

电力系统稳定器相位补偿方式对次同步振荡的影响

杨琳, 肖湘宁

(华北电力大学电气与工程学院, 北京 102206)

摘要: 除了输入信号类型之外, 电力系统稳定器 (PSS) 的相位补偿方式也是其影响次同步振荡的非常重要的因素。设计了四种不同类型的 PSS: 采用一级超前补偿的速度反馈型 PSS, 采用两级超前补偿的速度反馈型 PSS, 采用滞后补偿再反相的速度反馈型 PSS, 采用滞后补偿的功率反馈型 PSS; 分析了各 PSS 的频率特性, 加入 PSS 前后系统的电气阻尼特性, PSS 相位补偿方式对次同步频段信号的影响, 以及滞后补偿再反相的速度反馈型 PSS 的可行性。结果表明, 采用滞后补偿再反相的速度反馈型 PSS 对次同步振荡几乎没有影响, 该 PSS 既能利用理想的转速偏差作为输入信号, 又能避免对轴系扭振敏感, 还能有效抑制低频振荡, 具有可行性。

关键词: 次同步振荡; 电力系统稳定器; 输入信号; 相位补偿; 阻尼

Impact of phase compensation methods of power system stabilizer on subsynchronous oscillation

YANG Lin, XIAO Xiang-ning

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In addition to the type of input signal, phase compensation method of power system stabilizer (PSS) is also very important for SSO. Four types of PSS are designed. These PSSs are speed-based PSS with a first-order lead compensation block, speed-based PSS with a second-order lead compensation block, speed-based PSS with a third-order lag compensation and then inverting, and power-based PSS with a lag compensation block. The frequency characteristics of PSS and electrical damping characteristics with or without PSS are analyzed. The impact of phase compensation methods of PSS on subsynchronous signal is also studied. The results show that the speed-based PSS with lag compensation and inverting almost has no effect on SSO. This kind of PSS can use the ideal speed deviation as the input signal, and avoid the torsional sensitivity. It can also suppress the low frequency oscillation effectively. This kind of PSS is feasible.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2011AA05A301).

Key words: subsynchronous oscillation; power system stabilizer; input signal; phase compensation; damping

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)12-0001-07

0 引言

电力系统稳定器 (Power System Stabilizer, PSS) 能在低频段提供正阻尼, 有效抑制电力系统低频振荡, 被广泛采用^[1-5]。随着 PSS 的应用越来越广泛, PSS 对次同步振荡 (Subsynchronous Oscillation, SSO) 的影响也日益受到人们的关注^[6-11]。以往的研究普遍认为速度反馈型 PSS 对次同步振荡有负面影响, 而功率反馈型 PSS 对次同步振荡的影响很小^[7,10-11]。本文经过研究发现除了输入信号类型之外, PSS 的相位补偿方式也是影响次同步振荡的非常重要的因素。

文献[12]指出加拿大不列颠哥伦比亚水电局 (B. C. Hydro) 在开发和平河工程时, 曾试验了许多信号, 发现转速偏差 ($\Delta\omega$) 是最理想的 PSS 反馈信号。但在使用这个理想的 PSS 反馈信号 ($\Delta\omega$) 时, 也存在一些问题: 文献[13]和文献[14]指出以转速偏差 ($\Delta\omega$) 为输入信号时, 必须采用超前网络, 由于这种网络的高频段增益较大, 对噪音干扰和轴系扭振敏感, 应设置带阻滤波器 (扭转滤波器); 而文献[15]认为基于轴速度信号 ($\Delta\omega$) 的稳定器, 主要缺点为需要应用扭转滤波器, 在减弱稳定信号的扭转分量的同时, 滤波器也引入了一个在较低频率时的相位滞后。本文经过研究发现, 采用滞后补偿再反相的速度反馈型 PSS 既能利用理想的转速偏差作

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2011AA05A301)

