

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180606

## 运行方式及工程等效对 PSS 试验的影响

刘翔宇<sup>1</sup>, 鲁鹏<sup>2</sup>, 陈大军<sup>2</sup>, 何玉灵<sup>3</sup>, 李晓明<sup>1</sup>, 刘涛<sup>4</sup>

(1. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021; 2. 国网河北省电力有限公司, 河北 石家庄 050021; 3. 华北电力大学设备故障诊断与检测技术研究所, 河北 保定 071003; 4. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

**摘要:** 研究了运行方式变化和工程等效对测量励磁系统无补偿相频特性的影响。首先阐释了 PSS 增加阻尼的原理和无补偿相频特性的工程等效测量方法。其次基于对单机无穷大系统的理论分析, 得出发电机有功功率和无功功率是影响无补偿特性测量的主要因素。然后进行了实际电网仿真, 得到了无补偿特性主要受发电机有功功率、无功功率影响的结论。电网负荷、电气距离、并列机组数量、并列机组 PSS 投退对试验结果影响较小。最后通过仿真对比, 发现采用机端电压等效发电机内电势会使后半频段滞后角度偏大, 得到了采用单机无穷大系统代替实际电网将使全频段滞后角度偏小的结论。该成果对于 PSS 性能的改善具有积极意义。

**关键词:** PSS; 运行方式; 无补偿相频特性; 电网仿真

### Impact of operation conditions and engineering equivalent on PSS test

LIU Xiangyu<sup>1</sup>, LU Peng<sup>2</sup>, CHEN Dajun<sup>2</sup>, HE Yuling<sup>3</sup>, LI Xiaoming<sup>1</sup>, LIU Tao<sup>4</sup>

(1. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China; 2. State Grid Hebei Electric Power Co. Ltd, Shijiazhuang 050021, China; 3. Institute of Equipment Fault Diagnosis and Testing Technology, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 4. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** This paper investigates the influences of operation conditions change and engineering equivalent on the uncompensated phase-frequency characteristics measurement of excitation system. Firstly, the principles of PSS increasing damping and the engineering equivalent measurement method of phase-frequency characteristics are elucidated. Secondly, based on theoretical analysis of single-machine infinite bus system, it is concluded that the active power and reactive power of generators are the main factors that influence the measurement of uncompensated characteristics. Then the actual power grid simulations are made, drawing a conclusion that the uncompensated characteristics are mainly affected by the active power and reactive power of the generator. Power grid load, electric distance, number of parallel units, and whether the PSS of parallel units are on or out have less influences on test results. Finally, through the simulation comparison, it comes to a conclusion that employing terminal voltage as the equivalent of internal electromotive force will cause the rear half band lag angle get larger and replacing the actual grid with a single-machine infinite bus system will make the full-band lag angle get smaller. The achievements obtained in this paper have a positive significance to improve the performance of PSS.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51777074), Natural Science Foundation of Hebei Province (No. E2015502013), and Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2018YQ03).

**Key words:** power system stabilizer (PSS); operation conditions; uncompensated phase-frequency characteristics; power system simulation

## 0 引言

电力系统动态稳定问题获得了广泛关注和研

究<sup>[1-4]</sup>, 采用电力系统稳定器(Power System Stabilizer, PSS)提高电力系统稳定性是全世界普遍采用<sup>[5-6]</sup>的一种简单、经济、有效的方法。PSS 性能的优劣取决于其多运行状态的适应性和提供阻尼的有效性两个方面。工程上一般基于已知模型, 采用相位补偿方法进行 PSS 参数的设计<sup>[7-8]</sup>, 在保证足够适应性的基础上使 PSS 能够提供足够的阻尼, 以增强电网动

基金项目: 国家自然科学基金(51777074); 河北省自然科学基金(E2015502013); 中央高校基本科研业务费专项基金(2018YQ03)资助

态稳定特性。

随着电网结构的发展和电网特性的变化<sup>[9-10]</sup>, 按照现有的技术标准<sup>[11]</sup>进行 PSS 参数整定也暴露出不足<sup>[12]</sup>。现有研究通过研发新模型<sup>[13-17]</sup>和优化整定参数<sup>[18-21]</sup>方法来改善 PSS 的性能。文献[13-15]设计了新的 PSS 模型, 有针对性地改进现有模型不足, 并验证了其优势, 但改进模型仍然处于理论研究阶段, 不具有大规模应用基础。文献[16-17]研究了 PSS4B 型稳定器的参数设计问题, 但 PSS4B 在经典参数下相位补偿关系并不具备普遍适用性, 并联的结构模式相位关系极其复杂, 参数难以进行现场整定<sup>[14]</sup>。文献[18-21]将参数设计转化为优化问题, 通过问题求解获得性能更优的 PSS 参数, 但参数的整定基于无补偿相频特性, 无补偿相频特性的准确获取是参数优化整定的基础, 对提升 PSS 性能更具有实际意义。文献[7]基于单机无穷大系统分析了相位补偿的原理, 得出了理论值和实测值在系统自然振荡频率附近狭窄频段具有较大差异, 理论无补偿特性对发电机负荷不敏感的结论, 但电网运行状况变化会影响励磁系统能力<sup>[22-23]</sup>, 考虑实际电网研究励磁系统的特性会更加准确。

