

电力系统稳定器试验在发电厂中的应用

雷 振

中国水利水电第八工程局国际公司, 湖南 长沙

收稿日期: 2021年9月3日; 录用日期: 2021年9月17日; 发布日期: 2021年10月13日

摘 要

电力系统低频功率振荡是电力系统中的一种有功功率振荡, 系统振荡的弱阻尼也不能达到电力系统安全稳定运行的要求, 发电机的转子和电网的低频振荡可以通过电力系统稳定器来削弱, 一旦发电机的有功达到一个可调值和发电机的电压低于一个可调范围时, 就可以投入PSS。运行操作人员在需要投入电力系统稳定器时, 可以不必进行任何的调节, 亦可以在任何时候手动退出, 而如果发电机在运行时的电压和有功超过了定值、或是在发电机解列时也都可以自动退出。PSS的投入/切除在HMI界面的“系统控制”菜单中, 也可以在HMI界面下方直接选择。为了取得PSS对低频振荡的抑制效果, 主要可以利用对励磁系统相频特性的测量和PSS参数的整定来实现。

关键词

电力系统, 稳定器, 低频振荡, 励磁调节器, 发电机

Application of Power System Stabilizer Test in Power Plant

Zhen Lei

Sinohydro Engineering Bureau 8 Co., Ltd., Changsha Hunan

Received: Sep. 3rd, 2021; accepted: Sep. 17th, 2021; published: Oct. 13th, 2021

Abstract

The low-frequency power oscillation is a kind of active power oscillation in power system. The system oscillation appears weak damping which is not meet the requirements of stable operation of power system. Generator rotors and power grids can reduce Low-frequency oscillations through power system stabilizers, and once the generator is active at tone contours and the generator voltage is lower than a tunable range, PSS can put be in. The operator does not need to make any adjustments to the power system stabilizer, and the PSS can be manually removed at any time and

can be automatically removed if the active power and voltage of the generator exceed the set values or the generator is unemployed. The input/removal of PSS is in the "System Control" menu of the HMI interface, or can be selected directly under the HMI interface. In order to obtain the inhibition effect of PSS on low-frequency oscillation, the phase-frequency characteristics and PSS parameters of the excitation regulator are measured and adjusted.

Keywords

Power System, Stabilizer, Low-Frequency Oscillation, Excitation Regulator, Generator

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1996 年美国西部电力系统(WSCC)的停电事故, 事后查明原因主要是由电力系统低频振荡造成的, 当时低功率振荡的出现是被一条 500 kV 输电线跳闸所激发的, 紧接着波及其他的输电线和发电机组, 最后造成整个电网系统解列成了四个孤岛电网。随着电网系统的发展, 快速励磁系统的广泛应用和电力系统规模的不断扩大, 相对来说电力系统的正阻尼已经变得越来越弱, 此时, 用来提高系统正阻尼的电力系统稳定器就显得尤为重要。

2. 试验理论分析

关于低频振荡产生的原因, 当前广泛认可的观点是由于机电振荡模式阻尼缺乏的结果, 顺着这个思路来分析, 得出低频振荡的出现主要有以下三点: 1) 大跨度区域电力系统弱连接; 2) 远距离大规模输电; 3) 快速、高增益励磁系统的普及。

相对于低频振荡的研究, 首先需要明确低频振荡的稳定性, 即: 1) 当振荡幅值不断升高且最终导致电力系统崩溃时, 通常这种情况归为不稳定; 2) 振荡发生后能够快速平息的情况归为系统振荡有较好的阻尼效果, 而把低频振荡发生后延续的时间需要数秒甚至一分钟才能消失的情况归为系统弱阻尼, 而按照系统安全运行的要求, 这种稳定情况下的弱阻尼是不能被接受的[1]。

3. 试验所需运行的工况

(一) 在试验过程中, 测试机组必须能够在额定有功负荷 80%和 100%的工况下连续稳定运行, 功率因数尽可能接近“1”;

(二) 电厂非单机系统运行时, 被试验机组不带本机的厂用电负荷。

4. 试验所需满足的条件

(一) 试验已取得了调度中心和有关方面的许可;

(二) 在试验前, 必须确认励磁系统满足试验要求, 并把噪声信号的接口点引出来, 以便于接线;

(三) 除 PSS 外, 励磁调节器的所有保护和附加限制都必须投入正常运行, 且励磁控制系统和机组的性能都能满足试验的需要;

(四) 机组中与试验相关的继电保护需投入运行;