为反馈信号，又能避免对轴系扭振敏感，对次同步振荡几乎没有影响，此外，该 PSS 仍能有效抑制低频振荡，具有可行性，对 PSS 的设计具有一定的指导意义。

1 仿真模型

1.1 输电系统模型

输电系统模型 1——普通交流系统：在 IEEE SSR 第一标准模型^[16]中去掉电容器。

输电系统模型 2——串补交流系统：选用 IEEE SSR 第一标准模型，串补度 (X_C / X_L) 设为 0.3。

系统接线图及参数如图 1 所示。图 1 中，HP 表示汽轮机高压缸，IP 表示汽轮机中压缸，LPA 表示汽轮机低压缸 A，LPB 表示汽轮机低压缸 B，GEN 表示发电机，EXC 表示励磁机。

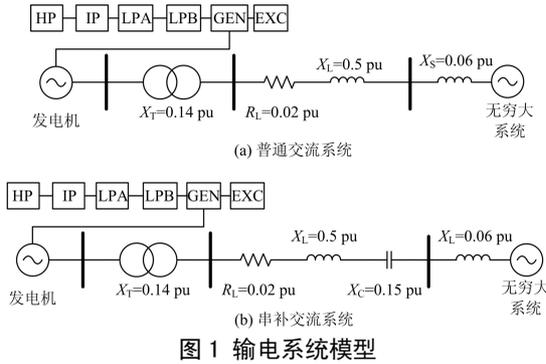


图 1 输电系统模型

Fig. 1 Transmission system model

1.2 励磁系统模型

本文选用 IEEE ST1A 型自并励励磁系统^[17]，如图 2 所示。图中，HV Gate 是高电位门（高通），LV Gate 是低电位门（低通），发电机励磁电流限值是由 I_{LR} 确定的。 U_C 表示发电机端电压， U_{REF} 表示发电机端电压参考值， E_{FD} 表示发电机的励磁电压， i_{fd} 表示发电机的励磁电流， u_{OEL} 表示过励限制信号。低励限制 (u_{UEL}) 可以由三个不同输入点选择一个，其他附加控制器的输出信号 (u_S) 可以在两个不同输入点中任选其一。励磁系统的主要参数如表 1 所示。

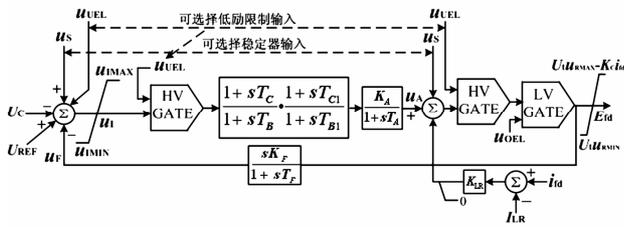


图 2 IEEE ST1A 型励磁系统模型

Fig. 2 Model of IEEE ST1A excitation system

表 1 IEEE ST1A 型励磁系统参数

Table 1 Parameters of IEEE ST1A excitation system

参数	值	参数	值
K_A	60	U_{RMAX}	6.43
T_A	0.01	U_{RMIN}	-6.0
T_C	1.0	K_C	0.038
T_B	1.0	K_F	0
$T_{C1}=T_{B1}$	0	T_F	0
K_{LR}	4.54	I_{LR}	4.4

1.3 PSS 模型

单通道 PSS 的典型结构如图 3 所示，图中，输入信号可选择发电机转速偏差 ($\Delta\omega$) 或者发电机输出的电磁功率偏差 ($-\Delta P_e$)，隔直环节时间常数 T_W 取 7 s，限幅环节的取值为 ± 0.05 pu，相位补偿环节可采用 1~3 个超前-滞后环节，即 $N=1, 2, 3$ 。如果在频率 ω_x 处需要补偿的角度为 ϕ ，则相位补偿环节的时间常数 T_1 与 T_2 可通过公式 (1) 计算。

