

# 一种改进型 PSS4B 电力系统稳定器的工程化应用研究

吴跨宇<sup>1</sup>, 吴龙<sup>2</sup>, 卢岑岑<sup>1</sup>, 陆海清<sup>1</sup>, 熊鸿韬<sup>1</sup>

(1. 国网浙江省电力公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014; 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

**摘要:** 分析了电力系统稳定器 PSS4B 的设计理念和工作原理, 分析和验证 PSS4B 相对于 PSS2B 在低频段振荡抑制能力上的优势及其在工程化应用中存在的问题。介绍了一种改进型 PSS4B 电力系统稳定器 PSS4B-W 的设计思路, 并根据实际发电机组测频扰动试验波形给出了 PSS4B-W 相位校正计算方法。通过负载电压阶跃试验对比验证了其校正效果, 证明了经相位校正的 PSS4B-W 既能满足高频段相位补偿要求, 又能在低频段提供较强抑制能力。最后提出了 PSS4B 和 PSS4B-W 的工程化应用建议。

**关键词:** 电力系统稳定器; 低频振荡; PSS4B; PSS4B-W; 工程化应用

## Engineering application of an improved PSS4B power system stabilizer

WU Kuayu<sup>1</sup>, WU Long<sup>2</sup>, LU Cencen<sup>1</sup>, LU Haiqing<sup>1</sup>, XIONG Hongtao<sup>1</sup>

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China;

2. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** The design conception and operating principle of PSS4B power system stabilizer are presented, the advantage of PSS4B's low frequency oscillation suppression ability is verified by theoretical analysis and comparison with PSS2B. After that, this paper puts forward an improved PSS model named PSS4B-W based on the existing problems on PSS4B's engineering application. PSS4B-W phase modulation method is proposed by generator excitation system's no compensation frequency response test, and the phase modulation effect is verified by generator load voltage step test. The step test result shows that PSS4B-W can not only meet the requirements of high frequency band's phase modulation, but also provide better suppression effect on low frequency band. Finally, this paper summarizes and presents the recommendations and advices of PSS4B and PSS4B-W's engineering application.

**Key words:** power system stabilizer; low frequency oscillation; PSS4B; PSS4B-W; engineering application

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)14-0113-07

## 0 引言

随着我国电力系统的快速发展, 特高压交流远距离送电加强了系统间的互联<sup>[1]</sup>, 但由于日益复杂的系统结构、快速励磁系统的大量投运和经济发展带来的重负荷, 系统阻尼水平和低频振荡的频率不断降低<sup>[2]</sup>, 动态稳定问题凸显<sup>[3-7]</sup>。电力系统稳定器 PSS 作为目前阻尼低频振荡最有效、最经济的装置<sup>[7-10]</sup>, 在参数整定时, 已要求考虑低至 0.1 Hz 的低频振荡抑制要求<sup>[11]</sup>。

目前广泛使用的 PSS2B 型电力系统稳定器本质上是采用单有功校正环来抑制 0.2~2 Hz 全频段低频振荡。受到高频段临界增益限制, PSS2B 难以满足低频段增益要求。为改善 PSS 对振荡模式的选择

性, 多频段结构的 PSS 成为研究趋势<sup>[12]</sup>。PSS4B 是近年来发展较快的一种电力系统稳定器<sup>[13]</sup>, 其最大优势在于解决了 PSS2B 低频段抑制能力不足的问题, 但双变量输入和多支路并联的结构模式也带来了 PSS4B 本身的相位关系难以计算、参数难以整定等问题。

本文针对以上问题, 提出了一种改进的 PSS4B-W 设计思路, 实现了 PSS4B 和 PSS4B-W 的发电机组现场试验运行。根据正弦扫频扰动试验给出了 PSS4B-W 相位校正计算方法。通过负载电压阶跃试验进行对比分析验证了 PSS4B-W 的校正效果。最后提出了 PSS4B 与 PSS4B-W 在工程化应用中存在的问题和解决思路。

