

电力系统稳定器对次同步振荡的影响及其机制研究

吴熙, 蒋平, 胡弢

(东南大学电气工程学院, 江苏省南京市 210096)

Impact of Power System Stabilizer on Subsynchronous Oscillation and Its Mechanism

WU Xi, JIANG Ping, HU Tao

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: The test signal method was applied to the study of the influences of the speed-based power system stabilizer (PSS) and the power-based PSS on sub-synchronous oscillation (SSO) in different systems, such as ordinary AC system, system with static var compensator (SVC) and system with thyristor controlled series capacitor (TCSC). Conclusions can be drawn that the influence of the speed-based PSS is considerable, while the influence of the power-based type PSS is negligible. Three terms including the input signal, phase compensation characteristic, and the relative gain of PSS were studied to analyze the mechanism of the effect of PSSs on SSO. The “SSO response ratio” was introduced to analyze the responses of $\Delta\omega$ and ΔP_e . By frequency analysis, the influences of phase compensation characteristic, and the relative gain of PSS were studied. Results show that the comparatively large synchronous component in speed-feedback signal and the magnification of sub-synchronous signal caused by lead element are two prime reasons for the comparatively large effect made by speed-based type PSS.

KEY WORDS: power system stabilizer (PSS); sub-synchronous oscillation (SSO); flexible AC transmission system (FACTS); response ratio; frequency domain analysis

摘要: 采用测试信号法, 在普通交流系统、含静止无功补偿 (static var compensator, SVC) 的系统、含可控串联补偿 (thyristor controlled series capacitor, TCSC) 的系统中, 研究速度反馈型 (以 $\Delta\omega$ 为输入) 和功率反馈型 (以 $-\Delta P_e$ 为输入) 电

力系统稳定器 (power system stabilizer, PSS) 对次同步振荡阻尼特性的影响规律, 得到速度反馈型 PSS 对次同步振荡影响较大, 而功率反馈型 PSS 对次同步振荡几乎没有影响的结论; 从 PSS 输入信号、相位补偿特性及 PSS 增益 3 个角度研究 PSS 对次同步振荡产生影响的机制; 引入“次同步振荡响应比”的概念分析 $\Delta\omega$ 和 ΔP_e 的动态响应, 并通过频域分析研究相位补偿环节的补偿特性及放大增益的影响。结果表明, 速度反馈信号中次同步分量较大以及超前环节对次同步频率信号的放大作用是导致速度反馈型 PSS 对次同步振荡影响较大的主要原因。

关键词: 电力系统稳定器; 次同步振荡; 柔性交流输电系统; 响应比; 频域分析

0 引言

随着电力系统的不断发展和电网规模的不断扩大, 具有快速调节性能的自动控制装置逐渐增多, 从而降低了系统的阻尼, 使系统的稳定性受到影响。在某些发电机的励磁系统上加装电力系统稳定器 (power system stabilizer, PSS) 来抑制系统低频振荡, 特别是本地振荡模式, 是一种经济、有效、使用最广泛的方法^[1-10]。由于国内 PSS 的应用越来越广泛, 其对次同步振荡产生的影响也不可忽略。文献[11]指出 PSS 输入端的反馈信号对扭振有不利影响, 可能引发次同步振荡, 并通过加入扭转滤波器解决了该问题。文献[12]从阻尼守恒的角度分析了 PSS 对次同步振荡的影响, 指出 PSS 的加入可增大系统阻尼, 但调节 PSS 参数使得低频振荡模式阻尼增加后, 次同步振荡模式的总阻尼必然减少。文献[13]利用解耦模态模型分析了速度反馈型、功率

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重大项目 (2008BAA13B07); 江苏省研究生科研创新计划项目 (CXZZ11_0151)。

Key Project of the National Eleventh-Five Year Research Program of China (2008BAA13B07); Innovation Program for Graduate Student of Jiangsu Province (CXZZ11_0151).

