

多频段 PSS 结构设计和参数协调

邱磊¹, 王克文¹, 李奎奎¹, 孙瑞华²

(1. 郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南省电力公司平顶山供电公司, 河南 平顶山 467001)

摘要: 为了在提高 PSS 对振荡模式选择性的同时, 改善传统多频段电力系统稳定器 (PSS) 结构复杂、频段数固定的问题, 提出了一种新型的功率输入型多频段 PSS, 并对 PSS 的结构进行了频率特性分析。在系统多运行方式下, 使用概率灵敏度分析法进行分析, 确定 PSS 的频段个数; 进而根据该 PSS 参数设计方法, 利用非线性规划技术对参数进行协调优化。在一 8 机系统内进行了验证, 表明该 PSS 可以根据具体需要确定补偿频段数, 既可作为单频段 PSS 仅提高某一个模式的阻尼比, 也可作为多频段 PSS 同时兼顾多个振荡模式。

关键词: 电力系统稳定器 (PSS); 多频段; 振荡模式; 概率灵敏度; 参数协调

Construction design and parameter coordination of multi-band PSS

QIU Lei¹, WANG Ke-wen¹, LI Kui-kui¹, SUN Rui-hua²

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Pingdingshan Power Supply Company, Electric Power of Henan, Pingdingshan 467001, China)

Abstract: In order to improve the PSS selectivity of oscillation modes, and overcome the shortcomings of conventional multi-band power system stabilizer (MBPSS) that the construction is complex and the number of the compensation bands is fixed, a novel power-input MBPSS is proposed. The frequency characters of the PSS are analyzed. Under multi-operating conditions, probabilistic sensitivity analysis is used to decide the number of the PSS band. According to the PSS parameter design method, parameters are coordinated by using the nonlinear programming technique. In a eight-machine system, it shows that the PSS can determine the compensated band numbers according to specific conditions and can be applied as a single-band PSS to increase only one mode damping ratio, or as a multi-band PSS which improves the damping performance of more than two modes.

Key words: power system stabilizer (PSS); multi-band; oscillation mode; probabilistic sensitivity; parameter coordination

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)05-0102-06

0 引言

电力系统稳定器 (Power System Stabilizer, PSS) 广泛应用于抑制电力系统低频振荡。对于 PSS 的结构设计, 已有大量文献发表, 例如固定结构固定参数 PSS^[1-2]、自适应 PSS^[3]、人工智能 PSS^[4-5]。

随着电网规模的扩大和振荡模式个数的增多, 希望一台 PSS 能同时改善多个振荡模式的阻尼特性。对于单频段 PSS (Single Band PSS, SBPSS), 通过调整超前滞后环节时间常数, 可以获得更宽的补偿频段, 能够对更多的振荡模式产生作用。但是受限于单频段特性, 较宽的补偿频段可能在提高某些模式阻尼比的同时, 对另外的模式产生不利的影响。

为改善 PSS 对振荡模式的选择性, 有学者开始

对具有多频段结构的 PSS 展开研究^[6-9]。文献[6]使用相位补偿法, 依据加速功率在复平面上的位置, 确定 PSS 的有效补偿相位区间, 进而设计了一种双频段 PSS (Dual-Band PSS, DBPSS)。文献[7]提出了一种双输入多频段 PSS (Multi-Band PSS, MBPSS), 并在文献[8]中进行了频率响应特性和补偿效果的对比分析。文献[9]采用 MBPSS 控制方式, 分析了在故障情况下能量变换器的运行特性, 探讨了能量变换器阻尼绕组对多机系统的影响。但现有 MBPSS 往往结构复杂, 频段数固定, 使得应用的灵活性有所限制。

本文描述了一种多频段 PSS, 模型简单, 各频段结构相同; 可根据具体需要, 灵活确定频段数。使其既可以作为单频段 PSS 使用, 也可以作为多频段 PSS 同时改善多个模式的阻尼特性。进而利用非

线性规划方法^[9]进行多机系统多运行方式下的 PSS 参数优化。最后在一 8 机系统上进行了分析验证。

1 多频段 PSS 结构选择

1.1 结构

本文通过分析已有 MBPSS 的特点^[6-9], 采用如图 1 所示的功率输入型结构图。虚线部分表示可以根据实际需要扩展频段。 K 为 PSS 的主增益, K_A 、 K_B 和 K_N 为各频段增益, T_A 、 T_B 、 T_N 为各频段的时间常数, T_W 是隔直环节时间常数。

