywords:** Low frequency oscillation; PSS2A; Excitation system

### 引言:

由于电网结构的日益复杂以及系统规模的不断扩大, 电力系统的不稳定问题常常以低频振荡的形式出现。跨区域电网互联的跨度较大, 网络程度较为复杂, 倘若低频振荡抑制不及时, 则可能造成系统的出现系列故障。对电厂而言, 低频振荡会对其有功输出造成较大影响, 在外界扰动下, 转子会出现晃动现象, 如果此时系统阻尼较小, 则可能引起转子增幅振荡, 联络线的功率也会随之振荡, 严重的情况甚至会使发电机功角失稳, 进而造成机组解列。

某水电站某机组励磁系统采用 PID+PSS2A 控制模型。考虑到发电机转子绕组的磁场具有一定的滞后特性, 使得励磁系统产生滞后于功角的负阻尼转矩, 为此, 电力系统稳定器为其提供附加控制, 增加系统阻尼, 以达到抑制 0.1 ~ 2HZ 低频振荡的效果。本文以某水电站某发电机组的 PSS 试验为基础, 对低频振荡的产生机理、PSS 的原理作用进行了推导、分析, 最后结合 PSS 现场试, 对 PSS 试验过程及结果进行了详细分析, 以期能够为 PSS 试验提供理论支撑与数据参考。

### 一、低频振荡的产生原因

低频振荡是指在发电机并网运行中, 在小干扰的影响下, 发电机的定转子之间电角度产生相对位移, 在这种情况下, 如果系统缺少足够的正阻尼, 发电机转子可能会持续振荡, 振荡频率维持在 0.1–2HZ 之间。严重的低频振荡甚至会造成保护跳闸, 使得机组与系统解列。

电力系统产生低频振荡的主要有两个原因, 其一、远距离大功率输电使得发电机的阻尼下降; 其二、由于快速励磁系统的时间常数小、放大倍数大, 加之励磁系统具有一定的滞后性, 发电机阻尼特性降低或产生负阻尼特性。

如图 1 所示, 本文利用 Philips–Heffron 模型说明低频振荡产生的原因。Philips–Heffron 模型的上半部分回路表示发电机的转子动态方程, 下半部分回路表示发电机的励磁系统的动态方程。图 1 中的  $K_1$  表示固有同步系数,  $D$  表示固有阻尼系数, 根据发电机组的静态稳定条件能够得出, 系统不发生周期失稳的前提是  $K_1 > 0$ , 系统不发生振荡失步的前提是  $D > 0$ 。由图 1 可知,  $\Delta M_{e2}$  的变化与  $\Delta E'_q$  相关, 即励磁系统能够通过改变  $\Delta \delta$  来影响  $\Delta M_{e2}$ 。为

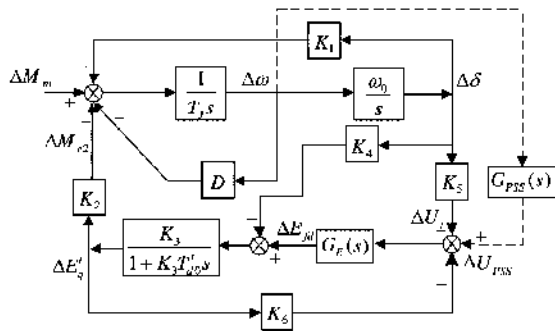


图1 Philips-Heffron模型

了更加详细的说明  $\Delta\delta$  与  $\Delta M_{e2}$  的关系, 同时用以进一步解释励磁系统对低频振荡的影响, 做出  $\Delta\delta$  与  $\Delta M_{e2}$  之间的传递框图, 如图2所示。

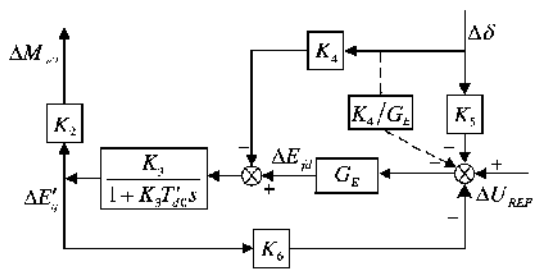


图2 计及励磁系统的发电机反馈传递函数

如上图所示, 利用相加点前移的方法, 将  $K_4$  的输出调整至  $G_E$  前的位置, 据此可得出计及励磁系统的影响后, 整个系统的传递函数为:

$$\frac{\Delta M_{e2}(s)}{\Delta\delta(s)} = \frac{K_2 G_3 (K_4 + K_5 G_E)}{1 + G_E G_3 K_6} \quad (1)$$