本文在参考文献[7]的基础上, 采用理论分析方法验证和拓展其结论。进一步考虑实际电网模型来详细仿真和分析机组有功出力、无功出力、电网负荷、并网电气距离、并列机组数量、并列机组 PSS 投退对 PSS 无补偿相频特性测量值的影响。分析了考虑实际电网时, 无补偿特性的工程测量值较理论值的差异, 以及采用单机无穷大系统等效实际电网获得无补偿特性的偏差。

## 1 PSS 的工程整定

### 1.1 PSS 增加阻尼的原理

典型的发电机励磁系统模型如图 1 所示, 该系统采用加速功率型 PSS。经隔直处理后的转速和功率信号合成加速功率信号 $\Delta P_a$ ,  $\Delta P_a$ 经过移相环节, 输出一个附加在励磁系统 PID 上的附加信号 $V_s$ , 该附加励磁信号产生一个阻尼力矩 $M$ , 起到抑制功率振荡的效果。如图 2 所示, 力矩 $M$ 与 $-\Delta P$ 轴夹角由励磁系统固有相频特性(无补偿相频特性)和 PSS 补偿相频特性加和得到的有补偿特性共同决定。根据技术标准<sup>[11]</sup>的要求, 附加励磁在不同振荡频率下产生的附加力矩 $M$ 方向应在超前 $\Delta\omega$ 轴 $20^\circ$ 和滞后 $45^\circ$ 之间, 即力矩 $M$ 与 $-\Delta P$ 轴夹角应在 $-70^\circ \sim -135^\circ$ 之间。

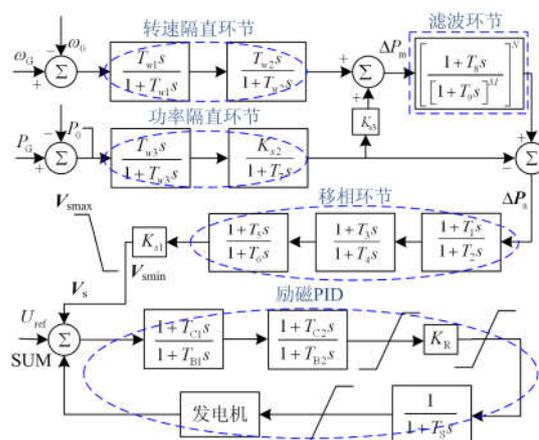


图 1 具备 PSS 的自动励磁调节器

Fig. 1 Automatic excitation controller with PSS

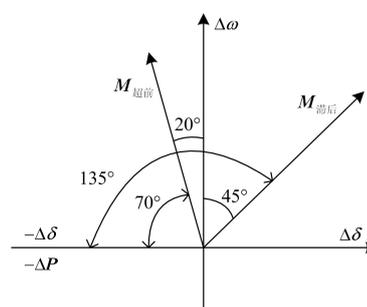


图 2 相位补偿与输入信号关系图

Fig. 2 Diagram between input signal and phase compensation

基于已知无补偿相频特性, 根据图 2 对力矩 $M$ 的要求整定 PSS 参数, 即可得到满足要求的有补偿相频特性。工程上无补偿特性一般通过试验测得, 作为 PSS 参数整定的基础, 其准确与否对 PSS 性能能否有效发挥具有重要影响。

### 1.2 无补偿相频特性

无补偿相频特性即为励磁系统的相位滞后特性<sup>[7]</sup>, 工程上无补偿相频特性的测量方法<sup>[11]</sup>为, 选择机组一运行点( $P > 0.8P_N$ 且 $Q < 0.2Q_N$ ), 断开图 1 中 SUM 环节处 PSS 输出信号 $V_s$ , 在 $U_{ref}$ 处施加一个白噪声信号, 测量发电机端电压响应 $\Delta U$ 与施加信号间的相位差, 即为发电机励磁系统的无补偿相频特性测量值。

实际上无补偿相频特性理论值是发电机内电势响应 $\Delta E'_q$ 相对于 $U_{ref}$ 处白噪声的相位差, 工程上测量机组的内电势较困难, 故采用机端电压响应 $\Delta U$ 代替 $\Delta E'_q$ 作为测量无补偿相频特性的依据, 该等效造成了测量值与理论值的差异。如图 3 所示, 由于 $\dot{E}_q$ 与 $\dot{U}$ 间存在角度差 $\delta$ , 而该工程等效忽略了向量 $j\dot{X}_q$ , 在 PSS 参数整定时将产生一定的误差。发电