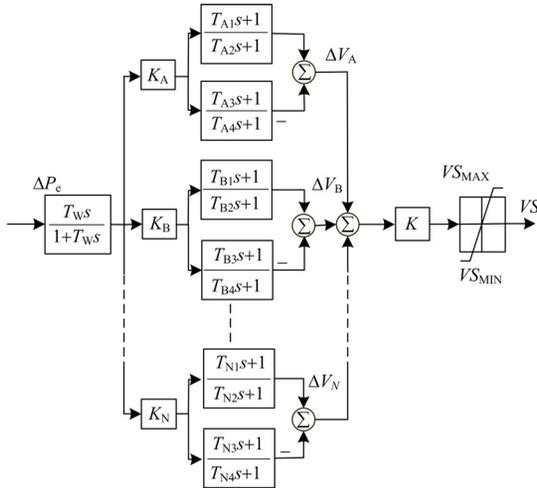


图 1 多频段 PSS 结构
Fig.1 Construction of the MBPSS

从图 1 中可以看出, 该 PSS 具有结构明确、环节简单的特点。其中各频段结构相同, 仅参数值不同。因此可以根据具体需要, 灵活选择频段数, 并调整频段增益和时间常数得到希望的频段特性。

1.2 时间常数的确定

T_W 一般取 3~10 s^[1], 本文取 5 s。以 A 频段为例, 时间常数按下式确定^[7-8], 其他频段类似。

$$T_{A2} = T_{A3} = \frac{1}{2\pi f_A \sqrt{R_A}} = \frac{1}{\omega_A \sqrt{R_A}} \quad (1)$$

$$T_{A1} = \frac{T_{A2}}{R_A} \quad (2)$$

$$T_{A4} = T_{A2} R_A \quad (3)$$

其中: ω_A 为 A 频段中心角频率; $f_A = \omega_A / 2\pi$; R_A 为 A 频段的补偿系数。

1.3 频率响应分析

为分析不同频段组合方式下 PSS 的补偿特性, 考虑三个补偿频段, 分别称为低频段、中频段和高频段, 并分别用下标 L、M、H 描述。取 $K_L = K_M = K_H = 1$, $R_L = R_M = R_H = 1.2$, $\omega_L = 0.3$, $\omega_M = 4.5$, $\omega_H = 50$, $K = 1$ 。PSS₁ 为 SBPSS, 只有

中频段结构, PSS₂ 为高、低频段组合的 DBPSS, PSS₃ 具有三个频段。其频率响应如图 2 所示。

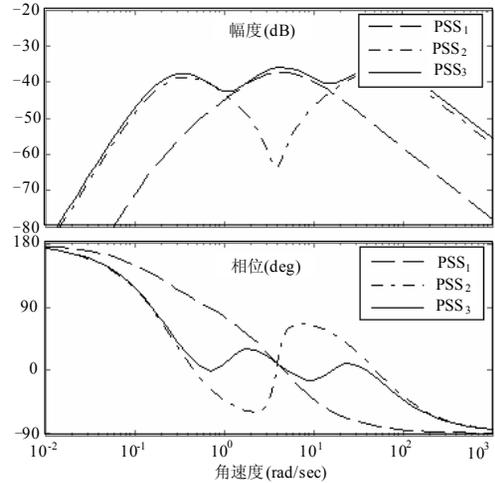


图 2 PSS 的频率响应曲线
Fig.2 Frequency response curves of PSS

由幅频响应可以看出, PSS₁ 在整个频域内有一条通带, 且在中频段的中心角频率处幅值最大, 频段宽度相对较窄。PSS₂ 有两段式的带通形状, 最大幅值位于高频段和低频段的中心角频率处, 频段宽度为两个频段宽度之和。PSS₃ 形成三段的带通形状, 可以认为是三个频段输出的叠加。由相频响应可知, 不同频段组合方式的 PSS, 其补偿相位不同。