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

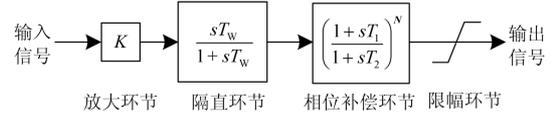


图 3 PSS 模型

Fig. 3 Power system stabilizer model

2 PSS 原理及参数设计

2.1 PSS 原理

PSS 的原理可用图 4 所示的转矩矢量图来解释：当发电机电磁转矩偏差 ΔT_{e0} 位于第三、四象限时， ΔT_{e0} 在 $\Delta\omega$ 轴上的投影为负，也就是阻尼转矩为负，可能导致系统不稳定。PSS 若能提供适当的正阻尼转矩，最好是与 $\Delta\omega$ 同相位的纯粹的正阻尼转矩 ΔT_{e1} ，使得 ΔT_{e0} 与 ΔT_{e1} 的合成转矩 ΔT_{e2} 位于第一象限，那么对应的阻尼转矩分量为正，有利于抑制振荡，提高系统稳定性^[14, 18]。

2.2 待补偿相位分析

发电机采用单缸体模型，在电压调节器 (Automatic Voltage Regulator, AVR) 的附加输入信

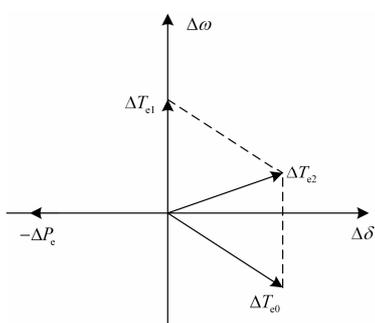


图4 转矩矢量图

Fig. 4 Vector diagram of torques

号端加入一系列幅值很小的正弦扰动信号 ΔU_s ，待系统仿真至稳态后，在公共周期内对 ΔT_e 和 ΔU_s 进行傅立叶分解，得到 ΔT_e 与 ΔU_s 的相位差，如图 5 所示，可见，两个系统在低频段的相位特性非常接近，所以两个系统中加入的 PSS 可选用相同的参数。

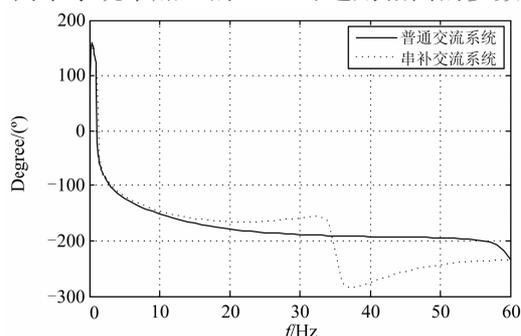


图5 两个系统的相位特性

Fig. 5 Phase characteristic of two systems

设当选用转速偏差 $\Delta\omega$ 作为 PSS 的输入信号时，若不进行相位补偿，PSS 提供的附加转矩为 ΔT_{ew} ，如图 6 所示，传统的 PSS 设计方案：超前补偿 ϕ_x 使得 PSS 提供的附加转矩与 $\Delta\omega$ 同相位；本文提出了一种新的 PSS 设计方案：滞后补偿 ϕ_z (ϕ_z 与 ϕ_x 互补) 再反相，同样可以使得 PSS 提供的附加转矩与 $\Delta\omega$ 同相位。设当选用电磁功率偏差 $-\Delta P_e$ 作为 PSS 的输入信号时，若不进行相位补偿，PSS 提供的附加转矩为 ΔT_{ep} ，如图 6 所示，那么滞后补偿 ϕ_y (ϕ_y 与 ϕ_x 互余) 即可使得 PSS 提供的附加转矩与 $\Delta\omega$ 同相位。

2.3 PSS 参数设计

根据图 5 所示的两个系统的相位特性，设计 PSS 参数。

速度反馈型 PSS：在 1.5 Hz 处用 1 个超前环节补偿 57° ，称为 PSS-w1；用 2 个超前环节，每个补偿 28.5° ，称为 PSS-w2；用 3 个滞后环节，每个补偿 41° ，再反相，称为 PSS-w3。