机的运行状态不同, 向量  $jIX_d$  将发生相应变化, 忽略向量  $jIX_d$  也会产生不同的影响效果。

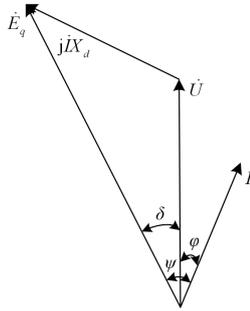


图 3 隐极发电机向量图

Fig. 3 Vector diagram of non-salient pole generator

### 2 PSS 试验影响因素的理论分析

如图 3 所示, 单机无穷大系统的发电机向量图中, 发电机迟相运行, 机端电压  $\dot{U}$  在运行中保持恒定,  $\dot{E}_q$  与  $\dot{U}$  间存在角度差  $\delta$ , 这一夹角由向量  $jIX_d$  决定。考虑到正常运行状态下直轴电抗  $X_d$  不变, 则实际上影响角度差  $\delta$  的主要因素为发电机电流  $\dot{I}$ 。当  $\dot{I}$  模值增大时,  $jIX_d$  增大, 则角度差  $\delta$  增大, PSS 试验误差增大; 当  $\dot{I}$  模值减小时,  $jIX_d$  减小, 则角度差  $\delta$  减小, PSS 试验误差减小。

以电压  $\dot{U}$  为参考, 电流  $\dot{I}$  的大小和方向主要决定于发电机有功、无功功率。如图 4 所示, 保持有功功率不变, 当发电机无功功率增加时,  $\dot{I}$  模值变大, 功率因数角  $\varphi$  变大,  $\dot{I}$  变为  $\dot{I}'$ , 则  $\dot{E}_q$  与  $\dot{U}$  夹角  $\delta$  变为  $\delta'$ ,  $\dot{E}_q$  与  $\dot{U}$  间夹角变小, PSS 试验误差减小。如图 5 所示, 保持无功功率不变, 当发电有功功率增加时,  $\dot{I}$  模值变大,  $\varphi$  变小,  $\dot{I}$  变为  $\dot{I}''$ , 则  $\dot{E}_q$  与  $\dot{U}$  夹角  $\delta$  变为  $\delta''$ ,  $\dot{E}_q$  与  $\dot{U}$  间夹角变大, PSS 试验误差增大。

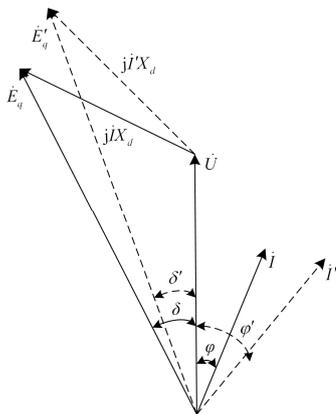


图 4 无功增加时向量图

Fig. 4 Vector diagram when reactive power increases

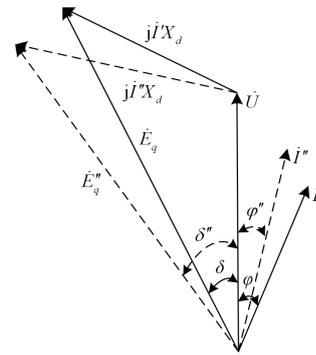


图 5 有功增加时向量图

Fig. 5 Vector diagram when active power increases

对单机无穷大系统进行分析, PSS 试验误差大小主要受发电机有功无功出力的影响, 发电机迟相运行时, 这一误差随有功功率增加而增加, 随无功功率增加而减小。理论上当  $\dot{I}$  越小时, 测得的无补偿相频特性误差越小, 当发电机只发无功时,  $\dot{E}_q$  与  $\dot{U}$  夹角为零, 此时测量无补偿相频特性误差为零。但该结论是在单机无穷大系统中  $\dot{U}$  不变情况下得到的, 考虑实际电网的具体情况应进一步分析和研究。

### 3 运行方式对 PSS 试验影响的仿真分析

为检验实际系统中无补偿相频特性测量值受运行方式变化的影响程度, 本节采用实际电网离线数据进行仿真分析。离线数据中的发电机、励磁系统、PSS、调速系统均按照实际电网模型建模, 参数为工程实测参数, 少数未实测机组采用典型参数。采用 PSD-SSAP 对电网离线数据进行线性化计算, 得到特定运行方式下的系统模型, 以机端电压作为响变量, 依据技术标准计算发电机励磁系统的无补偿相频特性。

#### 3.1 机组有功出力影响分析

选取某安装了 PSS 的大型机组作为研究对象, 其采用了图 1 所示励磁系统模型。保持运行方式不变, 发电机迟相运行, 仅调整发电机有功出力, 在不同有功出力情况下得到励磁系统的无补偿相频特性如图 6 所示。