其中

$$G_3 = \frac{K_3}{1 + K_3 T'_{d0} s} \quad (2)$$

将励磁系统的传递函数简化为

$$G_E(s) = \frac{K_A}{1 + T_E s} \quad (3)$$

综上整个系统的传递函数表示为

$$\frac{\Delta M_{e2}}{\Delta\delta} = \frac{K_2 K_3 K_5 K_A + K_2 K_3 K_4 (1 + T_E s)}{(1 + T_E s)(1 + T'_{d0} K_3 s) + K_A K_3 K_6} \quad (4)$$

考虑励磁系统放大倍数  $K_A$  较大、时间常数  $T_E$  很小, 令  $s = j\omega_d$ 、 $T_H = T'_{d0} / (K_A K_6)$ , 可将 (4) 式化简为

$$\frac{\Delta M_{e2}}{\Delta\delta} = -\frac{K_2 K_5}{K_6 (1 + \omega_d^2 T_H^2)} + j\omega_d \frac{K_2 K_5 T_H}{K_6 (1 + \omega_d^2 T_H^2)} \quad (5)$$

上式中, 令  $\Delta M_{S2} = -\frac{K_2 K_5}{K_6 (1 + \omega_d^2 T_H^2)}$ ,  $\Delta M_{D2} = \frac{K_2 K_5 T_H}{K_6 (1 + \omega_d^2 T_H^2)}$ ,

则  $\Delta M_{e2} = \Delta M_{S2} \Delta\delta + \Delta M_{D2} s \Delta\delta$  (6)

由 (6) 式可知, 考虑发电机励磁系统后, 发电机所受力矩除了固有的同步转矩  $K_1 \Delta\delta$  以及阻尼转矩  $D \Delta\omega$  之外, 还受示因磁链变化引起的与  $\Delta\delta$  同相位的同步转矩  $\Delta M_{S2} \Delta\delta$ , 以及因磁链变化引起的与  $\Delta\omega$  同相位的阻尼转

矩  $\Delta M_{D2} \Delta\omega$ 。因此, 系统不发生振荡失步的条件为

$$K_1 + \Delta M_{S2} > 0 \quad (7)$$

$$D + \Delta M_{D2} > 0 \quad (8)$$

由 (7)、(8) 式可知,  $\Delta M_{S2} < 0$ , 在系统所带负载较轻时, 考虑到同步发电机固有的同步转矩系数  $K_1$  取值较大, 能够保证  $(K_1 + \Delta M_{S2}) \Delta\delta > 0$ , 即当  $\delta$  较小时系统不会发生非周期性失稳。在  $K_5 > 0$  的前提下,  $\Delta M_{D2} > 0$ , 进而  $(M_{D2} + D) \Delta\omega < 0$ , 说明轻载励条件下励磁系统使得系统的总转矩变大, 系统振荡的可能性较小。

当系统所带的负荷较重时,  $K_5 < 0$ , 由式  $\Delta M_{S2} = -(K_2 K_5) / (K_6 (1 + \omega_d^2 T_H^2))$  可知  $\Delta M_{S2} > 0$ , 说明励磁系统的同步转矩增大; 但此时  $M_{D2} < 0$ , 表明励磁系统的加入使得系统的总阻尼被削弱, 当  $(M_{D2} + D) \Delta\omega < 0$  时, 发电机转子会明显发生振荡, 励磁系统恶化了系统阻尼。

综上, 低频振荡的产生过程中, 转子角度  $\delta$  增大, 机端电压下降时励磁调节器慧增加励磁电流, 因励磁绕组的惯滞后特性使得转子回摆。转子回摆使得在转速  $\Delta\omega$  成为负值时, 磁链还在继续增大, 造成制动性质的电磁转矩增加, 进而使转子回摆的幅值增加, 即所谓 "负阻尼" 作用, 这便是快速励磁系统造成低频振荡的根本原因。