# 1 PSS4B 设计原理及其存在问题

## 1.1 PSS4B 工作原理及其与 PSS2B 对比

PSS4B 数学模型如图 1 所示。

PSS4B 通过多重信号和差分滤波的方式解决了 PSS2B 单控制环总体增益受限的问题，从而系统性解决其中低频段抑制能力不足的问题。PSS4B 提出后便很快在以中低频段低频振荡为主要振荡模式的北美电网中得到应用，并取得优良的效果<sup>[14-15]</sup>。

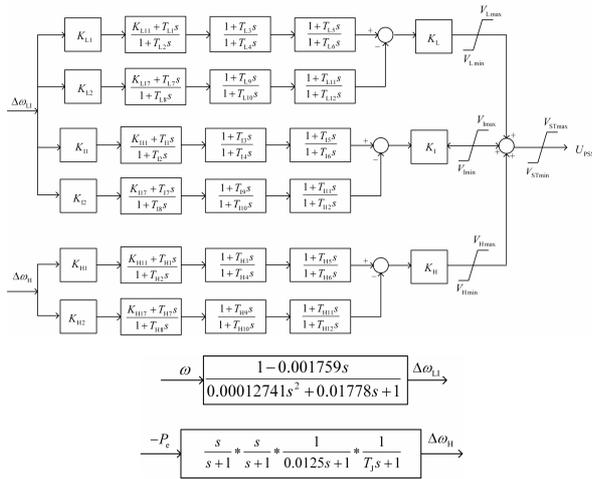


图 1 PSS4B 数学模型

Fig. 1 Mathematical model of PSS4B

PSS2B、PSS4B 典型的幅频和相频特性如图 2 所示。

由图 2 可以看到，PSS2B 采用全频段单环超前补偿方式，随着波动信号频率增加，相应的增益呈加速上升趋势。考虑到高频段 PSS 输出噪音和稳定裕度，标准<sup>[11]</sup>规定 PSS2B 在现场需要进行临界增益试验并明确了最终增益取值一般为临界增益的 1/3~1/5。可见，PSS2B 受高频段增益过大的影响，其中低频段增益必定受到限制，即限制了其对中低频段低频振荡的抑制能力。

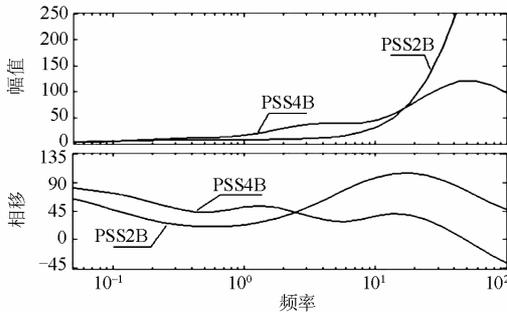


图 2 PSS2B、PSS4B 幅频特性和相频特性

Fig. 2 Amplitude-frequency and phase-frequency characteristic of PSS2B and PSS4B

由图 1、图 2 可见，PSS4B 模型是在全面分析 PSS2B 存在的不足而形成的一个系统解决方案，具体体现在：

1) 分频段多输入信号选择及处理。在中低频段选择转速信号，并经过低通滤波处理，解决高频段转速测量精度问题；在高频段选择有功功率信号，并选择小隔直时间常数滤波，解决有功功率变化时的无功“反调”问题。

2) 采用超前滞后和差分滤波相结合的模式。解决 PSS2B 模型中单纯超前滞后模式导致的增益单调性问题，从而有效提高中低频段的 PSS4B 增益，解决 PSS2B 在中低频段阻尼不足的问题。

## 1.2 PSS4B 存在的问题

由图 1 可以看到，PSS4B 相位补偿参数众多，IEEE 标准<sup>[16]</sup>中并未说明整定方法。在北美电网的应用中，也只用一部分参数，且这些参数显示为长期试验的结果，无相关整定原则<sup>[17]</sup>。虽然典型参数适用范围比较宽<sup>[18]</sup>，但其并联结构决定这些参数之间的相互作用比串联结构的模型要复杂很多，不能仅根据运行情况判断其适用性。