由图 6 可知, 机组有功出力发生变化时, 无补偿相频特性在 0.1~1.2 Hz 变化不大, 在 1.2~2 Hz 随有功功率增加, 相频特性滞后角度逐渐增大, 且机组有功功率发生变化不会使最大滞后相角对应的频率发生改变。该结果与第 2 节中发电机迟相运行时理论分析所得到的结论一致, 即测量误差随有功功率增加而增加。

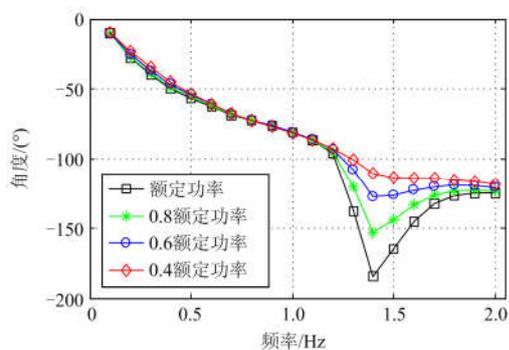


图 6 有功功率变化时的无补偿相频特性

Fig. 6 Uncompensated phase-frequency characteristics when active power changes

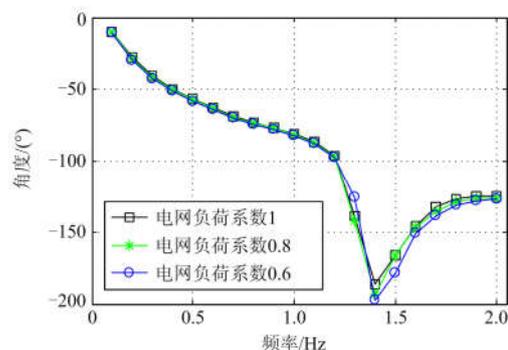


图 8 电网负荷变化时的无补偿相频特性

Fig. 8 Uncompensated phase-frequency characteristics when network load changes

### 3.2 机组无功出力影响分析

保持运行方式不变, 发电机迟相运行, 仅调整 3.1 节所述的发电机无功出力, 在不同无功出力情况下得到励磁系统的无补偿相频特性如图 7 所示。

由图 7 可知, 在机组无功出力发生变化时, 无补偿相频特性在 0.1~1.2 Hz 变化不大, 在 1.2~2 Hz 随无功功率减小相频特性滞后角度增大, 且随着机组无功功率减小, 最大滞后角度对应的频率降低。该结果与第 2 节中发电机迟相运行时理论分析得到的结论一致, 即测量误差随无功功率减小而增加。

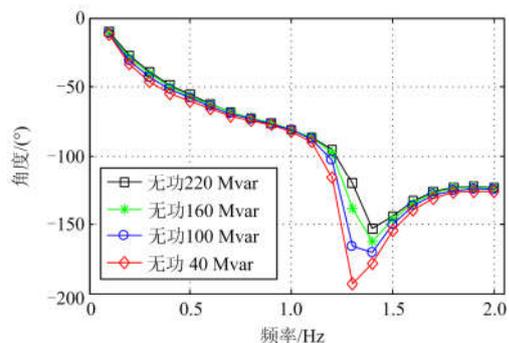


图 7 无功功率变化时的无补偿相频特性

Fig. 7 Uncompensated phase-frequency characteristics when reactive power changes

### 3.3 电网负荷大小影响分析

调整 3.1 节机组所在省级电网的负荷水平, 保持其他运行条件不变。电网负荷水平变化时该机组的无补偿相频特性如图 8 所示。

由图 8 可知, 机组所在电网的负荷系数发生变化时, 无补偿相频特性在 0.1~1.2 Hz 几乎没有变化, 在 1.2~2 Hz 随着电网负荷水平降低, 相频特性滞后角度增加, 但与机组自身有功、无功发生变化相比, 产生的影响较小。

### 3.4 并网电气距离大小影响分析

实际电网中 3.1 节所述的发电机通过两条并列线路与电网相连, 分别在电厂单出线、双出线并网运行时, 计算得到励磁系统的无补偿相频特性如图 9 所示。

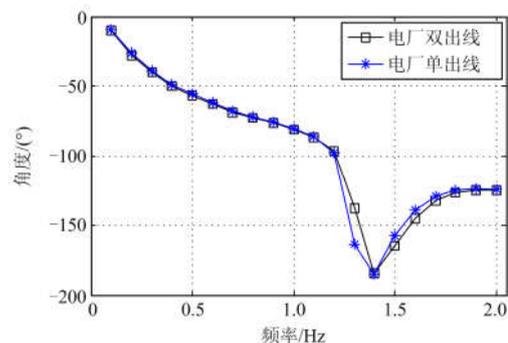


图 9 电气距离变化时的无补偿相频特性

Fig. 9 Uncompensated phase-frequency characteristics when electrical distance changes