PSS 结构确定后, 改变频段增益, 能够调节总的增益、补偿相位和频段宽度; 改变频段的补偿系数 R , 也能调节频率响应的幅值和相位。当 PSS 采用三频段结构, 保持 $\omega_L = 0.3$, $\omega_M = 4.5$, $\omega_H = 50$, $K = 1$ 不变, 其他参数值如表 1 所示, 则相应的频率响应如图 3。

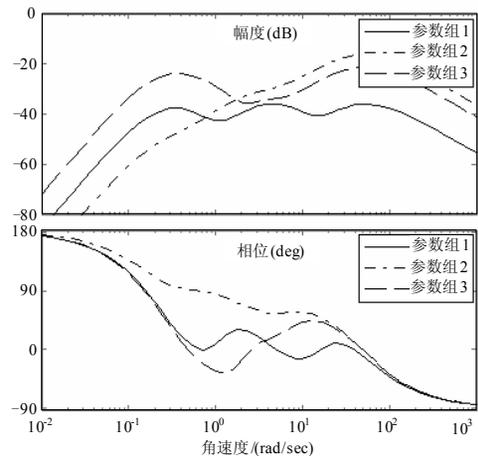


图 3 不同参数 PSS 的频率响应曲线
Fig.3 Frequency response curves with different PSS settings

表 1 PSS 参数设置

Tab.1 Parameter settings of PSS

参数组	K_L	K_M	K_H	R_L	R_M	R_H
1	1	1	1	1.2	1.2	1.2
2	0.1	1	10	1.2	1.2	1.2
3	1	1	1	0.8	1.2	1.5

经过以上分析可知，确定 PSS 的频段数，并同时主增益、各频段的增益、中心角频率和补偿系数这四组参数进行调节，可以使 PSS 满足系统补偿宽度、总增益和相位上的需要。

2 概率环境下 PSS 的选址和参数优化

2.1 特征根的概率描述

对特征根 $\lambda_n = \alpha_n + j\beta_n$ ，其阻尼比 ξ_n 为式 (4)

$$\xi_n = -\alpha_n / \sqrt{\alpha_n^2 + \beta_n^2} \quad (4)$$

在多系统运行方式下，可以认为节点功率、节点电压和特征根都是随机变量，因此特征根的特性可以用相应的数字特征（例如均值和方差）来描述。在正态分布假定下，实部 α_n 具有均值 $\bar{\alpha}_n$ 和标准差 σ_{α_n} ，则实部 α_n 分布在 $\{\bar{\alpha}_n - 4\sigma_{\alpha_n}, \bar{\alpha}_n + 4\sigma_{\alpha_n}\}$ 范围内的概率为 0.999 93，非常接近于 1。可接受的 σ_{α_n} 系数值可以是 3~4^[10-11]，本文取 4。为了保证系统的稳定性，所有特征根实部的分布密度函数曲线应位于复平面左半侧，曲线的右界可用扩展阻尼系数来表示^[10]。

$$\alpha_n' = \bar{\alpha}_n + 4\sigma_{\alpha_n} \leq \alpha_c \quad (5)$$

同理，可用阻尼比 ξ_n 的均值 $\bar{\xi}_n$ 和标准差 σ_{ξ_n} 来表示扩展阻尼比^[10]。

$$\xi_n' = \bar{\xi}_n - 4\sigma_{\xi_n} \geq \xi_c \quad (6)$$

式中： α_c 、 ξ_c 为门限值，考虑到系统稳定裕度和动态特性，本文取 $\alpha_c = -0.05$ ， $\xi_c = 0.1$ 。式 (5)、(6) 可以用标准化均值来描述^[2]。

$$\alpha_n^* = \frac{-(\bar{\alpha}_n - \alpha_c)}{\sigma_{\alpha_n}} \geq 4 \quad (7)$$

$$\xi_n^* = \frac{(\bar{\xi}_n - \xi_c)}{\sigma_{\xi_n}} \geq 4 \quad (8)$$

2.2 PSS 选址

概率灵敏度指标 (Probabilistic Sensitivity Index, PSI) 如式 (9)、(10) 所示，可以用来确定 PSS 的最佳安装位置^[10]，同时确定 PSS 的频段数。

$$PSI_{\alpha_n', m} = \frac{\partial \alpha_n'}{\partial K_m} \quad (9)$$

$$PSI_{\xi_n', m} = \frac{\partial \xi_n'}{\partial K_m} \quad (10)$$

式中， K_m 为第 m 个 PSS 的主增益。

2.3 PSS 的参数优化

应用非线性规划法优化 PSS 参数时的目标函数可以表达为式 (11)^[2]。

$$\text{Minimize } F(U) = \sum_{\alpha_n^* < 4} (\alpha_n^* - 4)^2 + \sum_{\xi_n^* < 4} (\xi_n^* - 4)^2 \quad (11)$$