## 二、PSS的作用及原理

结合前面的分析做出阻尼转矩向量图, 如图3所示, 励磁系统产生附加转矩  $\Delta M_{e2}$  滞后于  $\Delta\delta$ , 为负阻尼, 容易造成系统低频振荡。PSS是以发电机的机电振荡模式的振荡频率为基础, 在低频振荡的频率下设计超前的相位信号来补偿励磁系统与发电机励磁绕组之间信号传输的滞后效应, 使得电机的附加电磁力矩与速度偏差信号  $\Delta\omega$  的相位相同, 增加低频振荡的正阻尼。PSS提供的与  $\Delta\omega$  同相位的正阻尼转矩  $\Delta M_p$  与励磁系统自身产生的负阻尼转矩  $\Delta M_{e2}$  的合成力矩在第一象限, 且此合成力矩在同步转矩以及阻尼转矩方向上的分量都为正值。为了能够有效抑制低频振荡, 需合理改变PSS的相关参数进而使PSS提供的超前相位与励磁系统产生的滞后相位相抵消。

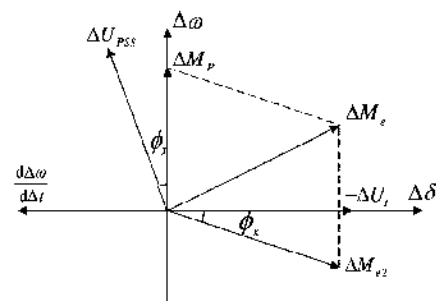


图3 阻尼转矩向量图

如图4所示, PSS的结构主要由放大、隔直、超前滞

后以及限幅环节组成，发电机的频率偏差  $\Delta f$ 、角频率增量  $\Delta \omega$ 、电功率偏差  $\Delta P_e$  中的一个或某两个信号为其输入信号。某水电站发电机励磁系统的 PSS 为 PSS2A 双输入模型，其输入信号需经过 2 阶直流隔离环节，且以角频率增量  $\Delta \omega$ 、电功率偏差  $\Delta P_e$  作为输入，合成加速度功率信号后经过级超前-滞后环节后限幅输出，PSS 框图如图 4 所示。

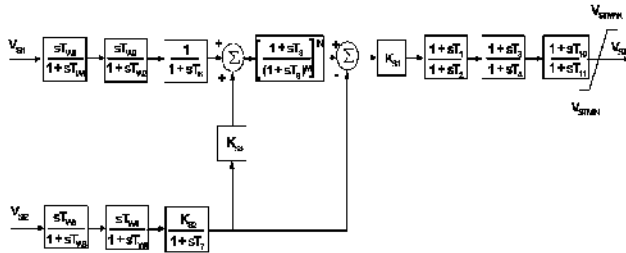


图4 PSS2A框图

其中  $K_1$ : 加权因子;  $K_2$ : P 信号增益系数;  $K_3$ : 加信号增益系数;  $T_{w1} \sim T_{w2}$ :  $\omega$  隔直时间常数;  $T_{w3}$ : P 隔直时间常数;  $T_1$ : 第一超前时间常数;  $T_2$ : 第一滞后时间常数;  $T_3$ : 第二超前时间常数;  $T_4$ : 第二滞后时间常数;  $T_5$ : 第三超前时间常数;  $T_6$ : 第三滞后时间常数;  $T_7$ : 积分时间常数;  $T_8$ : 斜坡跟踪滤波器的分母;  $T_9$ : 斜坡跟踪滤波器的分子; M、N: 表示斜坡函数的滤波器特性。

PSS 的输出叠加至励磁系统的电压叠加点，在频域分析把 PSS 的相频特性曲线以及励磁系统的相频特性曲线叠加对系统进行相位补偿，进而抑制低频振荡。

### 三、PSS 试验分析

根据电力系统网源协调技术规范要求，新投产、增容改造或励磁改造的机组需完成励磁系统模型参数测试和 PSS 试验。本文以某水电站发电机组 PSS 试验为例，进行 PSS 试验过程及数据分析，具体如下。

#### 1. 励磁系统无补偿特性测试

在进行无补偿特性试验时，发电机带额定有功，无功尽可能小，PSS 退出运行，在 PSS 输出 AVR 的信号叠加点输入白噪声信号用以取代 PSS 信号，计算 0.1 ~ 2HZ 范围内励磁系统的无补偿特性，并根据其无补偿特性以及传递函数计算 PSS 补偿相位，进而整定 PSS 参数。在励磁系统无补偿相频特性试验过程中要注意缓慢增加白噪声信号，白噪声信号不宜过大，使机端电压波动在 1% ~ 2% 即可。(见下表 1)