如图 9 所示, 发电机并网电气距离发生变化时, 无补偿相频特性在 0.1~1.2 Hz 几乎没有变化, 在 1.2~1.4 Hz 随着电气距离增加滞后角度增加, 在 1.4~2.0 Hz 随着电气距离增加滞后角度减小, 最大滞后相角及其对应频率几乎没有变化, 并网电气距离发生上述改变时, 对测得的无补偿相频特性影响较小。

### 3.5 机组并列数量影响分析

选取某电厂作为研究对象, 该电厂在同一母线接入了三台并列运行机组, 三台机组容量相同且均安装了 PSS。改变并网运行的机组数量, 不同并列机组数量得到的无补偿相频特性如图 10 所示。

由图 10 可知, 无论并列机组的 PSS 是否退出运行, 随着并列运行机组数量增加, 均存在最大滞后相角减小的规律。这一规律主要影响 1.4~1.5 Hz 附近的频段, 对其他频段影响不大。

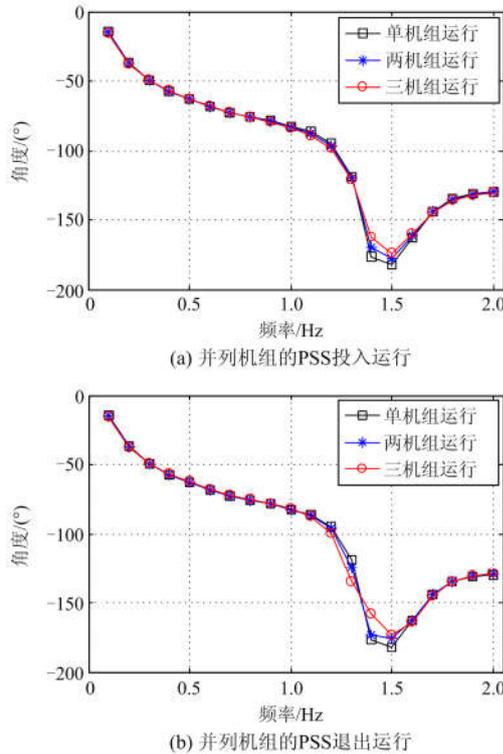


图 10 并列机组数变化时的无补偿相频特性

Fig. 10 Uncompensated phase-frequency characteristics when the number of parallel units changes

### 3.6 并列机组 PSS 投退影响分析

比较 3.5 节中并列运行机组数量相同时, PSS 投入和退出对待测机组无补偿相频特性的影响, 如图 11 所示。

由图 11 可知, 并列机组数量相同情况下, 无论并列机组的 PSS 投入或退出, 得到的无补偿相频特性差别不明显。

## 4 工程等效对 PSS 试验影响的仿真分析

为检验工程上采用  $\Delta U$  等效  $\Delta E'_q$  和采用单机无穷大系统替代实际电网对获得无补偿相频特性的影响。选取某实际机组, 仿真该机组分别接入实际电网和无穷大系统时获得的无补偿相频特性。

### 4.1 机端电压等效内电势

以 3.5 节所述电厂作为研究对象, 选取某一符合技术标准要求的运行状态, 分别以  $\Delta U$  和  $\Delta E'_q$  作为响应变量, 得到的无补偿相频特性如图 12 所示。

由图 12 可知, 无论该电厂并列运行机组数量多少, 均存在相似规律, 即以  $\Delta U$  代替  $\Delta E'_q$  时将导致获得的无补偿相频特性在 1.5 Hz 左右明显滞后。这一结论与文献[7]采用单机无穷大系统理论分析得到的结论一致。由于本文采用实际电网进行分析, 故

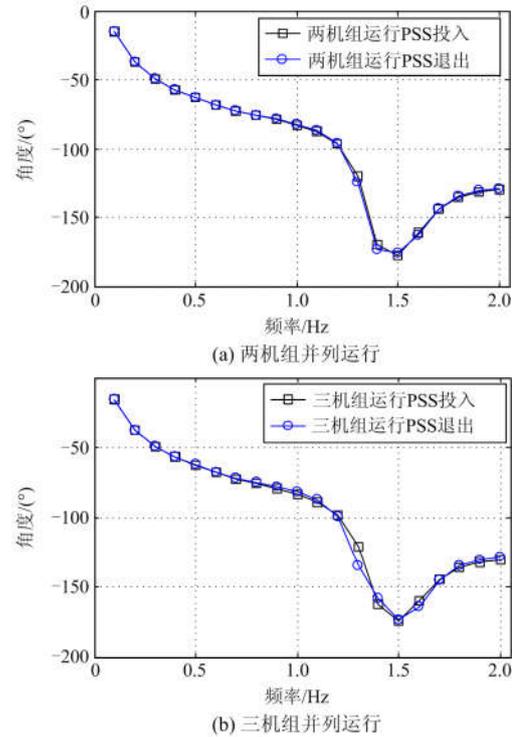
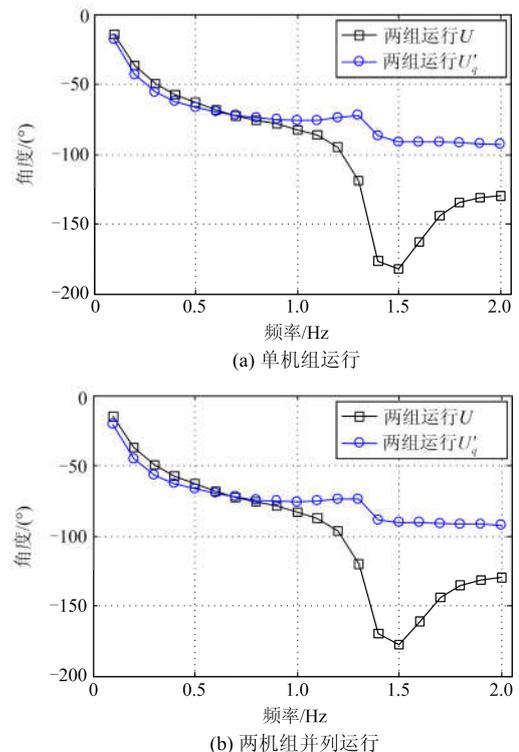