PSS4B 输入信号经过隔直滤波后向量位置 $\Delta\delta-\Delta\omega$ 平面如图 3 所示。

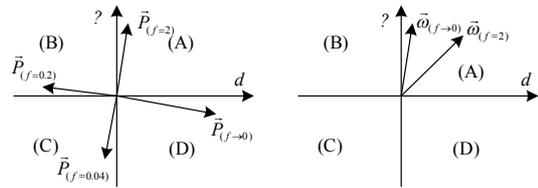


图 3 有功及转速向量位置变化趋势图

Fig. 3 Tendency chart of position for active power and speed

由图 3 可以看出，有功信号 $\Delta W_H$ 随频率增加由(D)区向(A)区顺时针变化，转速信号 $\Delta W_{IL}$ 信号随频率增加在(A)区由 $\Delta\omega$ 轴顺时针变化。虽然经过差分滤波环的相位超前调整，但总趋势相同，即随着频率的增加，PSS4B 输出信号向 $\Delta\delta$ 轴变化。而励磁系统滞后角度随频率增加亦呈现增加趋势，这导致其与 PSS4B 输出力矩矢量合成后随频率增加进一步向 $\Delta\delta$ 轴靠近，严重时可能会落在(D)，从而使得 PSS4B 失去正阻尼作用。

据工程实测数据显示，自并励励磁系统在频率 1.0 Hz 以上时，其相位滞后均超过 90°。此时，PSS4B 输出力矩在 $\Delta\delta-\Delta\omega$ 平面的 $\Delta\delta$ 轴附近，其阻尼效果相对较差，甚至有可能出现负阻尼。也就是说，若要保证 PSS4B 输出力矩在 1.0 Hz 以上低段振荡范围内有较大的正阻尼作用，则必须整定内部参数或采用

其他方法调整 PSS 输出信号相移。

## 2 PSS4B-W 的设计与实现

我国电网逐步发展成为一个各区域间以特高压交直流互联的一个巨大电网, 既有区域之间的中低频段(0.2~0.8 Hz)的振荡模式, 也有单机-系统之间的中高频段(1.0~2.0 Hz)的振荡模式, 甚至存在超低频(0.1~0.2 Hz)的振荡模式<sup>[9]</sup>。因此, 要发挥 PSS4B 低频段抑制能力优势的前提是必须要解决中高频段 PSS4B 的相位校正问题。如图 4 所示的 PSS4B-W 模型即是基于上述理论分析后对 PSS4B 改进的一种电力系统稳定器结构。

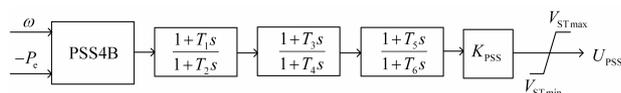


图 4 PSS4B-W 数学模型传递函数框图

Fig. 4 Transfer function block diagram of PSS4B-W mathematical model

PSS4B-W 模型一方面通过附加的三阶超前滞后校正可以解决 PSS4B 中高频段相位偏移问题; 另一方面, 可以避开 PSS4B 内部众多参数的协调整定的难题, 只需关注最后三阶超前滞后环节的相位校正和增益计算问题。同时, 该模型的提出使得工程调试可以借鉴目前成熟的 PSS2B 现场参数整定试验方法, 保证工程应用的参数整定可行性和技术传承性。

## 3 不同 PSS 的扫频测试和参数计算

### 3.1 现场扫频正弦扰动测试

PSS 现场参数整定试验时, 需通过外加扰动信号来进行频谱特性测试, 获取 PSS 与发电机励磁系统滞后特性之间的相位补偿关系。本文通过在 PSS 退出情况下, 采用 LDS 动态信号分析仪发出扫频周期 10 s, 频段 0.1~10 Hz 的正弦信号, 并将该扰动信号替代 PSS 输出信号输入至 AVR 的 PSS 输出叠加造成人为扰动, 其测量原理如图 5 所示。