反馈型和速度加功率反馈型 PSS 对电力系统次同步振荡的影响,分析表明,这 3 种 PSS 在对低频振荡模态提供相同正阻尼的情况下,对各个次同步振荡模态均提供不同程度的负阻尼,其中速度反馈型 PSS 提供的负阻尼转矩最为明显,速度加功率反馈型 PSS 次之,功率反馈型 PSS 最小。文献[14]则获得了较为不同的结论,对于高起始响应的励磁系统,速度反馈型 PSS 使谐振点附近的电气负阻尼增加,且随着 PSS 放大倍数的增大而增加,这不利于次同步谐振的抑制;功率反馈型 PSS 使系统谐振点附近的电气负阻尼减小,且随着放大倍数的增大而减小,这说明在实现抑制低频振荡的同时,次同步谐振也将得到缓解。

可见,关于 PSS 对次同步振荡的影响没有统一的结论,而且没有对含柔性交流输电装置(flexible AC transmission systems, FACTS)等非线性电力装置的系统加以考虑。本文在普通交流系统以及含 FACTS 等高度非线性器件的系统中,研究速度反馈型 PSS 与功率反馈型 PSS 对发电机组次同步阻尼特性的影响,总结其影响次同步振荡的规律。然后,研究 PSS 对次同步振荡的影响机制,给出 PSS 引发次同步振荡的条件,对 PSS 的参数设计有一定的指导意义。

1 PSS 的结构及作用机制

典型结构的 PSS 由放大、隔直、相位补偿、限幅等几个环节组成^[15],其模型结构如图 1 所示。

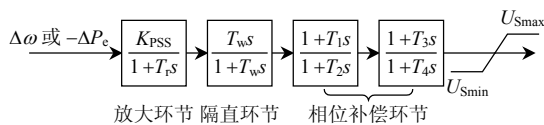


图 1 PSS 模型
Fig. 1 PSS model

PSS 抑制低频振荡的基本思想是:以 $\Delta\omega$ 或 $-\Delta P_e$ 作为 PSS 的输入信号^[16],将其进行适当的移相和放大,经限幅后输出到励磁电压调节器的附加信号输入端,并调节发电机的励磁电压,从而使发电机的电磁转矩中产生一个阻尼低频振荡的电气转矩增量,达到抑制低频振荡的目的。与此同时,PSS 也会相应地引入次同步频段转矩,该转矩将影响次同步频段的阻尼^[17-19],从而对次同步振荡起到

抑制或激发作用。

转速偏差 $\Delta\omega$ 、电磁功率偏差 $-\Delta P_e$ 与电磁转矩偏差 ΔT_e 的矢量图可用图 2 表示。若电气阻尼系数为负且其幅值大于机械阻尼系数时,系统就会不稳定。由图 2 所示的相位关系可知,当 ΔT_e 滞后于 $\Delta\omega$ 的相位在 $90^\circ \sim 270^\circ$ 之间,即 ΔT_e 位于第 3 或第 4 象限时,电气阻尼转矩 ΔT_D 就是负的,可能导致系统不稳定。PSS 提供的附加电磁转矩 $\Delta T'_e$ 若位于第 1 或第 2 象限,即与 $\Delta\omega$ 相位差在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 之间,就可提供正的电阻尼,有利于抑制低频振荡或次同步振荡。

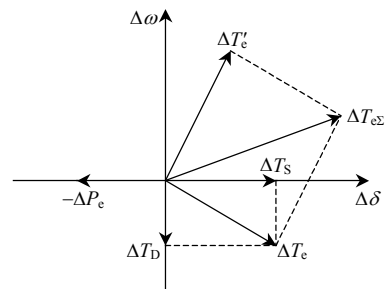


图 2 电磁转矩与转速偏差信号及电磁功率偏差信号的矢量图
Fig. 2 Vector diagram of ΔT_e , $\Delta\omega$ and ΔP_e

2 PSS 对次同步振荡影响的仿真分析

2.1 研究系统

由于次同步振荡问题的特殊性,用传统的解析方法很难分析含 FACTS 等非线性装置的次同步振荡问题。因此以往的文献中往往没有考虑这些非线性装置,为获得更为普适的结论,本文利用测试信号法,在交流系统、含静止无功补偿器(static var compensator, SVC)的系统和含可控串联补偿器(thyristor controlled series capacitor, TCSC)的系统中研究 PSS 对次同步振荡的影响。对 IEEE 次同步谐振第 1 标准系统^[20]进行改造,分别考虑以下 3 个改造系统中 PSS 对次同步振荡的影响:

- 1) 系统 1。普通交流系统,在 IEEE 第 1 标准系统中去除电容器。
 - 2) 系统 2。含 SVC 系统,将 SVC 安装在 IEEE 第 1 标准测试系统的输电线路中央。
 - 3) 系统 3。含 TCSC 系统,将 IEEE 第 1 标准测试系统中 25%容量的串补电容以 TCSC 代替。
- 改造后的 3 个系统如图 3 所示。