图 11 PSS 投退影响下的无补偿相频特性

Fig. 11 Uncompensated phase-frequency characteristics when PSS is on and out of service

也发现了在 2 Hz 附近仍有较大差距, 即考虑实际电网时, 1~2 Hz 频段范围内均存在无补偿相频特性较  $\Delta E'_q$  明显滞后的问题。



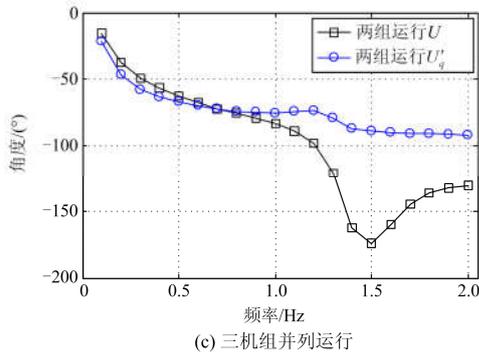


图 12 不同响应变量下的无补偿相频特性

Fig. 12 Uncompensated phase-frequency characteristics on different response variables

#### 4.2 单机无穷大系统代替实际电网

由 3.1 节—3.6 节可知,有功功率、无功功率是影响发电机 PSS 试验最为明显的因素。某机组有功功率 575 MW、无功功率 83 Mvar, 分别将该机组接入实际电网和无穷大系统进行仿真, 以  $\Delta E'_q$  作为响应变量获取无补偿特性如图 13 所示, 以  $\Delta U$  作为响应变量获得的无补偿相频特性与相同有功、无功出力下现场试验实测特性的对比如图 14 所示。

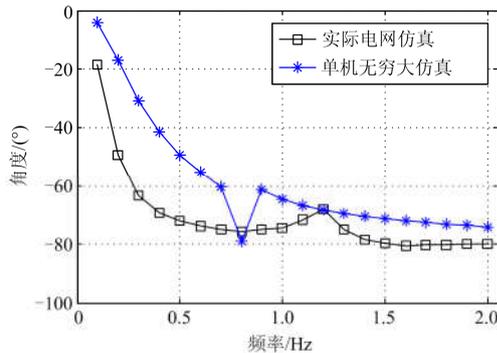


图 13 暂态电势作为响应获得的相频特性

Fig. 13 Phase-frequency characteristics acquired using transient voltage as a response

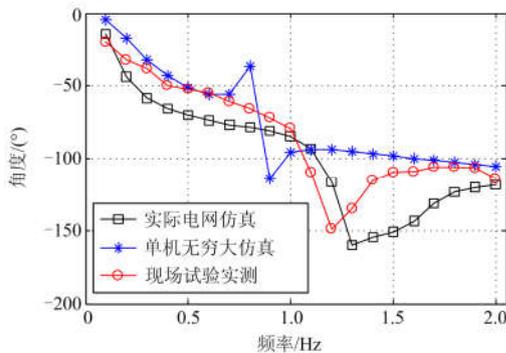


图 14 机端电压作为响应获得的相频特性

Fig. 14 Phase-frequency characteristics acquired using terminal voltage as a response

由图 13 和图 14 可知, 以单机无穷大系统代替实际电网, 得到无补偿相频特性在多数频段内存在滞后角度小于实际电网。故采用单机无穷大系统获得的无补偿相频特性进行参数整定, 可能存在补偿角度不足的风险。

由图 14 可知, 试验实测的无补偿相频特性与实际电网仿真更加接近, 多数频段内实测特性滞后角度小于实际电网仿真特性, 大于单机无穷大系统仿真得到特性。即采用单机无穷大系统获得的无补偿相频特性较实际乐观, 而采用实际电网仿真获得的特性存在一定裕量。