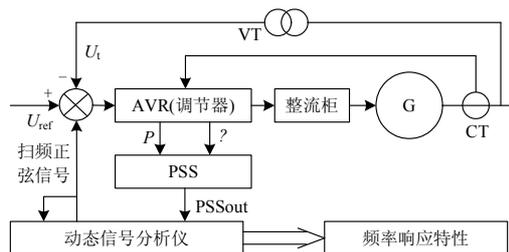


图 5 PSS 输出与有功功率相位关系测试原理图

Fig. 5 Principle diagram of the test between PSS output and active power

通过 D/A 转换器(量程 0~5 V, 零点 2.5 V, 变比为 2.5 V: 1 p.u.)输出 PSS2B、PSS4B 和 PSS4B-W 控制信号, 观察各型 PSS 的输出与发电机有功功率波动的相位关系, 如图 6 所示。其中, PSS2B 模型为 IEEE 经典模型<sup>[16]</sup>, 现场整定参数如表 1 所示, PSS4B 参数采用 IEEE 经典参数<sup>[16]</sup>, 如表 2 所示, PSS4B-W 超前滞后环节整定参数详见 3.2。

表 1 PSS2B 参数表

Table 1 Parameter list of PSS2B

参数	$T_{W1}$	$T_{W2}$	$T_6$	$T_{W3}$	$T_{W4}$	$K_{S2}$	$T_7$	$K_{S3}$	$T_8$	$T_9$	$M$
数值	4	4	0	4	0	0.5	4	1	0.5	0.1	5
参数	$N$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_{10}$	$T_{11}$	$K_{S1}$	$V_{STMAX}$	$V_{STMIN}$	$T_1$
数值	1	0.16	0.02	0.16	0.02	0.01	0.01	8	+0.05	-0.05	0.16

表 2 PSS4B 参数表

Table 2 Parameter list of PSS4B

参数	$K_L$	$K_{L1}$	$K_{L2}$	$K_{L11}$	$K_{L17}$	$T_{L1}$	$T_{L2}$	$T_{L7}$	$T_{L8}$	$V_{LMAX}$	$V_{LMIN}$	$V_{STMAX}$
数值	7.5	66.0	66.0	1.0	1.0	1.73	2.075	2.075	2.491	+0.075	-0.075	+0.15
参数	$V_{STMIN}$	$K_1$	$K_{11}$	$K_{12}$	$K_{111}$	$K_{117}$	$T_{11}$	$T_{12}$	$T_{17}$	$T_{18}$	$V_{IMAX}$	$V_{IMIN}$
数值	-0.15	30.0	66.0	66.0	1.0	1.0	0.173	0.207 5	0.207 5	0.249 1	+0.6	-0.6
参数	$K_H$	$K_{H1}$	$K_{H2}$	$K_{H11}$	$K_{H17}$	$T_{H1}$	$T_{H2}$	$T_{H7}$	$T_{H8}$	$V_{HMAX}$	$V_{HMIN}$	
数值	120.0	66.0	66.0	1.0	1.0	0.015 13	0.018 16	0.018 16	0.021 79	+0.6	-0.6	

在扫频正弦扰动下, 发电机有功功率产生不同频率波动时, 图 6 中不同 PSS 有如下输出特性:

#### 1) 相位补偿结果

PSS2B 在不同频点上输出的相位与有功功率波

动方向相反, 相位差接近 180°, 说明经参数整定试验的 PSS2B 相位补偿正确。

PSS4B 输出总体上与有功功率反向, 但是其补偿相位明显滞后于有功功率波动, 滞后角度大于 45°, 说明经参数整定试验的 PSS4B 相位补偿

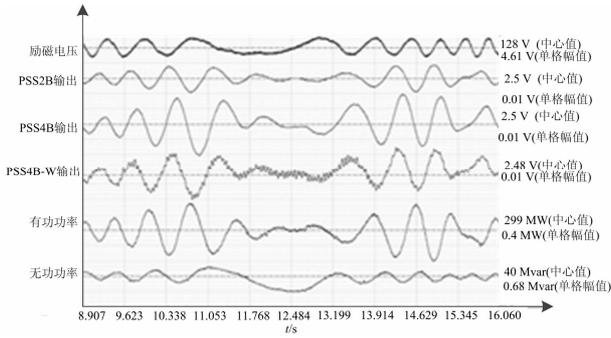


图 6 正弦扫频测试时不同 PSS 输出与有功功率相位关系的实测录波图

Fig. 6 Measured record of phase relationship between different PSS output and active power under the sine sweep test