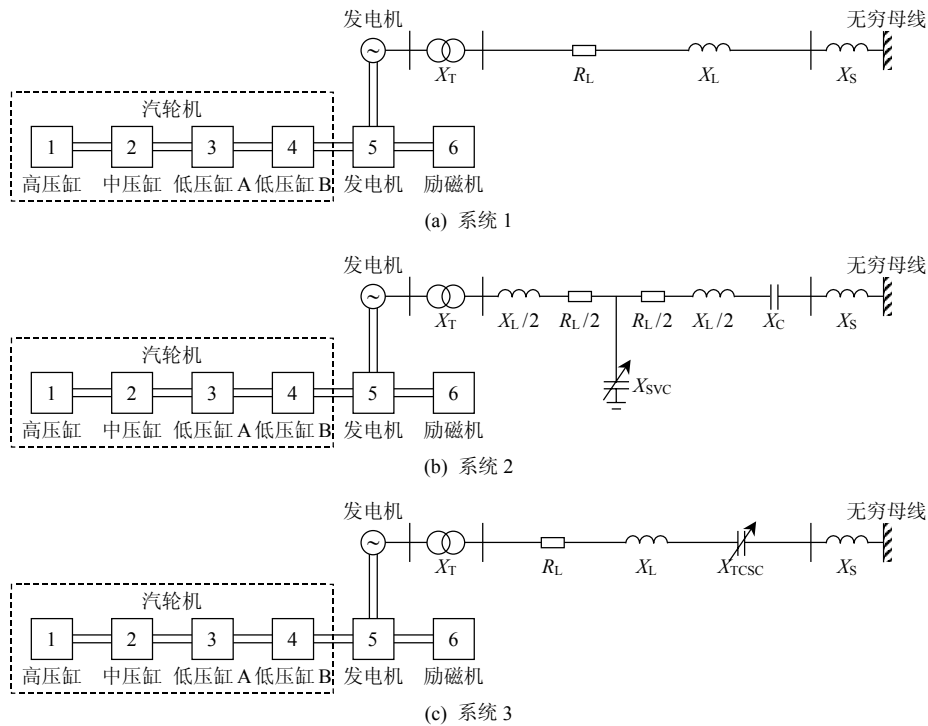


图3 研究系统的模型

Fig. 3 Circuit diagram of the study system

2.2 仿真分析

在电压调节器(automatic voltage regulator, AVR)的附加输入信号端加入一系列很小的正弦扰动信号 ΔU_S ，待系统仿真至稳态，在公共周期内对 ΔT_e 和 ΔU_S 进行傅里叶分解，辨识出3个系统的相位滞后角 θ_{lag} ，如图4所示。

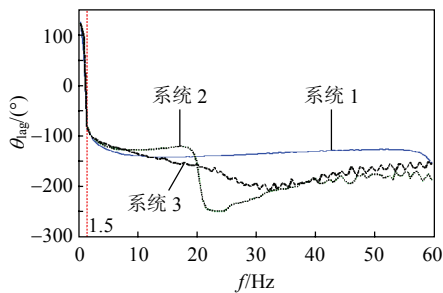


图4 3个系统的相位滞后特性曲线

Fig. 4 Phase lags of three systems

由图4可看出，这3个系统的低频段相位滞后特性非常相似，而次同步频段相位滞后特性相差很大。这很有利于研究PSS对次同步振荡的影响，由于低频相位滞后特性几乎一样，3个系统中加入的PSS可取相同参数。低频振荡频率1.5 Hz处的滞后角约为80°，使用速度反馈型PSS需补偿80°，使用功率反馈型PSS需补偿-10°。对单个相位补偿环

节 $(1 + T_2S)/(1 + T_1S)$ ，若需要在频率 ω_x 处补偿角度 ϕ ，则时间常数 T_1 、 T_2 可通过下式计算：

$$\begin{cases} a = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \\ T_1 = \frac{1}{\omega_x \sqrt{a}} \\ T_2 = aT_1 \end{cases} \quad (1)$$

按式(1)计算 PSS 相位补偿环节参数，得到的 PSS 相位补偿环节参数如表1所示。

表1 不同输入信号下 PSS 的参数

Tab. 1 Parameters of PSS for different input signals

输入信号	T_w/s	T_1/s	T_2/s	环节个数
$\Delta\omega$	10	0.2275	0.0495	2
$-\Delta P_e$	8	0.0890	0.1264	1

在系统1—3中分别加入速度反馈型和功率反馈型PSS，并调节PSS的放大倍数。使用测试信号法^[21]研究系统电气阻尼特性的变化，如图5—10所示。

虽然这3个系统的次同步频段相位滞后特性差异很大，但通过图5—10的仿真结果却可以发现，PSS对次同步振荡的影响规律较为一致：速度反馈型PSS对次同步振荡的阻尼影响较大，随着PSS