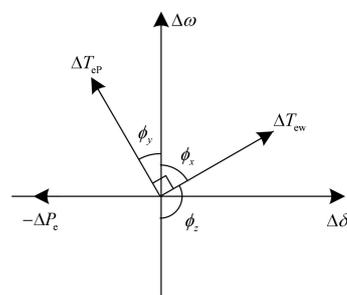


图6 待补偿相位与附加转矩矢量图

Fig. 6 The needed compensation phase and vector diagram of supplementary torques

功率反馈型 PSS：在 1.5 Hz 处用 1 个滞后环节补偿 33° ，称为 PSS-P。

按照上述设计方案得到的 PSS 参数如表 2 所示。

表2 PSS 参数

Table 2 Parameters of PSS

	输入信号	T1 /s	T2/s	K	N
PSS-w1	$\Delta\omega$	0.358 2	0.031 4	6	1
PSS-w2	$\Delta\omega$	0.178 3	0.063 1	8	2
PSS-w3	$\Delta\omega$	0.048 4	0.232 8	-45	3
PSS-P	$-\Delta P_e$	0.057 6	0.195 4	2	1

由于功率反馈型 PSS 通常都采用滞后补偿，而且滞后补偿环节的低通特性有利于减小 PSS 对次同步频段的影响，所以本文不再对比其他类型的功率反馈型 PSS。

3 PSS 相位补偿方式对次同步振荡的影响分析

3.1 PSS 的频率特性分析

三种速度反馈型 PSS 的频率特性如图 7 所示，其中，两种超前补偿型速度反馈 PSS (PSS-w1 和 PSS-w2) 的频率特性差别不大，均呈现高通特性，会放大次同步频段的信号，而这两种 PSS 对次同步频段的相位补偿都很小，由此推断其对次同步振荡会产生负面影响。滞后补偿型速度反馈 PSS (PSS-w3) 呈现低通特性，使次同步频段的信号大幅衰减，由此推断其对次同步振荡的影响会很小。功率反馈型 PSS (PSS-P) 的频率特性如图 8 所示，也呈现低通特性，但由于其仅采用了一阶滞后补偿，对次同步频段的信号衰减不大，由此推断其对次同步振荡的影响介于超前补偿型速度反馈 PSS (PSS-w1 和 PSS-w2) 与滞后补偿型速度反馈 PSS (PSS-w3) 之间。