偏向  $\Delta\delta$  轴方向，其输出的相位加强了同步转矩，削弱了 PSS 附加的阻尼转矩，相位补偿不合理。

PSS4B-W 输出相位与 PSS2B 输出基本一致，略微偏滞后。但其滞后角度远小于标准<sup>[11]</sup>规定的允许滞后范围，因此可以认为 PSS4B-W 相位补偿正确。

2) 高低频段增益结果

表 3 PSS4B-W 附加相位校正角度与增益

Table 3 PSS4B-W additional phase correction angle and gain

频率/Hz	0.13	0.25	0.38	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50
角度/(°)	-16.5	-3.5	4.1	10.0	19.8	28.2	36.0	43.0	49.6	55.6	61.1	66.1
增益/p.u.	0.39	0.35	0.34	0.35	0.35	0.37	0.38	0.41	0.43	0.46	0.50	0.54

以保持补偿环节各频点 PSS4B-W 与 PSS4B 动态增益基本一致为原则时， $K_{PSS}$  的取值由下式决定：

$$K_{PSS} = \frac{1}{\sqrt{1+(2\pi fT_1)^2} / \sqrt{1+(2\pi fT_2)^2}} \times \frac{1}{\sqrt{1+(2\pi fT_3)^2} / \sqrt{1+(2\pi fT_4)^2}} \times \frac{1}{\sqrt{1+(2\pi fT_5)^2} / \sqrt{1+(2\pi fT_6)^2}}$$

综合考虑 0.1~2.5 Hz 范围内的增益平衡要求，鉴于 PSS4B 本身抑制能力较强，同时考虑适当限制高频段增益，取  $K_{PSS}=2$ 。为避免运行过程中 PSS 附加控制对励磁系统产生过大扰动，整定 PSS 输出限幅为机端电压给定值的  $\pm 5\%$ ，即设定  $V_{STmax,min}=\pm 0.05$ 。

4 不同 PSS 的发电机负载电压阶跃试验

发电机并网后的负载电压阶跃是检验 PSS 作用效果的最常用手段。分别在 PSS 退出，PSS2B、

PSS2B 与 PSS4B 的输出幅值在高频段接近。PSS4B 和 PSS4B-W 在低频段输出幅值明显高于 PSS2B，说明其在低频段具有更大的增益。从而从实测的角度证实了 PSS4B 和 PSS4B-W 在低频段具备更强低频振荡抑制能力的理论。

3) 输出波形特点

PSS2B 和 PSS4B 的输出较光滑，PSS4B-W 输出波形本身带有高频的微小振荡。这是由于 PSS4B-W 对 PSS4B 进行相位校正时采用了两阶超前环节和一阶滞后环节，对于有功和转速扰动信号具有一定的微分效应，易引发高频噪声。但只要 PSS4B-W 高频段的增益在合理范围内，这种小幅高频噪声性质抖动经发电机转子大电感过滤后并不影响 PSS 抑制效果和稳定运行。

3.2 PSS4B-W 的超前滞后环节参数整定

实测 PSS4B 的输出相对于有功功率的相位在反向滞后约  $45^\circ$ 。本文以本机振荡频点相位校正超前  $45^\circ$  为原则进行补偿计算，得出 PSS4B-W 的三阶超前滞后环节参数如下： $T_1=0.05$ ， $T_2=0.005$ ， $T_3=0.05$ ， $T_4=0.005$ ， $T_5=2$ ， $T_6=6$ 。

其附加相位补偿角度与对应的增益如表 3 所示。

PSS4B、PSS4B-W 投入工况下进行试验，录波如图 7 所示。

根据图 7 中的发电机负载电压阶跃响应特性计算有功功率振荡品质参数如表 4 所示。

表 4 不同工况下阶跃响应特性参数表

Table 4 Step response parameters table in different conditions

	无 PSS	PSS2B	PSS4B	PSS4B-W
振荡频率/Hz	1.38	1.35	1.79	1.52
阻尼比	0.096	0.230	0.084	0.290