## 5 结论及建议

本文通过理论分析和实际电网仿真, 研究了运行方式对试验获取 PSS 无补偿相频特性的影响, 分析了工程上采用  $\Delta E'_q$  代替  $\Delta U$  和以单机无穷大系统代替实际电网的等效做法对获取无补偿特性的影响, 得出如下结论和建议。

### 5.1 结论

1) 根据理论分析可知, 无补偿特性误差主要受发电机有功、无功出力影响, 迟相运行时误差随着无功出力增加而减小, 随有功出力增加而增大。

2) 依照技术标准测量无补偿相频特性时, 所得相频特性在系统自然振荡频率附近受运行方式的影响最为明显, 其他频段不明显。具体为: (a) 随着机组有功功率增加, 相频特性滞后角度逐渐增大; (b) 随着机组无功功率增加, 相频特性滞后角度逐渐减小; (c) 随着电网负荷增加, 相频特性滞后角度轻度减小; (d) 并网电气距离改变, 对最大相频特性滞后角度影响不明显; (e) 随着并列机组数量增加, 相频特性滞后角度轻度减小; (f) 并列机组的 PSS 投退, 对待测量机组相频特性影响较小。

3) 采用机端电压等效暂态电势获取无补偿相频特性时, 所得相频特性在较高频段(1~2 Hz)滞后角度偏大, 据此整定参数存在补偿角度过大的风险。

4) 采用单机无穷大系统替代实际电网获取无补偿相频特性时, 所得相频特性的滞后角度偏小, 据此整定参数可能存在补偿角度不足的风险。

### 5.2 无补偿特性获取建议

1) 以机端电压等效暂态电势, 将导致所测相频特性滞后角度偏大, 该整定参数将难以满足技术标准的相频补偿要求, 且存在补偿过度的风险。以暂态电势响应作为参考时, 理论计算<sup>[7,24]</sup>和本文仿真结果表明无补偿相频特性近似为一条单调平滑曲线。故建议现场试验时, 以 2 Hz 处的滞后角度作为最大滞后角度, 并预留一定裕度。

2) 采用单机无穷大系统代替实际电网, 所得相频特性的滞后角度偏小, 本文针对无补偿相频特性的获取方式推荐顺序依次为现场实测、实际电网仿真、单机无穷大系统计算。

3) 依据技术标准测量相频特性时, 机组有功、无功出力对测量结果影响最为显著, 为减小测量误差, 建议在较小有功、较大无功出力条件下进行。

4) 试验获取的无补偿特性对并列机组数量、并网电气距离、电网负荷水平、临近机组 PSS 投退等因素不敏感。

### 参考文献

- [1] 徐伟, 夏小琴, 赵静波, 等. 基于电气距离的低频振荡关联区域和模式类型识别[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 24-30.  
XU Wei, XIA Xiaoqin, ZHAO Jingbo, et al. Relevant zone and mode type identification based on electrical distance for low frequency oscillation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 24-30.
- [2] 梁艳红, 张文朝, 李付强, 等. 链式电网动态稳定下多断面耦合特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 107-113.  
LIANG Yanhong, ZHANG Wenchao, LI Fuqiang, et al. Research on multi-sections coupling characteristics of chain network dynamic stability[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 107-113.
- [3] 仲启树, 唐志军, 金涛. 基于部分左特征结构配置的电力系统优化阻尼控制[J]. 电工技术学报, 2018, 33(13): 3012-3022.  
ZHONG Qishu, TANG Zhijun, JIN Tao. Optimized damping control of power system using partial left eigenstructure assignment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(13): 3012-3022.
- [4] 边晓燕, 施磊, 宗秀红, 等. 多运行方式下风电机组变频器参与次同步相互作用的分析与抑制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(11): 38-47.  
BIAN Xiaoyan, SHI Lei, ZONG Xiuhong, et al. Analysis and mitigation of wind turbine converters in sub-synchronous interaction under multi-operating conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(11): 38-47.
- [5] SURINKAEW T, NGAMROO I. Hierarchical coordinated wide area and local controls of DFIG wind turbine and PSS for robust power oscillation damping[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(3): 943-955.
- [6] JALAYER R, OOI B T. Co-ordinated PSS tuning of large power systems by combining transfer function-eigenfunction analysis (TFEA), optimization, and eigenvalue sensitivity[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(6): 2672-2680.
- [7] 霍承祥, 刘增煌, 朱方. 运用电力系统稳定器对励磁系统进行相位补偿的理论与实践[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12): 2989-2997.  
HUO Chengxiang, LIU Zenghuang, ZHU Fang. Theory and field practice of phase compensation on generator excitation system by utilizing power system stabilizer[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 2989-2997.
- [8] 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.
- [9] 王超, 李继红, 李颖毅, 等. 淮沪特高压投产后的华东电网低频振荡特性分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(18): 120-125.  
WANG Chao, LI Jihong, LI Yingyi, et al. Low frequency oscillation characteristics of east china power grid after commissioning of Huainan-Shanghai UHV Project[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(18): 120-125.
- [10] 程浩, 冯艳虹, 张道农, 等. 蒙西电网动态稳定问题分析及稳定措施研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 137-143.  
CHENG Hao, FENG Yanhong, ZHANG Daonong, et al. Analysis of dynamic stability issues of West Inner Mongolia power grid and research on its control measures[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 137-143.
- [11] 国家能源局. 电力系统稳定器整定试验导则: DL/T 1231—2013[S]. 北京: 中国电力出版社, 2013.  
National Energy Bureau. Experiment Principles of PSS Setting: DL/T 1231—2013[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [12] 张俊峰, 李鹏, 郭琦. PSS2A 模型的负阻尼案例分析及检测方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(2): 127-130.  
ZHANG Junfeng, LI Peng, GUO Qi. Negative damping case analysis and detection method of PSS2A model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(2): 127-130.
- [13] 夏潮, 刘增煌, 朱方, 等. 两分支分段补偿的并行电力系统稳定器[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(19): 20-25.  
XIA Chao, LIU Zenghuang, ZHU Fang, et al. Sectional compensation parallel power system stabilizer with two independent channels[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(19): 20-25.
- [14] 吴跨宇, 卢岑岑, 吴龙, 等. 一种新型双信号电力系统稳定器及其仿真研究[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1462-1468.  
WU Kuayu, LU Cencen, WU Long, et al. A new PSS