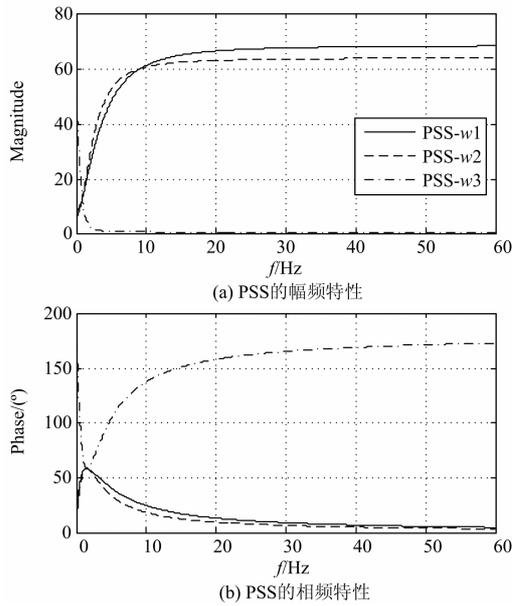


图 7 三种速度反馈型 PSS 的频率特性

Fig. 7 Frequency characteristic of speed-based PSS

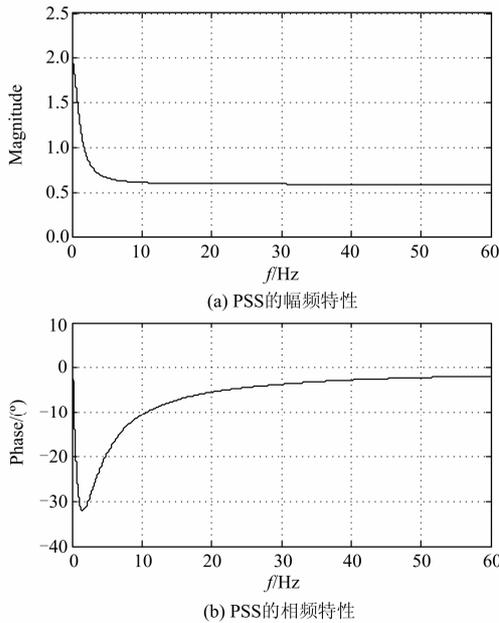


图 8 功率反馈型 PSS 的频率特性

Fig. 8 Frequency characteristic of power-based PSS

3.2 PSS 相位补偿方式对电气阻尼的影响分析

对于图 1 (b) 所示的串补输电系统, 利用测试信号法^[19]得到加入不同类型的 PSS 前后系统的电气阻尼特性曲线, 如图 9 所示。可见, (1) 两种超前补偿型速度反馈 PSS (PSS-w1 和 PSS-w2) 使系统的负阻尼区域明显扩大, 并且在谐振点处的阻尼也明显减弱, 不利于次同步振荡; (2) 采用一级超前补偿与采用两级超前补偿对系统阻尼特性影响不

大, 在谐振点处, 采用一级超前补偿的 PSS-w1 比采用两级超前补偿的 PSS-w2 对应的系统阻尼稍弱一些; (3) 在次同步频段, 滞后补偿型速度反馈 PSS (PSS-w3) 与无 PSS 时的系统阻尼曲线几乎重合, 也就是说滞后补偿型速度反馈 PSS 对次同步振荡几乎没有影响, 此外, 在低频段也能提供足够的正阻尼; (4) 功率反馈型 PSS 对次同步频段阻尼特性的影响介于超前补偿型速度反馈 PSS 和滞后补偿型速度反馈 PSS 之间。

上述分析结果验证了 3.1 中的推断。

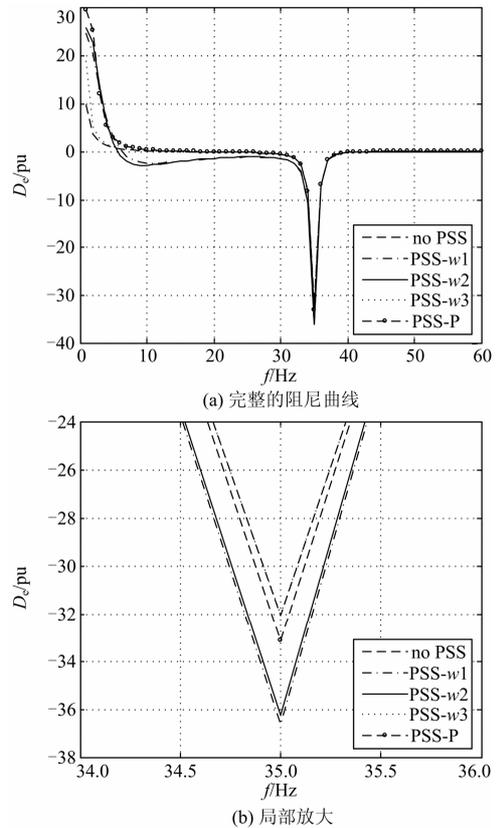


图 9 系统的电气阻尼特性曲线

Fig. 9 Electrical damping curve of the power system

3.3 PSS 相位补偿方式对次同步频段信号的影响分析

为了验证不同相位补偿方式对次同步频段信号的影响, 在图 1 (b) 所示的系统中, 分别投入四种 PSS, 仿真至同一时刻, 对 PSS 的输出信号进行傅立叶分解。两种超前补偿型速度反馈 PSS (PSS-w1 和 PSS-w2) 的傅立叶分解结果差别很小, 这里给出 PSS-w1 输出信号的傅立叶分解结果, 如图 10 (a) 所示, 可见, PSS-w1 的输出信号中除了含有低频段信号外, 还含有幅值较大的次同步频段信号, 将对次同步振荡产生较大的负面影响。由图 10 (b) 可见, 滞后补偿型速度反馈 PSS (PSS-w3) 的输出信