(五) 机组的 AVC 和 AGC 功能都在“OFF”位置，而同一母线、同一电厂的其他机组 PSS 功能也都在“OFF”位置。

5. 试验前的准备接线工作

将发电机定子电压、定子电流、转子电压、转子电流等参数信号接加到录波仪上，并如实记录机端电压和有功功率的试验数据。

把分析仪输出的白噪声信号接到励磁调节器的输入端。发电机组的各项参数与 PSS 传递函数均来自于系统，并已设置完成[2]，见图 1。

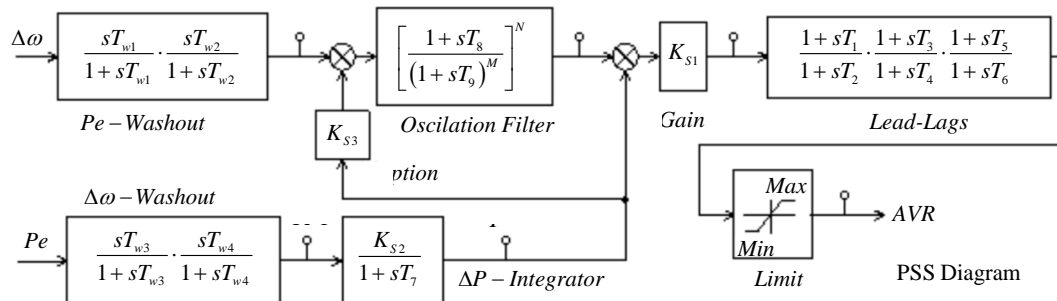


Figure 1. PSS transfer function of excitation system

图 1. 励磁系统 PSS 传递函数

6. 试验内容与方法

(一) 励磁系统无补偿滞后相频特性测量

1) 测量工况及励磁调节器运行方式要求

① 在 80% 和 100% 额定有功负荷的两种工况下测量，测量时要求 PSS 在“OFF”位置，功率因数接近到“1”，调节器打到“远方”位置，机组的 AVC 和 AGC 模式均在“OFF”位置。

② 整个机组的无功功率、有功功率等参数的调控，均在远方通过 DCS 来完成调整。

2) 测量过程

① 接线之前，白噪声信号的输入通道是否已经处在“OFF”位置，必须确认完毕；接线之后，仍需确保白噪声信号的输入通道处在关闭状态，只有在调节器能正确采集到频谱分析仪加的 1 V 峰峰值大小的白噪声信号且等到输出降为 0 V 后，才能打开白噪声信号的输入通道。

② 将频谱分析仪输出的白噪声信号通过试验连接线加到调节器的输入端子上，此外，调节器的机端三相电压信号需被引入频谱分析仪，以此作为白噪声扰动的响应信号。

③ 从 0 V 缓慢增加白噪声信号的电平，直到发现机端电压表指针有明显波动为止，在 0~4 Hz 的频率范围内测量励磁系统滞后相频特性，记录每 0.1 Hz 下的试验数据。

④ 在每个不同的工况测完后，必须先将白噪声信号的输出电平缓慢降为 0 V，再去关闭白噪声信号的输入通道。

⑤ 试验完成后，且确保 AVR 的输入通道在“OFF”位置，才能拆除外部的试验接线，下一工况的操作步骤如同上所述。

(二) PSS 整定参数的计算

根据相频特性的测量结果，持续调整电力系统稳定器的相位补偿，使其在 0.1 Hz~2.0 Hz 的频带范围内出现相位滞后的情况，而此时将力矩向量对应到 $\Delta\omega$ 轴在 $-10^\circ \sim 45^\circ$ 之间；并使其振荡频率在 0.3 Hz~0.8

Hz 频率范围内，而力矩向量对应于 $0^\circ \sim 30^\circ$ 之间的 $\Delta\omega$ 轴，并接近 0° ，通过以上操作得出相频特性数据，见表 1。

Table 1. Data table of phase frequency characteristics

表 1. 相频特性数据表

频率 (Hz)	AVR 无补偿相频特性($^\circ$)	PSS 有补偿相频特性($^\circ$)	AVR + PSS ($^\circ$)	频率 (Hz)	AVR 无补偿相频特性($^\circ$)	PSS 有补偿相频特性($^\circ$)	AVR + PSS ($^\circ$)
0.1	-42	35	-7	1.1	-100	87	-15
0.2	-63	61	-2	1.2	-93	85	-8
0.3	-68	70	2	1.3	-98	88	-10
0.4	-78	78	0	1.4	-90	85	-5
0.5	-80	81	1	1.5	-90	86	-4
0.6	-84	85	1	1.6	-87	88	1
0.7	-88	88	0	1.7	-84	87	3
0.8	-91	89	-2	1.8	-83	84	1
0.9	-95	88	-7	1.9	-86	84	-2
1.0	-99	87	-12	2.0	-82	85	3