注：其中无 PSS 和 PSS2B 采用 2%阶跃，PSS4B 和 PSS4B-W 采用 1%阶跃。

根据表 4 数据，PSS 退出情况下的发电机有功功率振荡频率为 1.38 Hz。

PSS2B 投入后，阻尼比由无 PSS 时的 0.096 明显提高至 0.23，振荡频率变化为 1.35 Hz，说明经参数整定后的 PSS2B 各项指标符合要求，且性能较佳。

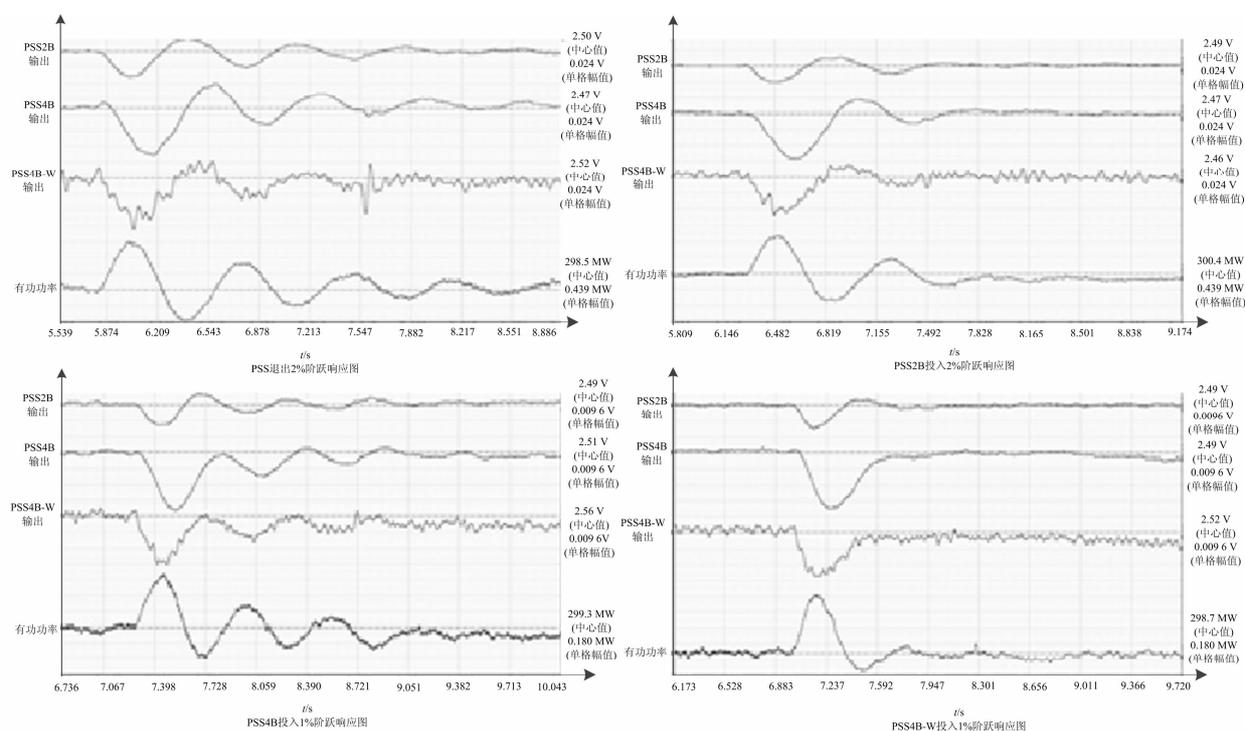


图7 各型 PSS 投入和退出时的电压阶跃响应实测录波图

Fig. 7 Measured record of voltage step response with different PSS on and off

PSS4B 投入时, 发电机有功功率在本机振荡频点的振荡衰减阻尼比为 0.084, 在本机振荡频点略微产生了负阻尼。同时, 振荡频率明显加快, 比 PSS 退出时增加了约 30%。与前述分析一致, PSS4B 在该频点的补偿相位基本落在  $\Delta\delta$  轴附近, 从而同步转矩被明显加强, 振荡频率增加。而在  $\Delta\omega$  轴上的投影很小即阻尼力矩分量很小, 对低频振荡阻尼提高非常有限甚至可能产生负阻尼。