号中, 次同步频段信号的幅值很小, 以频率为 16 Hz 的分量为例, 仅为 PSS-w1 输出信号中 16 Hz 分量的 $\frac{1}{260}$, 其对次同步振荡的影响很小。由图 10 (c) 可见, 由于采用了一级滞后补偿, 功率反馈型 PSS (PSS-P) 的输出信号中, 次同步频段信号的幅值也比较小, 以频率为 16 Hz 的分量为例, 仅为 PSS-w1 输出信号中 16 Hz 分量的 $\frac{1}{10.7}$, 对次同步振荡影响介于超前补偿型速度反馈 PSS 和滞后补偿型速度反馈 PSS 之间。

上述分析结果再次验证了 3.1 中的推断。

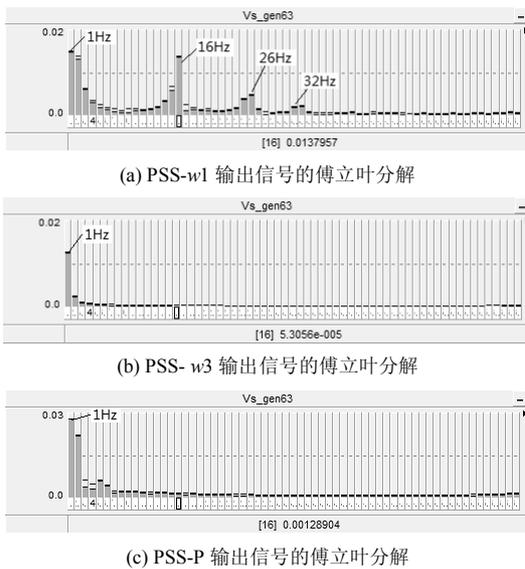


图 10 PSS 输出信号的傅立叶分解

Fig. 10 Fourier decomposition of PSS's output signal

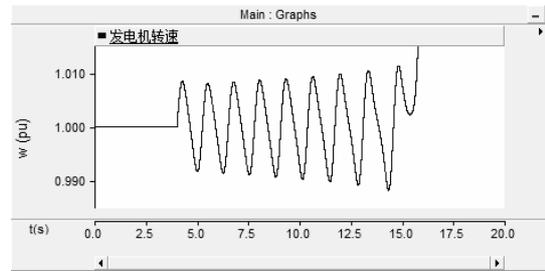
4 滞后补偿再反相的速度反馈型 PSS 的可行性

4.1 对低频振荡的抑制效果

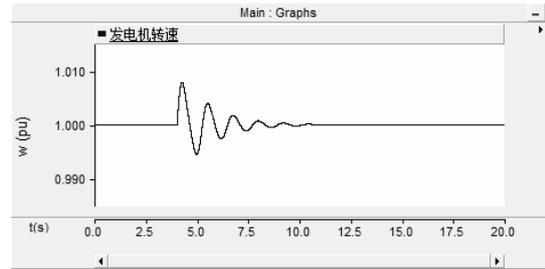
在图 1 (a) 所示的普通交流系统中, 将线路延长 30%, 即: 将线路电感值增加至 0.65 pu, 无 PSS 时系统振荡失稳, 发电机转速曲线如图 11 (a) 所示。投入 PSS 后, 系统很快稳定下来, 发电机转速曲线如图 11 (b)、11 (c)、11 (d)、11 (e) 所示。可见, 所设计的 PSS 均能有效抑制低频振荡, 而且抑制效果非常接近, 在此基础上对比 PSS 对次同步振荡的影响是合理的。