(三) PSS 临界增益测定

发电机的有功在靠近额定功率的状态下运行，并确定 PSS 输出为“0”后，将电力系统稳定器投入运行，此时，监控发电机转子电压或者调节器的输出是否存在持续振荡的现象，如果没有，则继续调大 PSS 增益，直至看到发电机转子电压或者调节器的输出出现持续振荡的现象为止，此时得到的增益就是 PSS 的临界增益[3]。

(四) PSS 增益值设定

将 PSS 增益的当前值设置为刚刚测定的临界增益值的 20%~35%，然后将 PSS 投入并保持发电机稳定运行，而机端电压的波动需小于正常运行时额定电压的 1%才满足试验要求。

(五) PSS 试验效果检验

在励磁调节器中设定额定电压的 1%~4%作为阶跃量，然后进行投/切 PSS 的同阶跃量下的阶跃试验，最后通过录制的波形图来比较发电机有功功率的摆动次数和幅度，以检验 PSS 的作用效果[4]，见图 2、图 3。

(六) 发电机未投 PSS 时带负载的电压给定阶跃响应试验

1) 测量工况及励磁调节器运行方式要求

① 机组的 AVC 和 AGC 模式处于退出状态，并在机组的功率因数接近“1”、且额定有功负荷为 80% 和 100%的两个工况下来进行试验，PSS 退出运行，励磁调节器投“就地”控制方式。

② 整个试验过程均在远方按照上述工况要求来调控机组的无功功率和有功功率，只有发电机电压阶跃的触发和取消，在就地完成操作。

2) 试验过程与方法

此试验下变化的有功和无功，在整个过程中均需要记录定子电压阶跃响应的波形。定子电压阶跃值设定在 $\pm 2\%$ 左右，若不足以引起机组有功出力产生显著的波动，需要设定一个阶跃值为 3%或 4%。为了了解机组的振荡特性，在试验过程中，需要详细记录有功的数据，并监视发电机的有功波动[2]。