#### 2. 励磁系统有补偿特性试验

根据电力系统稳定器试验导则，在 0.1Hz ~ 2.0Hz 的振荡频率范围内，PSS 的参数整定应使 PSS 产生的附加电磁力矩滞后于  $\Delta P_e$  角度  $-60^\circ \sim -135^\circ$ 。根据无补偿相频特性计算可得到该水电站某机组 PSS 相频特性以及补偿后的相频特性，计算结果如图 5 和表 2 所示。

表 1 PSS 无补偿特性

$f/\text{HZ}$	$\phi_e/^\circ$ (AVR 相频)	$f/\text{HZ}$	$\phi_e/^\circ$ (AVR 相频)
0.1	-19	1.1	-114
0.2	-44	1.2	-128
0.3	-43	1.3	-139
0.4	-53	1.4	-139
0.5	-71	1.5	-139
0.6	-80	1.6	-130
0.7	-89	1.7	-128
0.8	-96	1.8	-129
0.9	-101	1.9	-134
1.0	-109	2.0	-132

表 2 PSS 有补偿特性表

$f/\text{HZ}$	$\phi_e/^\circ$ (AVR 相频)	$\phi_{PSS}/^\circ$ (PSS 相频)	$\phi_e + \phi_{PSS}/^\circ$ (补偿后相频)
0.1	-19	-41.80	-60.80
0.2	-44	-46.58	-90.58
0.3	-43	-40.89	-83.89
0.4	-53	-33.28	-86.28
0.5	-71	-25.63	-96.63
0.6	-80	-18.52	-98.52
0.7	-89	-12.18	-101.18
0.8	-96	-6.63	-102.63
0.9	-101	-1.82	-102.82
1.0	-109	2.29	-106.71
1.1	-114	5.80	-108.2
1.2	-128	8.78	-119.22
1.3	-139	11.30	-127.7
1.4	-139	13.42	-125.58
1.5	-139	15.19	-123.81
1.6	-130	16.65	-113.35
1.7	-128	17.86	-110.14
1.8	-129	18.83	-110.17
1.9	-134	19.61	-114.39
2.0	-132	20.21	-111.79

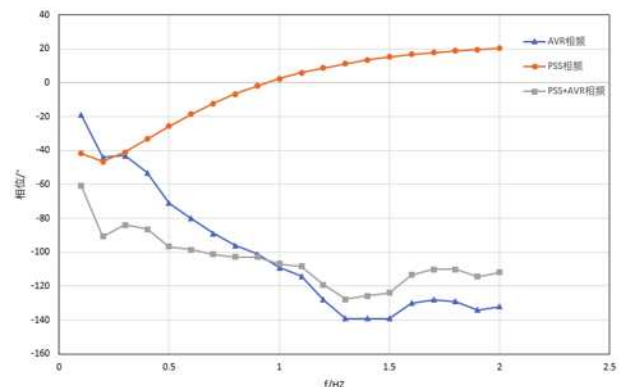
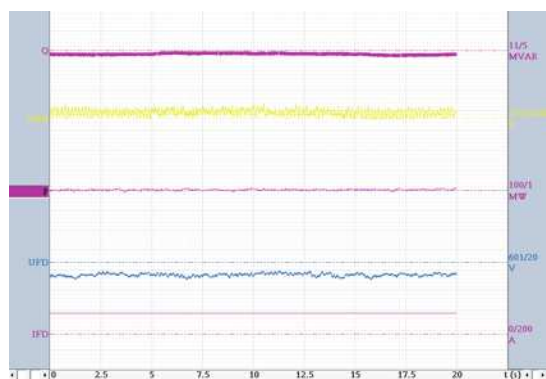


图 5 励磁系统有补偿、无补偿相频特性曲线

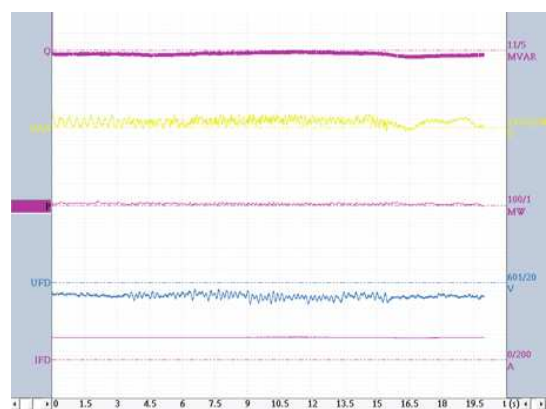
### 3. PSS 临界增益试验

理论上, PSS的增益与其提供的正阻尼成正比;但实际上, 由于电力系统作是的高阶系统, 如果PSS增益过大也可能导致PSS调节失稳, 加剧系统的不稳定性。以此需通过现场试验来确定PSS合适的最大增益, 即临界增益。