4.2 硬件实现的可能性

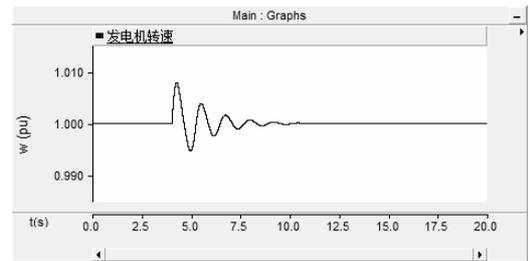
目前, 我国大中型发电机组均采用微机式励磁控制系统, PSS 已设置在微机程序中, 不需要另外单独的硬件装置, 修改 PSS 结构及参数很方便。将



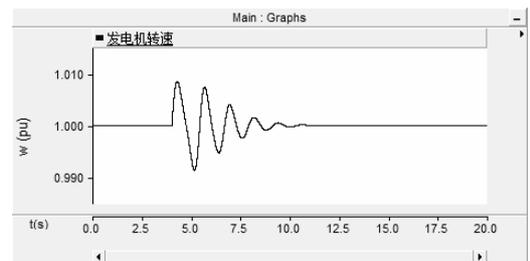
(a) 无 PSS



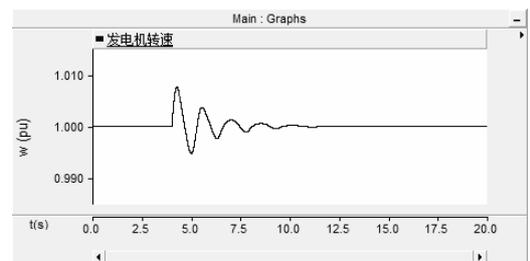
(b) 投入 PSS-w1



(c) 投入 PSS-w2



(d) 投入 PSS-w3



(e) 投入 PSS-P

图 11 投入 PSS 前后发电机的转速曲线

Fig. 11 Generator speed curve with or without PSS

超前补偿型速度反馈 PSS 改为滞后补偿再反相的速度反馈 PSS 可能使相位补偿环节的阶数增加 1 至 2 阶, 但省去了扭转滤波器, 而扭转滤波器的阶数至

少为 2 阶^[14, 17], 所以 PSS 的总阶数没有增加, 甚至还可能减小, 不会造成控制器时延增加。在现有的微机励磁控制系统中, 完全有可能采用滞后补偿再反相的速度反馈型 PSS。

4.3 参数设计的难易度

根据图 6 所示的原理, 利用公式 (1) 即可计算出 PSS 相位补偿环节的时间常数, 其他参数的设计方法与传统 PSS 一样, 没有增大参数设计难度。

5 结论

本文设计了四种不同类型的 PSS: 采用一级超前补偿的速度反馈型 PSS, 采用两级超前补偿的速度反馈型 PSS, 采用滞后补偿再反相的速度反馈型 PSS, 采用滞后补偿的功率反馈型 PSS。通过分析各 PSS 的频率特性, 加入 PSS 前后系统的电气阻尼特性, PSS 相位补偿方式对次同步频段信号的影响, 以及滞后补偿再反相的速度反馈型 PSS 的可行性, 得到以下结论:

1) 除了输入信号类型之外, PSS 的相位补偿方式也是影响次同步振荡的非常重要的因素。

2) 滞后补偿再反相的速度反馈型 PSS 对次同步振荡几乎没有影响, 采用超前补偿的速度反馈型 PSS 对次同步振荡有明显的负面影响, 采用滞后补偿的功率反馈型 PSS 介于它们之间。

3) 滞后补偿再反相的速度反馈型 PSS 既能利用理想的转速偏差作为反馈信号, 又能避免对轴系扭振敏感, 对次同步振荡几乎没有影响, 此外, 该 PSS 仍能有效抑制低频振荡, 具有可行性, 对 PSS 的设计具有一定的指导意义。

参考文献

[1] 郭东杰, 王灵梅, 韩西贵, 等. 基于 PSS 和 SSSC 的风火打捆输电系统暂态稳定性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 61-65, 71.
 GUO Dong-jie, WANG Ling-mei, HAN Xi-gui, et al. Study on transient stability of wind & thermal power transmission system based on PSS and SSSC[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 61-65, 71.