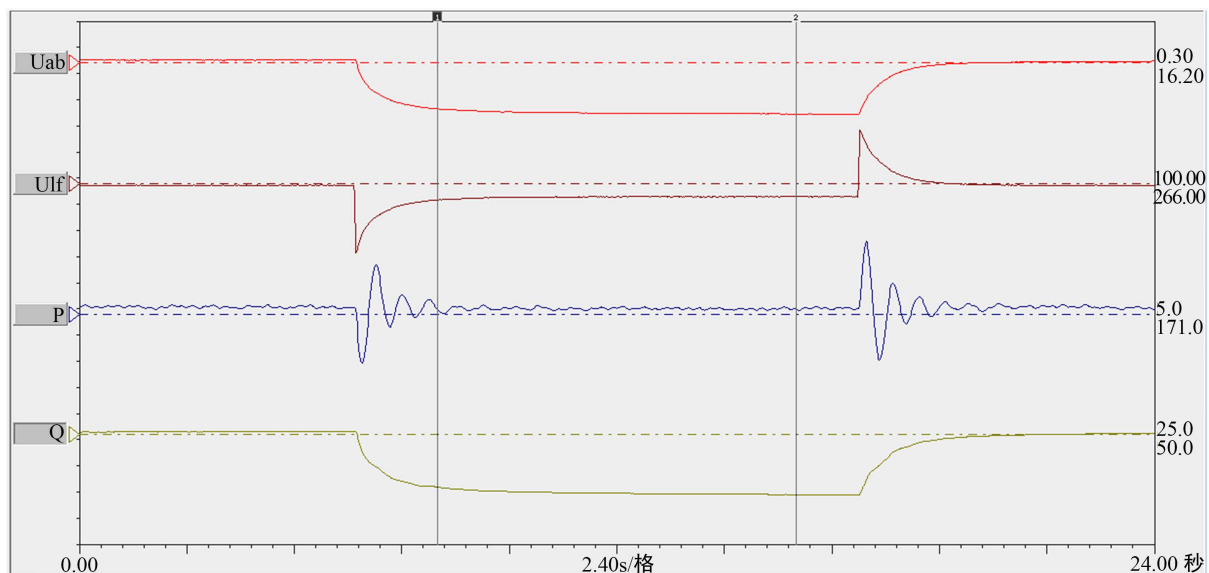


Figure 2. 4% step waveform without input of PSS

图 2. 未投入 PSS 的 4%阶跃波形图

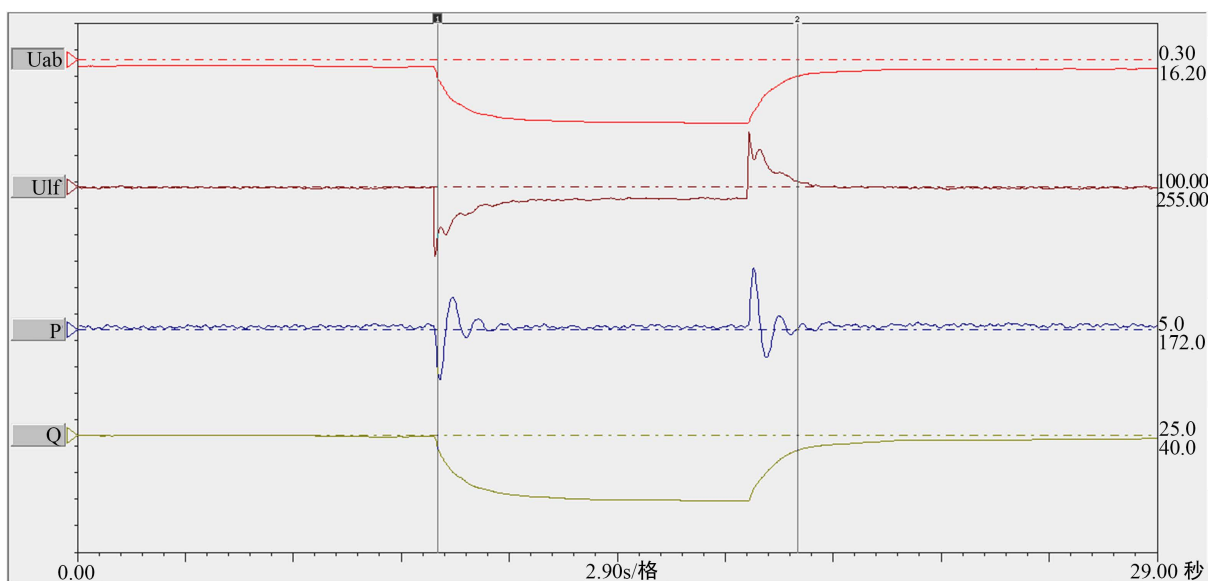


Figure 3. 4% step waveform with input of PSS

图 3. 投入 PSS 的 4%阶跃波形图

(七) PSS 的投、切试验

当机组负荷分别调整到 80%和 100%、且功率因数接近“1”时，在远方通过 DCS 分别进行投入 PSS、切除 PSS 的操作，然后对发电机的定子电压、有功和无功等参数进行监测，整个投切过程均不应有明显的波动。

(八) 发电机投入 PSS 时带负载的电压给定阶跃响应试验

此试验的主要目的是检测励磁系统的 PSS 对阻尼功率振荡的抑制效果，若达不到明显的预期效果，则重新需要对 PSS 的相位补偿参数和 PSS 的放大倍数进行整定和调整[5]。试验操作步骤和试验要求与未投 PSS 模式下的阶跃响应试验基本上是相同，最大区别在于此时需投入 PSS。

(九) PSS 反调试验

调整发电机的工况如下：功率因数为“1”、机组以 80%或 100%的额定负荷运行、并把 PSS 模式投入运行，此时按照正常运行情况下机组允许的最快调节速率来进行原动机功率的调整，最后监视发电机无功的波动情况，即为反调[6]。

(十) PSS 限幅试验

在做发电机负载阶跃试验过程中，需将 PSS 的输出限幅整定值设到 $\pm 0.1\%$ 或 $\pm 0.2\%$ ，然后观察确认 PSS 的输出限幅效果，进而把 PSS 的输出限幅整定值调整到 $\pm 5\% \sim \pm 10\%$ 的范围内，最后通过对比两个限幅值状态下的定子阶跃情况来验证 PSS 输出限幅功能的实际作用效果[3]。

(十一) PSS 自动投退功能试验

将 PSS 自动投、退定值临时调整为略低于机组当前功率值，降低机组功率低于设定值，再恢复至原功率，确认 PSS 自动退出、投入功能正常。整定 PSS 自动投切功率值，应大于发电机正常运行的最小有功功率，保证机组在可能出现的各种稳态运行情况下 PSS 均能可靠投入。