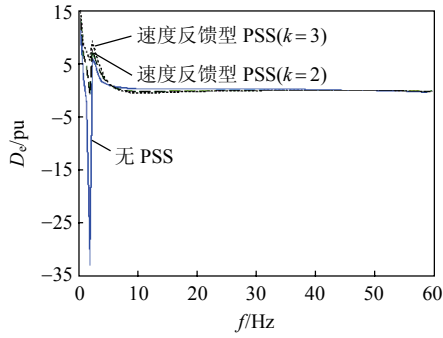


图 5 加入速度反馈型 PSS 前后系统 1 的电气阻尼特性
Fig. 5 Damping coefficient for system 1 of each section without or with speed based PSS

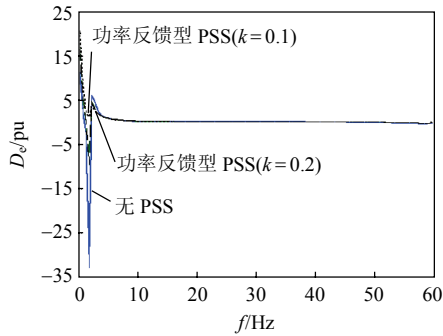


图 6 加入功率反馈型 PSS 前后系统 1 的电气阻尼特性
Fig. 6 Damping coefficient for system 1 of each section without or with power based PSS

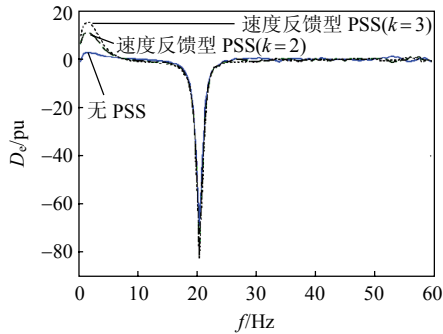


图 7 加入速度反馈型 PSS 前后系统 2 的电气阻尼特性
Fig. 7 Damping coefficient for system 2 of each section without or with speed based PSS

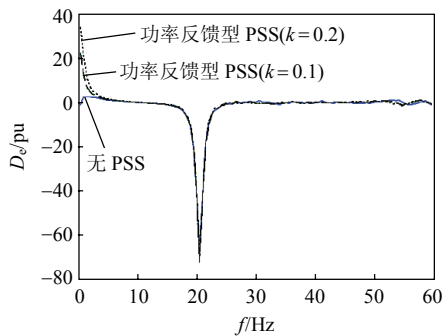


图 8 加入功率反馈型 PSS 前后系统 2 的电气阻尼特性
Fig. 8 Damping coefficient for system 2 of each section without or with power based PSS

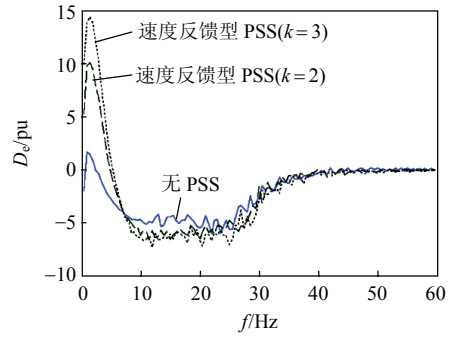


图 9 加入速度反馈型 PSS 前后系统 3 的电气阻尼特性
Fig. 9 Damping coefficient for system 3 of each section without or with speed based PSS

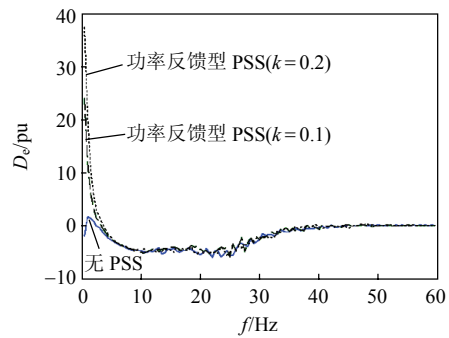


图 10 加入功率反馈型 PSS 前后系统 3 的电气阻尼特性
Fig. 10 Damping coefficient for system 3 of each section without or with power based PSS