[2] 张仰飞, 袁越, 陈小虎, 等. 有功型 PSS 抑制低频振荡机理及反调特性[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 77-80, 109.
 ZHANG Yang-fei, YUAN Yue, CHEN Xiao-hu, et al. Mechanism of active-power PSS low-frequency oscillation suppression and characteristic of anti-regulation[J]. Power System Protection and Control,

2010, 38(3): 77-80, 109.

[3] 智勇, 王官宏, 肖洋, 等. 750 kV 线路投运后甘肃电网动态稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 114-118.
 ZHI Yong, WANG Guan-hong, XIAO Yang, et al. Dynamic stability analysis of Gansu power grid after 750 kV lines was put into operation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 114-118.

[4] 吉平, 王克文, 谢志棠. 多运行方式下 PSS 参数优化算法的收敛特性改善[J]. 电工技术学报, 2009, 24(3): 171-177.
 JI Ping, WANG Ke-wen, TSE Chi-tong. Improvement of convergence property in the PSS parameter optimization under multiple system operating conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(3): 171-177.

[5] 郑希云, 李兴源, 王渝红. 基于混沌优化算法的 PSS 和直流调制的协调优化[J]. 电工技术学报, 2010, 25(5): 170-175.
 ZHENG Xi-yun, LI Xing-yuan, WANG Yu-hong. Coordination and optimization of PSS and HVDC modulations using chaotic optimization algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(5): 170-175.

[6] 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): 130-136.
 WU Jun-yong, CHENG Shi-jie, CHEN De-shu. The effects of power system stabilizers on the shaft torsional vibration of large turboalternators[J]. J Huazhong Univ of Sci & Tech, 1993, 21(1): 130-136.

[7] 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.

[8] 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 Guan-yi. Parameter optimization of

- PSS of parallel configuration used to damp subsynchronous resonance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(10): 122-127.
- [9] 刘世宇, 谢小荣, 张东辉, 等. 附加励磁阻尼控制对励磁系统常规功能的影响[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 6-9, 62.
- LIU Shi-yu, XIE Xiao-rong, ZHANG Dong-hui, et al. Influence of supplementary excitation damping control on regular functions of excitation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 6-9, 62.
- [10] 汤凡, 刘天琪, 李兴源. 电力系统稳定器及附加励磁阻尼控制器对次同步谐振的影响[J]. 电网技术, 2010, 34(8): 36-40.
- TANG Fan, LIU Tian-qi, LI Xing-yuan. Influence of power system stabilizer and supplementary excitation damping controller on sub-synchronous resonance[J]. Power System Technology, 2010, 34(8): 36-40.
- [11] 吴熙, 蒋平, 胡弢. 电力系统稳定器对次同步振荡的影响及其机制研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 56-63.
- WU Xi, JIANG Ping, HU Tao. Impact of power system stabilizer on subsynchronous oscillation and its mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 56-63.
- [12] SHIER R M, BLYTHE A L. Field tests of dynamic stability using a stabilizing signal and computer program verification[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1968, 87(2): 315-322.
- [13] 马大强. 电力系统机电暂态过程[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.
- [14] 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.
- [15] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [16] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group. First benchmark model for computer simulation of subsynchronous resonance[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1977, 96(5): 1565-1572.
- [17] IEEE Std 421.5-1992 IEEE recommended practice for excitation system models for power system stability studies[S].
- [18] 方思立, 朱方. 电力系统稳定器的原理及其应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1996.
- [19] 徐政. 复转矩系数法的适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.

收稿日期: 2013-09-08

作者简介:

杨琳(1978-), 女, 讲师, 主要研究方向为电力系统低频振荡、次同步振荡等; E-mail: yanglin@ncepu.edu.cn

肖湘宁(1953-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用、电能质量、电力系统次同步振荡等。