式中， U 为 PSS 可调参数向量，约束条件为控制参数的实际运行限制。

根据前文可知 PSS 的可调参数为主增益、各频段的增益、中心角频率和补偿系数这四组参数。

本文对目标函数进行优化时，采用下述方法：每个频段中心角频率和增益采用经验值，固定不可调，根据灵敏度分析确定 PSS 由哪几个频段组成，使用负梯度法对目标函数求解，协调优化 PSS 总增益和各频段补偿系数。

这样，仅两组待调参数，保证了优化速度，同时根据灵敏度确定的频段结构可以提供合适的补偿频段宽度。

3 算例分析

在一 8 机 24 节点系统^[10,12]上进行试算，系统如图 4 所示。

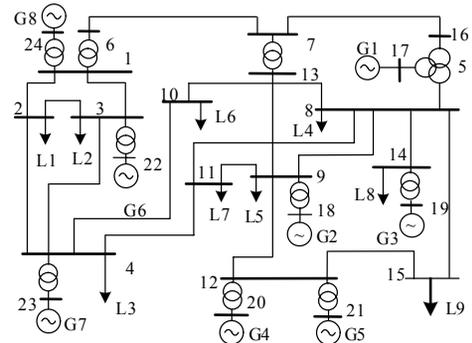


图 4 8 机系统

Fig.4 8-machine system

所有发电机均采用六阶模型，从各节点功率和 PV 电压的运行曲线生成 720 个运行样本模拟系统的多运行方式^[10]。在安装 PSS 前，系统有 88 个特征根，其中 7 个机电振荡模式及其概率指标列于表 2，均不满足概率稳定要求。以下各表中关键数据加黑表示。

3.1 确定 PSS 安装位置和频段数

本系统内安装的 PSS 最多具有三频段结构。三个频段的固定参数 $\omega_L = 0.3$ ， $\omega_M = 4.5$ ， $\omega_H = 50$ ， K_L 、 K_M 、 K_H 分别为 1、5 和 25，补偿系数初值

$$R_L = R_M = R_H = 1.2^{[7-8]}。$$

表 2 无 PSS 时系统的机电振荡模式

Tab.2 Electromechanical damping modes without PSS

模式号	No.	$\bar{\alpha}$	$\bar{\beta}$	σ_α	α^*	P_α	$\bar{\xi}$	σ_ξ	ξ^*	P_ξ
1	51	-1.731	15.854	0.043 9	38.33	1.000 0	0.108 5	0.003 3	2.57	0.994 9
2	55	-0.757	11.113	0.082 7	8.55	1.000 0	0.068 0	0.007 2	-4.46	0.000 0
3	69	-0.565	9.840	0.049 1	10.48	1.000 0	0.057 3	0.003 7	-11.44	0.000 0
4	61	-0.637	7.908	0.017 2	34.18	1.000 0	0.080 3	0.003 6	-5.55	0.000 0
5	59	-0.650	7.530	0.098 5	6.09	1.000 0	0.086 0	0.011 2	-1.26	0.105 7
6	75	-0.421	6.482	0.030 6	12.11	1.000 0	0.064 7	0.004 7	-7.50	0.000 0
7	88	-0.010	3.823	0.011 7	-3.43	0.000 3	0.002 6	0.003 0	-31.96	0.000 0

注: No.为特征根编号; P_α 以及 P_ξ 分别是特征根实部和阻尼比的稳定概率

根据式(9)、(10)计算所得各机电振荡模式的 PSI 如表 3 所示。依据 PSI 的数值大小和正负号可知: PSS 安装在 G1 上仅有效改善振荡模式 1, 因此可采用单频段结构; 安装在 G3 上能够同时改善模

式 5、7, 可采用双频段结构; 安装在 G4、G5 能兼顾三个相同的振荡模式, 本文选择在 G4 上安装三频段 PSS; 由表 2 最后一行数据可知模式 7 最不稳定, 因此 G8 上再安装一台单频段 PSS。