放大倍数的提高，次同步频段阻尼变化增大，会对次同步振荡产生不利的影响；而功率反馈型 PSS 对次同步振荡则几乎没有影响。

3 PSS 对次同步振荡影响的机制研究

3.1 PSS 输入信号的影响

为表征 $\Delta\omega$ 和 ΔP_e 信号中次同步振荡分量的参与程度，引入“次同步振荡响应比”的概念。

根据特征值分析法的相关理论，可将系统的状态空间方程表示为

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} \quad (2)$$

式中： \mathbf{X} 为系统的状态变量； \mathbf{A} 为表征系统特性的自由动力学矩阵。可由 \mathbf{A} 阵求出系统的特征根 λ_i 及其对应的左右特征向量 \mathbf{V}_i 及 \mathbf{U}_i 。

而系统状态变量的时域解可表示为

$$\Delta\mathbf{X}(t) = \sum_{i=1}^n \mathbf{V}_i^T \Delta\mathbf{X}(0) \mathbf{U}_i e^{\lambda_i t} \quad (3)$$

若仅研究第 k 个状态变量的响应，设 $\Delta\mathbf{X}(0) = \mathbf{e}_k^T$ ， \mathbf{e}_k^T 为单位向量的转置，仅第 k 个元素为 1，其

余元素为0。则式(3)变为

$$\Delta x_k(t) = \sum_{i=1}^n v_{ki} u_{ki} e^{\lambda_i t} \quad (4)$$

式(4)表示被初始值 $\Delta x_k(0)=1$ 激励的第 i 个模式, 以系数 $v_{ki} u_{ki}$ 参与到第 k 个状态量 Δx_k 的动态响应 $\Delta x_k(t)$ 中。其中, 称 $p_{ki} = v_{ki} u_{ki}$ 为参与因子。第 k 行第 i 列元素为 p_{ki} 的矩阵称为参与矩阵 \mathbf{P} 。

设系统方程(2)为 N 阶, 则可解出 N 个特征根, 其中, 次同步振荡模式有 M 个。定义“次同步振荡响应比” ζ 为所有次同步振荡模式对应的参与因子之和与系统所有特征根对应的参与因子之和的比值。

$$\zeta = \frac{\sum_{i=1}^M p_i}{\sum_{i=1}^N p_i} \quad (5)$$

对 IEEE 第 1 标准系统进行特征根分析(具体方法可参考文献[12]), 并求取系统参与矩阵 \mathbf{P} 。由于 $\Delta\omega$ 为状态变量, 其参与因子相量即为矩阵 \mathbf{P} 中与 $\Delta\omega$ 对应的行。

发电机功率可表示为

$$P_e = u_d i_d + u_q i_q + 2u_0 i_0 \quad (6)$$

在运行点附近将其线性化, 忽略零序分量的影响, 可得到如下功率变化量的表达式:

$$\Delta P_e = \Delta u_d i_{d0} + u_{d0} \Delta i_d + \Delta u_q i_{q0} + u_{q0} \Delta i_q \quad (7)$$

消去中间变量, 并用状态变量表示 ΔP_e , 可整理成如下形式:

$$\Delta P_e = \mathbf{K} \Delta \mathbf{X} \quad (8)$$

则 ΔP_e 对应的参与因子相量为

$$\mathbf{p} = \mathbf{K} \mathbf{P} \quad (9)$$

当线路串补度 μ 分别为 0%、25%、50%、75% 时, $\Delta\omega$ 和 ΔP_e 的次同步振荡响应比如表 2 所示。

表 2 不同串补度时的次同步振荡响应比
Tab. 2 Subsynchronous response ratio for different series compensation degrees

输入信号	ζ			
	$\mu=0\%$	$\mu=25\%$	$\mu=50\%$	$\mu=75\%$
$\Delta\omega$	0.6963	0.6956	0.6969	0.6911
$-\Delta P_e$	0.0170	0.0229	0.0365	0.0826

由表 2 可看出, $\Delta\omega$ 的次同步振荡响应比比 ΔP_e 大得多, 相差 1 个数量级。说明次同步振荡更明显地表现在 $\Delta\omega$ 中, 因此以 $\Delta\omega$ 为输入信号将会引入

更多的次同步振荡分量。

3.2 PSS 相位补偿的影响

PSS 的相位补偿环节一般由 1~3 个超前滞后环节组成, 其提供的补偿的频带较窄, 对次同步振荡分量的补偿角度很小。而且由图 4 可知, 对于各种不同的系统, 次同步频段相位滞后特性相差很大, 由于 PSS 相位补偿环节个数以及通道数的限制, 其无法同时兼顾低频振动模式和所有次同步振荡模式, 所以对所有次同步振荡模式都起正阻尼作用的机会是很小的。