- with double-signal input and its simulation research[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1462-1468.
- [15] 吴跨宇, 沈铁君, 韩兵, 等. 新型 PSS-NB 模型参数整定与工程化应用[J]. 中国电力, 2017, 50(12): 106-111, 158.  
WU Kuayu, SHEN Yijun, HAN Bing, et al. Parameter tuning of new PSS-NB model and its engineering application[J]. Electric Power, 2017, 50(12): 106-111, 158.
- [16] RIMOROV D, KAMWA I, JOÓS G. Model-based tuning approach for multi-band power system stabilizers PSS4B using an improved modal performance index[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(15): 2135-2143.
- [17] 赵晓伟, 谢欢, 吕思昕, 等. 电力系统稳定器 PSS4B 的参数整定及现场试验[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 508-513.  
ZHAO Xiaowei, XIE Huan, LÜ Sixin, et al. Parameter setting and on-site test of power system stabilizer-PSS4B[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 508-513.
- [18] SHAHGHOLIAN G, MOVAHEDI A. Power system stabiliser and flexible alternating current transmission systems controller coordinated design using adaptive velocity update relaxation particle swarm optimisation algorithm in multi-machine power system[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(8): 1860-1868.
- [19] CLOUGHLEY M, MUTTAQI K M, DU Haiping. Damping of low-inertia machine oscillations using Takagi-Sugeno fuzzy stabiliser tuned by genetic algorithm optimization to improve system stability[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2014, 8(2): 339-352.
- [20] 冯双, 蒋平, 吴熙. 抑制共振机理低频振荡的 PSS 设计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 1-6.  
FENG Shuang, JIANG Ping, WU Xi. PSS design method for suppressing low-frequency oscillation of resonance mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 1-6.
- [21] LIU Xiangyu, HE Yuling, YAO Jian. A new hybrid PSS optimization method based on improved active set algorithm [J/OL]. Mathematical Problems in Engineering, 2018. <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2018/4348257>.
- [22] 刘翔宇, 何玉灵, 孟凡超, 等. 既定 PSS 在不同运行状态下的适应性分析[J]. 电测与仪表, 2016, 53(15): 95-100.  
LIU Xiangyu, HE Yuling, MENG Fanchao, et al. Adaptation analysis on fixed PSS under different performing conditions[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(15): 95-100.
- [23] 刘翔宇, 何玉灵, 周文, 等. 考虑电网稳定限制的机组进相能力分析[J]. 华北电力大学学报, 2017, 44(1): 52-57.  
LIU Xiangyu, HE Yuling, ZHOU Wen, et al. Analysis on unit capability of leading-phase operation considering stability restriction of power grid[J]. Journal of North China Electric Power University, 2017, 44(1): 52-57.
- [24] 朱良合, 栾会, 张镓, 等. 基于现场实验数据的 PSS 参数智能优化方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(7): 96-102.  
ZHU Lianghe, LUAN Hui, ZHANG Ying, et al. Intelligent parameter optimization of power system stabilizer based on field test results[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2015, 27(7): 96-102.

收稿日期: 2018-05-21; 修回日期: 2018-07-09

作者简介:

刘翔宇(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统动态仿真、分析与控制, 电力系统网源协调。E-mail: liuxiangyu1234@163.com

(编辑 许威)