表 3 振荡模式的概率灵敏度指标

Tab.3 Probabilistic sensitivity indices of damping modes

模式	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8
ξ_1'	0.017 7	-0.000 0	-0.000 2	-0.000 0	-0.000 0	0.000 0	-0.000 0	0.000 0
ξ_2'	0.000 2	0.045 0	-0.000 0	0.000 0	-0.000 2	0.008 7	0.000 3	0.000 0
ξ_3'	0.000 1	-0.000 7	0.000 2	-0.000 0	-0.000 0	0.092 3	0.001 2	0.000 6
ξ_4'	0.000 0	0.000 0	0.000 5	-0.011 8	-0.010 5	0.000 0	0.000 0	0.000 0
ξ_5'	-0.000 1	-0.000 3	-0.065 7	-0.001 6	-0.002 3	-0.000 4	0.000 7	0.000 0
ξ_6'	0.000 2	0.000 1	-0.003 3	-0.009 0	-0.004 1	0.001 0	-0.014 5	-0.000 2
α_7'	0.022 5	0.024 7	0.100 7	0.037 8	0.018 3	0.028 3	0.132 1	0.168 1
ξ_7'	-0.005 9	-0.006 4	-0.026 3	-0.009 9	-0.004 8	-0.007 2	-0.034 5	-0.044 2

注: α' 和 ξ' 与式(9)、(10)中同义

最终确定: 安装在 G1、G2、G6 和 G8 上的 PSS 都采用仅有中频段的单频段结构; 安装中频段和高频段组合结构的 DBPSS 在 G2 和 G7 上; 安装在 G4 上的采用完整的三频段结构。

3.2 确定 PSS 主增益初值

对安装在 G4 上的 PSS, 应用根轨迹法^[12-13]考察其在概率情况下, 主增益的改变对模式 4、6、7 稳定性的影响, 如表 4 所列。

由表 4 可知, 开始时三个振荡模式随着主增益的改变更加趋于稳定, 但是当主增益改变至 -11 时有的模式的稳定性开始变坏, 当增益进一步变化时, 更多的指标开始变得恶劣。考虑到与安装在其他发电机上的 PSS 之间的参数相协调, 选定初值 $K_4 = -18$ 。

类似地, 其他 PSS 的主增益初值确定为:

$$K_1 = 2 \quad K_2 = 10 \quad K_3 = -4 \quad K_4 = -18$$

$$K_6 = 4 \quad K_7 = -4 \quad K_8 = -30 \quad (13)$$

表 4 振荡模式 4、6 和 7 标准化均值的根轨迹

Tab.4 Root loci of the standardized expectations of mode 4, 6 and 7

K	α_4^*	ξ_4^*	α_6^*	ξ_6^*	α_7^*	ξ_7^*
-1	38.47	-2.20	12.86	-6.47	-3.01	-29.11
-3	37.02	3.08	14.31	-4.47	-1.16	-20.27
-7	35.02	9.75	17.69	-1.13	5.55	-12.85
-11	39.37	16.22	25.51	0.94	5.29	-8.63
-18	41.73	46.37	36.61	-0.95	4.59	-3.25
-25	62.32	57.43	30.59	-3.16	4.08	-0.82
-35	91.97	106.44	24.99	-4.34	4.43	-0.50

3.3 优化结果

确定各 PSS 主增益优化初值后, 经过非线性规划程序计算, 共 117 个特征根全部概率稳定。

优化结果列于表 5, 优化后所有 PSS 的时间常

数见表6, 振荡模式的概率指标见表7。比较表7与 荡模式的阻尼比都明显提高且概率稳定。表2内容, 可以看出本系统在安装 PSS 之后所有振

表5 优化结果

Tab.5 Results after optimization

	PSS ₁	PSS ₂	PSS ₃	PSS ₄	PSS ₆	PSS ₇	PSS ₈
K	1.999	10.018	-4.152	-18.997	4.148	-3.922	-29.991
R_L	—	—	—	1.207	—	—	—
R_M	1.190	1.198	1.287	1.238	1.194	1.176	1.123
R_H	—	—	1.231	1.133	—	1.138	—