3.3 PSS 增益的影响

相位滞后特性决定了 PSS 的输出信号是起到抑制作用还是激发作用, 但该作用的大小主要取决于输出信号的大小, 输出信号的大小又由 PSS 输入信号的大小和 PSS 的增益这 2 方面决定。由于 PSS 的放大倍数 K 为实数, 无论对低频振荡信号还是次同步振荡信号, 其放大倍数一致, 因此主要考虑超前滞后环节增益对次同步振荡的影响。

单个 PSS 的相位补偿环节 $(1+T_2S)/(1+T_1S)$, 对于频率为 ω 的信号, 其放大倍数为

$$K_\omega = \sqrt{\frac{1+(T_1\omega)^2}{1+(T_2\omega)^2}} \quad (10)$$

当进行超前补偿时, $T_1 > T_2$, 放大倍数随着角频率 ω 的增大而增大。因此超前环节对次同步信号放大倍数比低频信号放大倍数大。

当进行滞后补偿时, $T_1 < T_2$, 放大倍数随着角频率 ω 的减小而减小。因此滞后环节对次同步信号放大倍数比低频信号放大倍数小。

为更加直观地观察放大倍数的变化, 取低频补偿频率为 1.5 Hz, 由式(1)分别设计单个补偿环节的补偿角为 -40° 、 -20° 、 20° 、 40° 和 60° , 绘制其幅频特性曲线, 如图 11 所示。

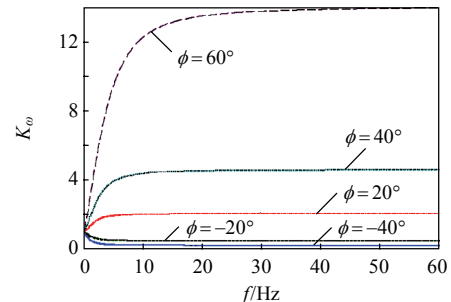


图 11 不同角度相位补偿环节的幅频特性
Fig. 11 Amplitude-frequency characteristic of phase compensating link with different angles

由图 11 可见：超前环节对次同步频率信号的放大倍数比滞后环节要大得多；而且超前补偿的度数越大，对次同步频率信号的放大倍数就越大，越容易激发次同步振荡。

常规励磁系统的相位滞后角一般为 $30^{\circ}\sim 160^{\circ}$ ，而 $-\Delta P_e$ 信号超前 $\Delta\omega$ 信号 90° ，故采用 $\Delta\omega$ 作为输入的 PSS 需提供更大的超前相位校正，这样会放大信号中的次同步分量，容易引发次同步振荡。

4 算例验证

由以上机制分析可知，速度反馈信号中次同步分量较大以及超前环节对次同步频率信号的放大作用是导致速度反馈型 PSS 对次同步振荡影响较大的主要原因。

对系统 1 进行时域仿真，在确保系统可以在运行点附近线性化的条件下加入小值扰动，对 $\Delta\omega$ 和 ΔP_e 进行傅里叶分析，结果如图 12 所示。图中 A 为信号进行傅里叶分解后得到的幅值。

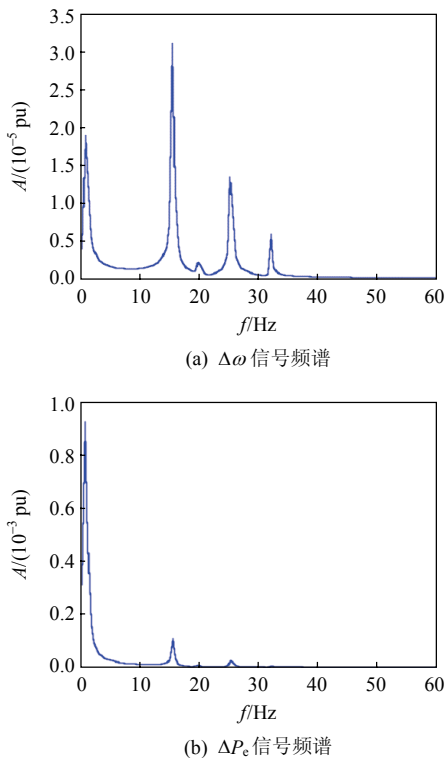


图 12 $\Delta\omega$ 与 ΔP_e 信号频谱

Fig. 12 Frequency spectrum of $\Delta\omega$ and ΔP_e

通过比较图 12 可知， $\Delta\omega$ 中包含的次同步分量较大，低频振荡模式幅值与最大次同步振荡模式幅值之比约为 1:2，而 ΔP_e 中包含的次同步分量很小，低频振荡模式幅值与最大次同步振荡模式幅值之