PSS临界增益的大小主要受电力系统的运行方式、机组的额定功率、发电机的负荷大小、在系统中PSS的配置等诸多因素的影响。现场试验中, 在选定的相位补偿下缓慢的增加PSS的增益数值, 观察整个过程中转子电压以及无功功率的变化情况, 直到出现不稳定现象为止, 具体为励磁电压以及机端电压出现1 ~ 4HZ的剧烈振荡现象, 此时PSS增益即为临界增益。PSS临界增益的选取一般取临界增益的1/5 ~ 1/3, 使其具有一定的裕度。发电机组PSS试验过程中缓慢增加增益 $K_{s1}$ , 部分临界增益试验波形如图2所示, 能够看出, 当 $K_{s1}$ 增加至20时, 机组无功以及电压波形出现1HZ以上的振荡。根据试验情况将PSS的临界增益确定为20, PSS的增益 $K_{s1}$ 取值确定为4。



a) 临界增益  $K_{s1} = 8$



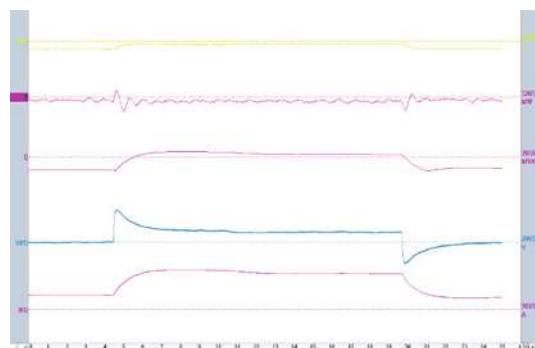
b) 临界增益  $K_{s1} = 20$

图6 临界增益试验录波图

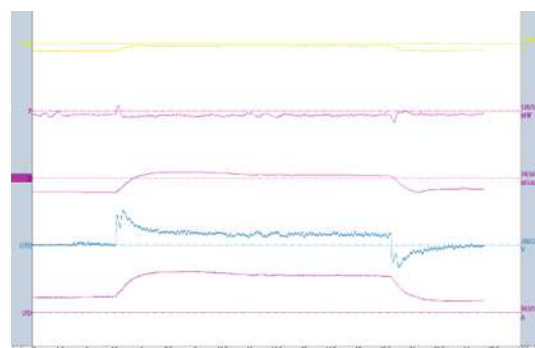
### 4. PSS 阻尼效果检验

采用励磁系统负载阶跃试验来检验PSS投入效果, 即进行有、无PSS时的负载电压阶跃试验, 通过观察PSS

投入和退出运行时的有功功率震荡情况, 按照相关技术标准计算测试结果, 用以判断PSS效果并确认PSS运行参数。在3%阶跃条件下以不同的临界增益进行PSS的投退并录波, 比较PSS投入和退出两种情况下有功功率的波动情况。PSS效果检验的部分录波如图7所示, 当退出PSS出现阶跃时机端有功功率会有多次摆动, 在投入PSS时功率摆动幅值明显减少, 且在第一次振荡的后半个周期就被明显抑制, PSS的阻尼效果非常明显。



a) 退 PSS 3% 阶跃



b) 投 PSS 3% 阶跃

图7 PSS 阻尼效果检验录波

### 四、结束语

本文介绍了同步发电机励磁系统造成低频振荡的根本原因, 详细说明了PSS抑制低频振荡的原理, 结合某水电站PSS试验数据分析了PSS的作用, 其PSS试验结果表明, 某水电站的励磁系统对低频振荡具有明显的抑制作用, 有效的为系统提供了正阻尼, PSS参数的合理配置为电网的安全稳定提供了重要保障。

### 参考文献:

- [1]刘翔宇, 孟杰, 何玉灵, 李志雄, 周文, 王晓蔚, 樊锐轶. 考虑电网动态稳定特性的PSS相频特性优化[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2018, 45(06): 35-43.
- [2]沈轶君, 吴跨宇, 韩兵, 卢岑岑. 新型电力系统稳定器动模试验研究[J]. 浙江电力, 2018, 37(10): 31-37. DOI: 10.19585/j.zjdl.201810006.
- [3]邵伟, 徐政. 励磁系统参数整定研究[J]. 中国电机工程学报, 2002(10): 13-18.