表6 优化后的 PSS 时间常数

Tab.6 PSS time constants after optimization

	T_{L1}	T_{L2}	T_{L4}	T_{M1}	T_{M2}	T_{M4}	T_{H1}	T_{H2}	T_{H4}
PSS ₁	—	—	—	0.171 1	0.203 7	0.242 5	—	—	—
PSS ₂	—	—	—	0.169 5	0.203 1	0.243 2	—	—	—
PSS ₃	—	—	—	0.152 2	0.195 9	0.252 1	0.014 7	0.018 0	0.022 2
PSS ₄	2.512 5	3.033 6	3.662 7	0.161 3	0.199 7	0.247 3	0.016 6	0.018 8	0.021 3
PSS ₆	—	—	—	0.170 3	0.203 4	0.242 9	—	—	—
PSS ₇	—	—	—	0.174 2	0.204 9	0.241 0	0.016 5	0.018 8	0.021 4
PSS ₈	—	—	—	0.186 7	0.209 7	0.235 5	—	—	—

$T_W = 5$ s

表7 优化后的振荡模式

Tab.7 Damping modes after optimization

模式	No.	$\bar{\alpha}$	$\bar{\beta}$	σ_α	α^*	P_α	$\bar{\xi}$	σ_ξ	ξ^*	P_ξ
1	66	-1.942	16.021	0.060 9	31.06	1.000 0	0.120 4	0.004 5	4.53	1.000 0
2	77	-1.497	11.276	0.055 7	25.99	1.000 0	0.131 6	0.005 5	5.75	1.000 0
3	79	-1.299	9.898	0.091 3	13.68	1.000 0	0.130 1	0.006 4	4.70	1.000 0
4	85	-0.748	6.873	0.012 1	57.78	1.000 0	0.108 2	0.002 0	4.06	1.000 0
5	81	-1.055	4.205	0.166 6	6.03	1.000 0	0.243 4	0.035 2	4.08	1.000 0
6	75	-1.533	2.943	0.221 9	6.68	1.000 0	0.461 9	0.090 1	4.02	1.000 0
7	70	-1.892	2.061	0.060 1	30.65	1.000 0	0.676 2	0.020 2	28.52	1.000 0

3.4 结果对比

本文设置的实部门槛值较高, $\alpha_c = -0.05$, 小于文献[6, 10]中选取 $\alpha_c = 0$, 故稳定裕度相对较大。

以安装 PSS 前最不稳定的模式 7 为例, 装设 MBPSS、传统 PSS (Conventional PSS, CPSS) 与 DBPSS 后, 各项概率指标如表 8 所示。

表8 安装不同 PSS 的模式 7

Tab.8 Mode 7 with different PSSs

PSS	$\bar{\alpha}$	$\bar{\beta}$	σ_α	α^*	$\bar{\xi}$	σ_ξ	ξ^*
MBPSS	-1.892	2.061	0.060 1	30.65	0.676 2	0.020 2	28.52
DBPSS	-1.70	4.21	0.266	6.39	0.374 7	0.051 6	5.32
CPSS	-0.964	4.73	0.079 4	12.14	0.199 5	0.018 9	5.28

在正态分布假定下, 模式 7 的实部和阻尼比概率密度函数 (Probabilistic Density Function, PDF)

曲线如图 5 所示。

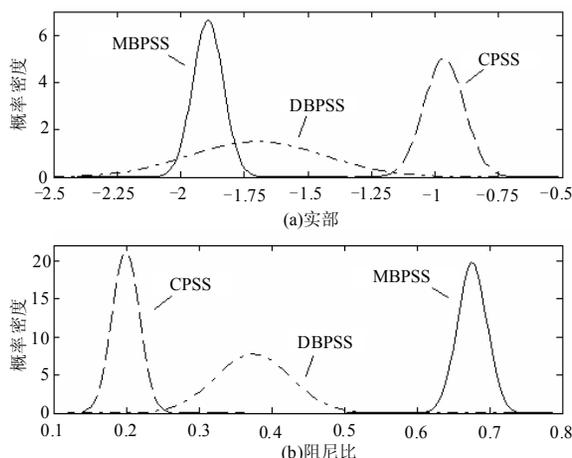


图5 安装不同 PSS 后模式 7 的 PDF 曲线

Fig.5 PDF curves of mode 7 with different PSSs

取表 8 中数据,按照式(5)安装不同的 PSS,模式 7 的扩展阻尼系数, $\alpha'_{7M} = -1.65$, $\alpha'_{7D} = -0.64$, $\alpha'_{7C} = -0.65$ (下标字母为不同 PSS 缩写首字母)。对比后可知,模式 7 在安装本文提出的 PSS 后,实部的分布密度的右界更小,更加稳定。按式(6)计算出的扩展阻尼系数也表明,阻尼比分布密度的左界最大。因此各项概率指标的改善程度要优于其他方法。图 5 也证明了这一结论。