比约为 8:1。在系统 1 中，若 PSS 需引入同样幅值的低频振荡信号，则以 $\Delta\omega$ 为输入的 PSS 比以 ΔP_e 为输入的 PSS 多引入了约 16 倍的次同步振荡分量。

计算参数为表 1 的 PSS 的相位补偿环节对各个频率的放大倍数，并以 1.5 Hz 处的放大倍数为基准，进行规格化，结果如表 3 所示。

表 3 相位补偿环节对不同频率信号的增益

Fig. 3 Relative gain of phase compensation block for different frequencies

频率/Hz	速度反馈型 PSS		功率反馈型 PSS	
	放大倍数	规格化	放大倍数	规格化
1.50	4.40	1.000	0.839 2	1.000
15.71	20.27	4.607	0.706 4	0.842
20.21	20.60	4.682	0.705 5	0.841
25.55	20.79	4.725	0.705 0	0.840
32.28	20.91	4.752	0.704 7	0.840

从表 3 可看出：在低频振荡模式补偿相同的阻尼下，速度反馈型 PSS 对于次同步振荡模式的放大倍数是功率反馈型 PSS 信号放大倍数的 6 倍左右，更易激发次同步振荡。在本例中，为输出等量的低频振荡阻尼信号，使用速度反馈型 PSS 将比使用功率反馈型 PSS 多输出约 $16 \times 6 = 96$ 倍的次同步扭振信号，是非常可观的，因此速度反馈型 PSS 比功率反馈型 PSS 对次同步振荡的影响要大很多。

5 结论

本文采用测试信号法考察了速度反馈型和功率反馈型 PSS 在普通交流系统及含 FACTS 器件系统中的表现；并从 PSS 输入信号、PSS 相位补偿以及 PSS 增益 3 个角度分析了 PSS 对次同步振荡的影响机制，得出结论如下：

1) 速度反馈型 PSS 对次同步振荡的阻尼影响较大，随着 PSS 放大倍数的提高，次同步频段阻尼变化增大；而功率反馈型 PSS 对次同步振荡则几乎没有影响。

2) 引入“次同步振荡响应比”的概念对转速偏差信号 $\Delta\omega$ 和功率偏差信号 ΔP_e 进行分析，结果表明， $\Delta\omega$ 包含的次同步分量比 ΔP_e 中包含的次同步分量要大很多；因此使用速度反馈型 PSS 将引入更多的次同步振荡分量。

3) PSS 针对低频振荡频率进行补偿，其补偿频带较窄，对次同步振荡频段的补偿角度小，因此对次同步振荡的补偿特性主要取决于系统本身。

4) 速度反馈型 PSS 一般需比功率反馈型 PSS 提供更大的超前相位校正, 对次同步频率信号的放大倍数更大, 更容易激发次同步振荡。

5) PSS 的相位补偿特性决定了其几乎不可能对所有次同步振荡模式提供正阻尼, 因此应尽量减小传统 PSS 对次同步振荡的影响, 故在其他条件允许的情况下, 应优先选择功率反馈型 PSS。不过若是要专门设计相应的 PSS 抑制次同步振荡, 则应选择包含次同步分量较多的 $\Delta\omega$ 作为 PSS 的输入信号。