(十二) PSS 有补偿特性测试

此试验的接线方式基本上与无补偿相频特性测试的接线方式是相同，主要区别是在 PSS 的电功率输入点引入来自动态分析仪输出的白噪声信号，且在 FLC 处引入发电机 PT 二次侧的信号，这样的测试是用来检验 PSS 相位补偿参数整定结果合理与否以及精确度。

7. 试验整个过程的时间安排

(一) 在 PSS 处于退出状态下机组带 80%和 100%有功负荷的相频特性测量，每个工况下，机组的试验测量时间大概需要 1 小时左右。

(二) 计算 PSS 整定值，时间大概需要 1 个小时。

(三) 依据 PSS 整定的结果，在机组带额定负荷的 80%和 100%的工况下，进行发电机定子电压阶跃试验和 K_{s1} 的调整(此时的 PSS 处于退出状态，阶跃幅值在 $\pm 2\% \sim \pm 4\%$ 之间，无功接近“0”)，每个工况试验时间需要 1 小时左右。

(四) 投切试验和反调试验，大概各需要半小时左右。

(五) 最后进行的有补偿特性测试试验，大概需要 1 小时左右。

8. 试验过程中的注意事项

(一) 除 PSS 外，励磁调节器、发电机继电保护的压板都已经投运。

(二) 随时准备进行切换和跟踪调节器的备用通道。

(三) 接线时切忌造成发电机定子 CT 开路和 PT 短路。

(四) 在发电机负载电压阶跃试验中，应控制阶跃量在 2%~4%。

(五) 在试验过程中，若出现发散性有功或功率振荡，需马上停止试验，切除 PSS 运行模式，并立即增加机组励磁电流，使振荡平息。

9. 试验结论

通过此次现场实际试验，确定了电厂发电机组的 PSS 参数，并通过对比图 2 与图 3 的波形，然后进一步来检验 PSS 是否提供了适当的阻尼，即：有 PSS 时发电机负载阶跃试验的有功功率波动衰减阻尼比大于 0.1；有 PSS 的发电机负载阶跃试验的有功功率波动次数比无 PSS 的有功功率波动次数明显减少，且小于 1 次，由此可以得出满足阻尼比的要求[3] [5]。通过此试验，也验证了 PSS 在电厂中的实际应用效果，比较有、无 PSS 情况下负载阶跃有功功率的振荡频率，检验出 PSS 相位补偿和增益是否合理，有

PSS 的振荡频率控制在无 PSS 的振荡频率的 80%~120%之间, 而有 PSS 比无 PSS 的负载阶跃响应的阻尼比有了明显提高, 可以看出励磁系统投入 PSS, 对阻尼功率振荡起到了有效的抑制效果。PSS 除了能抑制低频振荡外, 还能有效地抑制区域型低频振荡, 即 PSS 对于在 0.1 Hz~2.0 Hz 之内的振荡都有抑制作用, 这对提高电力系统的稳定性有很大的帮助。

结束语: 我国的电网系统自上世纪 80 年代以来, 就时常发生低频振荡的问题, 而随着大容量机组的不断投入运行和快速励磁的广泛应用, 加上电网规模不断发展扩大, 现在低频振荡已经给电网的安全可靠运行带来了巨大的威胁。目前, 我国电网系统联系还较为薄弱, 正在不断完善跨区互联电网, 而大跨区的输送功率几乎已经快达到限额, 整体上来看, 大区电网运行的安全性、稳定性、可靠性等问题还比较明显, 目前还是处在相对艰难的阶段[1]。虽然, 在过去的数十年里许许多多的科研专家对低频振荡问题进行了大量的研究, 并在使用电力系统稳定器解决低频振荡问题方面也取得了不错的效果, 但是对于其本质还需要更多深层次的研究和突破, 期望能早日找到行之有效的解决办法。

参考文献

- [1] 杜文娟, 王海风. 电力系统低频功率振荡阻尼转矩分析理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 2-4.
- [2] 吴跨宇, 于钊, 等. 同步发电机励磁系统建模导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2019: 21-23.
- [3] 吴剑超, 王超, 等. 电力系统稳定器整定试验导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2018: 2-8.
- [4] 徐福安, 赵红光, 等. 同步电机励磁系统大、中型同步发电机励磁系统技术要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007: 3-4.
- [5] 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.
- [6] 袁亚洲, 高文, 耿敏彪, 董军阳. 电力系统稳定器反调效果的研究与验证[J]. 南方电网技术, 2014, 8(3): 78-82.