PSS4B-W 投入时, 发电机有功功率在本机振荡频点的衰减阻尼比为 0.29, 阻尼比提高非常明显。同时, 由于在该组参数下本机振荡频率点的实际补偿角并未达到  $45^\circ$ , PSS 提供的附加力矩略偏滞后。因此, 振荡频率比 PSS 退出时增加了约 10%, 但仍能满足标准<sup>[11]</sup>规定小于  $\pm 20\%$  的要求。

综上所述, 本文提出以下结论和建议:

1) PSS4B 难以进行全频段相位有补偿特性计算和现场实测, 不能设置经典参数后现场直接投运, 仅采用负载电压阶跃检验效果的常规方法也不够全面, 因此建议首先进行不同频段下的正弦扫频扰动, 与有功功率波形对比, 确认 PSS4B 在各频点相位关系基本正确。

2) 鉴于目前系统低频振荡仍主要出现在中高频段, 建议首先确认 PSS4B 在本机振荡频点上的相位关系正确从而保证中高频段的相位关系在合理范

围。防止相位补偿过度偏移导致 PSS 提供负阻尼, 恶化系统的整体小干扰稳定水平。

3) PSS4B 由于其参数难以现场整定, 且本身相位补偿特性存在低频段偏超前和高频段偏滞后问题, 宜采用改进型 PSS4B-W 型 PSS 对 PSS4B 进行进一步校正, 以解决采用 IEEE 经典参数 PSS4B 工程适用性问题。

4) PSS4B-W 校正环节时间常数可以在现场参考扫频扰动试验和负载电压阶跃结果进行整定。并以全频段动态增益总体不变和限制高频段增益为原则, 参考 PSS 投入后阶跃响应品质来综合整定补偿环节增益。

5) 由于 PSS4B-W 增加了经典 PSS4B 的高频段增益, 现场投运 PSS4B-W 时建议进行临界增益试验, 并参考标准<sup>[11]</sup>规定增益取值原则, 保证 PSS 具有足够的稳定裕度。

## 5 结论

针对 PSS2B 型电力系统稳定器对于低频段抑制能力不足的问题, 介绍了 PSS4B 设计理念及其在低频段抑制能力的优势。继而指出了 PSS4B 结构复杂、参数众多, 难以在现场协调整定, 经典参数难以具有工程普遍适用性的问题。

理论分析了 PSS4B 结构带来的高频段相位补偿偏滞后、低频段相位校正偏超前的问题, 提出了

采用改进型 PSS4B-W 来进一步校正经典参数下的 PSS4B, 分析了现场参数整定验证的可行性。

通过现场正弦扫频扰动测试和负载电压阶跃试验, 给出了 PSS4B-W 相位校正计算方法, 证实了其工程应用有效性和优越性, 进而提出了 PSS4B 和 PSS4B-W 工程化应用需注意的问题和建议。