参考文献

- [1] 高磊, 朱方, 赵红光, 等. 东北—华北直流互联后东北电网发电机组 PSS 参数适用性研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(25): 19-25.
Gao Lei, Zhu Fang, Zhao Hongguang, et al. PSS applicability in the Northeast-China power grid for the DC interconnected Northeast-China and North-China power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(25): 19-25(in Chinese).
- [2] 牛振勇, 杜正春, 方万良, 等. 基于进化策略的多机系统 PSS 参数优化[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 22-27.
Niu Zhenyong, Du Zhengchun, Fang Wanliang, et al. Parameter optimization of multi-machine power system stabilizers using evolutionary strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 22-27(in Chinese).
- [3] Abdel-Magid Y L, Abido M A, Mantawy A H. Robust tuning of power system stabilizers in multimachine power system[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2000, 15(2): 735-740.
- [4] 王成山, 石颀. 考虑时间延迟影响的电力系统稳定器设计[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 1-6.
Wang Chengshan, Shi Jie. PSS designing with consideration of time delay impact[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10): 1-6(in Chinese).
- [5] 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(in Chinese).
- [6] 管秀鹏, 程林, 孙元章, 等. 基于 Prony 方法的大型互联电网 PSS 参数优化设计[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(12): 7-11.
Guan Xiupeng, Cheng Lin, Sun Yuanzhang, et al. PSS parameter optimization on large-scale interconnection power grid based on Prony method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(12): 7-11(in Chinese).
- [7] 赵书强, 常鲜戎, 贺仁睦, 等. PSS 控制过程中的借阻尼现象与负阻尼效应[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 7-11.
Zhao Shuqiang, Chang Xianrong, He Renmu, et al. Borrow damping phenomena and negative damping effect of PSS control[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 7-11(in Chinese).
- [8] 于占勋, 尹项根, 陈德树, 等. 智能变结构 PSS 的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(3): 67-70.
Yu Zhanxun, Yin Xianggen, Chen Deshu, et al. Experiment research of intelligence variable structure PSS[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(3): 67-70(in Chinese).
- [9] 朱方, 刘增煌, 高光华. 电力系统稳定器对三峡电力系统暂态稳定的影响[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 20-22.
Zhu Fang, Liu Zenghuang, Gao Guanghua. The influence of PSS upon transient stability of the three gorges electric power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(11): 20-22(in Chinese).
- [10] 张玫, 方思立. 电力系统稳定器(PSS)参数的选择[J]. 中国电机工程学报, 1992, 12(3): 53-59.
Zhang Mei, Fang Sili. Parameter selection of electric power system stabilizer[J]. Proceedings of the CSEE, 1992, 12(3): 53-59(in Chinese).
- [11] Watson W, Coulters M E. Static exciter stabilizing signals on large generators-mechanical problems[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1973, PAS-92(1): 204-211.
- [12] 胡云花, 赵书强, 马燕峰, 等. 电力系统低频振荡和次同步振荡统一模型阻尼分析[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(7): 6-11.
Hu Yunhua, Zhao Shuqiang, Ma Yanfeng, et al. Damping analysis of unified LFO & SSO model in power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(7): 6-11(in Chinese).
- [13] 吴俊勇, 程时杰, 陈德树. 电力系统稳定器对轴系扭振影响的研究[J]. 华中理工大学学报, 1993, 21(1): 130-135.
Wu Junyong, Cheng Shijie, Chen Deshu. The effects of power system stabilizers on the shaft torsional vibration of large turboalternators[J]. Journal of Huangzhong University of Science and Technology, 1993, 21(1): 130-135(in Chinese).
- [14] 张帆, 徐政. 励磁系统及电力系统稳定器对发电机组次同步谐振阻尼特性的影响[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 14-19.
Zhang Fan, Xu Zheng. Effect of exciter and power system

- stabilizer on subsynchronous resonance damping[J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 14-19(in Chinese).
- [15] IEEE Power & Energy Society. IEEE Std 421.5 Recommended practice for excitation system models for power system stability studies[S]. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1992.
- [16] Lee D C, Beaulieu R E, Service J R R. A power system stabilizer using speed and electrical power inputs-design and field experience[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(9): 4151-4157.
- [17] 蒋平, 王贯义. 抑制次同步谐振的并联结构 PSS 参数优化[J]. 电工技术学报, 2009, 24(10): 122-127.
Jiang Ping, Wang Guanyi. Parameter optimization of PSS of parallel configuration used to damp subsynchronous resonance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(10): 122-127(in Chinese).
- [18] 张帆, 徐政. 电力系统稳定器抑制次同步谐振的效果[J]. 电工技术学报, 2007, 22(6): 121-127.
Zhang Fan, Xu Zheng. Effect of exciter and power system stabilizer on subsynchronous resonance damping[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(6): 121-127(in Chinese).
- [19] 蒋平, 吴熙, 罗曦. 基于 TLS-ESPRIT 算法的附加励磁阻尼控制抑制次同步振荡[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(10): 25-29.
Jiang Ping, Wu Xi, Luo Xi. SSO mitigation using supplementary excitation damping controller based on TLS-ESPRIT[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(10): 25-29(in Chinese).
- [20] IEEE Subsynchronous Resonance Task Force. First benchmark model for computer simulation of subsynchronous resonance[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1977, 96(5): 1565-1572.
- [21] 徐政. 复转矩系数法的实用性分析及其时域仿真实现[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 1-4.
Xu Zheng. The complex torque coefficient approach's applicability analysis and its realization by time domain simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 1-4(in Chinese).



吴熙

收稿日期: 2011-04-06。

作者简介:

吴熙(1987), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统运行控制, wuxi112233@163.com;

蒋平(1954), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统运行控制和电力电子在电力系统中的应用方面的研究工作, jping@seu.edu.cn;

胡弢(1986), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行控制, tiger9306@163.com。

(责任编辑 谷子)