### 参考文献

- [1] 余贻鑫, 李鹏. 大区电网弱互联对互联系统阻尼和动态稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 6-11.  
YU Yixin, LI Peng. The impact of weak interconnection of bulk power grids to damping and dynamic stability of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 6-11.
- [2] 王铁强, 贺仁睦, 王卫国, 等. 电力系统低频振荡机理的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 21-25.  
WANG Tieqiang, HE Renmu, WANG Weiguo, et al. The mechanism study of low frequency oscillation in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(2): 21-25.
- [3] 刘取, 倪以信. 电力系统稳定性与控制综述[J]. 中国电机工程学报, 1990, 10(6): 1-12.  
LIU Qu, NI Yixin. A brief review of power system stability and control[J]. Proceedings of the CSEE, 1990, 10(6): 1-12.
- [4] 杨培宏, 刘文颖, 张继红. PSS 和 TCSC 联合抑制互联电网低频振荡[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 11-16.  
YANG Peihong, LIU Wenying, ZHANG Jihong. Restraining low frequency oscillation of interconnected power grid using PSS and TCSC[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(12): 11-16.
- [5] 张恒旭, 李常刚, 刘玉田, 等. 电力系统动态频率分析与应用研究综述[J]. 电工技术学报, 2010, 25(11): 169-176.  
ZHANG Hengxu, LI Changgang, LIU Yutian, et al. Reviews on power system dynamic frequency analysis and its application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(11): 169-176.
- [6] MOUSSA H A, YU Yaonan. Dynamic interaction of multi-machine power system and excitation control[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1974, 93(4): 1151-1158.
- [7] 陈恩泽, 刘涤尘, 廖清芬, 等. 多重扰动下的跨区电网低频振荡研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 290-296.  
CHEN Enze, LIU Dichen, LIAO Qingfen, et al. Research on low frequency oscillation of interconnected power grid based on multiple disturbances[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 290-296.
- [8] 杨慧敏, 易海琼, 文劲宇, 等. 一种实用的大电网低频振荡概率稳定性分析方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 124-137.  
YANG Huimin, YI Haiqiong, WEN Jinyu, et al. A practical stability analysis method for large-scale power system based on low-frequency-oscillation probability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(3): 124-137.
- [9] 宋墩文, 杨学涛, 丁巧林, 等. 大规模互联电网低频振荡分析与控制方法综述[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 22-28.  
SONG Dunwen, YANG Xuetao, DING Qiaolin, et al. A survey on analysis on low frequency oscillation in large-scale interconnected power grid and its control measures[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 22-28.
- [10] 徐涛, 张振程, 李梅, 等. UNITROL5000 励磁调节器 PSS 参数的优化[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(23): 88-91.  
XU Tao, ZHANG Zhencheng, LI Mei, et al. Optimization for UNITROL 5000 excitation adjuster PSS parameters[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(23): 88-91.
- [11] Q/GDW143-2012 电力系统稳定器整定试验导则[S].
- [12] 邱磊, 王克文, 李奎奎, 等. 多频段 PSS 结构设计和参数协调[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 102-107.  
QIU Lei, WANG Kewen, LI Kuikui, et al. Construction design and parameter coordination of multi-band PSS[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 102-107.
- [13] 巍韡, 梅生伟, 张雪敏. 先进控制理论在电力系统中

- 的应用综述及展望[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 143-153.
- WEI Wei, MEI Shengwei, ZHANG Xuemin. Review of advanced control theory and application in power system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 143-153.
- [14] KAMWA I, GRONDIN R, TRUDEL G. IEEE PSS2B versus PSS4B: the limits of performance of modern power system stabilizers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 903-915.
- [15] GRONDIN R, KAMWA I. The multi-band PSS: a flexible technology designed to meet opening markets[C] // Proc CIGRÉ, Paris, France, 2000: 39-201.
- [16] IEEE Std 421.5-2005 IEEE recommended practice for excitation system models for power system stability studies[S].
- [17] 刘取. 电力系统稳定性及发电机励磁控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [18] GRONDIN R, KAMWA I, TRUDEL G, et al. The multi-band PSS: modeling and closed-loop validation of a new PSS concept[C] // The 2003 IEEE/PES General Meeting, Panel Session on New PSS Technologies, Toronto, ON, Canada.
- [19] 高磊, 张文朝, 濮钧, 等. 华北-华中-华东特高压联网大区模式下低频振荡模式的频率特性[J]. 电网技术, 2011, 35(5): 15-20.
- GAO Lei, ZHANG Wenchao, PU Jun, et al. Study on the frequency characteristic of low-frequency oscillation mode under large-area mode formed by interconnection of North China Power Grid with Central China Power Grid and East China Power Grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(5): 15-20.
- 
- 收稿日期: 2014-10-16; 修回日期: 2015-04-22
- 作者简介:
- 吴跨宇(1979-), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为发电机励磁系统、网源协调和电力系统分析;
- 吴龙(1970-), 男, 硕士研究生, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电力系统自动化;
- 卢岑岑(1986-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为发电机励磁系统和电力系统分析计算。
- E-mail: cencen\_lu@163.com
- (编辑 葛艳娜)