4 结论

为便于调整补偿振荡模式的频带宽度,使 PSS 能根据具体需要,同时改善多个振荡模式阻尼特性,并减弱或消除对其他模式的不利影响,本文提出了一种多频段 PSS 模型。该 PSS 具有模型简单,各频段结构相同,能够灵活选择频段数的特点。进一步对该 PSS 进行了频率特性分析,调整 PSS 的频段数以及参数,能够改变补偿频段的宽度,调节补偿总增益和相位。试算表明,系统内发电机安装 PSS 后,根据概率灵敏度指标确定补偿频段数,既可作为 SBPSS 仅提高某一个模式的阻尼比,也可作为 MBPSS 同时兼顾多个振荡模式。

参考文献

- [1] 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.
FANG Si-li, ZHU Fang. Power system stabilizer theory and application[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1996.
- [2] Chung C Y, Wang K W, Tse C T, et al. Probabilistic eigenvalue sensitivity analysis and PSS design in multimachine system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(4): 1439-1445.
- [3] 王海风,韩侦祥, Hogg B W. 自适应电力系统稳定器设计的频域方法[J]. 中国电机工程学报, 1992, 12(6): 1-9.
WANG Hai-feng, HAN Zhen-xiang, Hogg B W. Adaptive power system stabilizer design in frequency domain[J]. Proceedings of the CSEE, 1992, 12(6): 1-9.
- [4] Andreoiu A, Bhattacharya K. Robust tuning of power system stabilizers using a lyapunov method based genetic algorithm[J]. IEE Proc-Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(5): 585-592.
- [5] 王明东,刘宪林,于继来. 基于改进遗传算法的发电机调速器侧模糊PSS优化设计[J]. 继电器, 2006, 34(13): 25-28.
WANG Ming-dong, LIU Xian-lin, YU Ji-lai. Optimization design of fuzzy PSS for governor of generator based on an improved GA[J]. Relay, 2006, 34(13): 25-28.
- [6] 王克文,李衍,倪相生. 相位补偿法设计双频段PSS[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(1): 1-7.
WANG Ke-wen, LI Yan, NI Xiang-sheng. Design of dual-band PSS by phase-compensation approach[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2009, 21(1): 1-7.
- [7] Grondin R, Kamwa I, Trudel G, et al. Modeling and closed-loop validation of a new PSS concept, the multi-band PSS[C]. //IEEE Power Engineering Society General Meeting, Toronto, Canada, 2003: 1804-1809.
- [8] Kamwa I, Grondin R, Trudel G. IEEE PSS2B versus PSS4B: the limits performance of the modern power system stabilizers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 903-915.
- [9] 梁艳萍,刘剑. 能量变换器四机系统低频振荡控制方法研究[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(2): 168-172.
LIANG Yan-ping, LIU Jian. Research on control method of low frequency oscillation for four power former system[J]. Electric Machine and Control, 2009, 13(2): 168-172.
- [10] 边晓燕,周歧斌,王克文,等. 多运行方式下概率特征根灵敏度分析与PSS鲁棒设计[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 77-83, 87.
BIAN Xiao-yan, ZHOU Qi-bin, WANG Ke-wen, et al. Probabilistic eigenvalue sensitivity analysis and PSS design in multi-operating conditions[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(19): 77-83, 87.
- [11] 林昭华,胡金磊,王克文. 用特征值灵敏度法分析系统参数对小干扰稳定性的影响[J]. 继电器, 2006, 34(9): 16-20.
LIN Zhao-hua, HU Jin-lei, WANG Ke-wen. Effect of system parameter on small signal stability by eigenvalue sensitivity[J]. Relay, 2006, 34(9): 16-20.
- [12] 王克文,谢志棠,史述红,等. 基于概率特征根分析的电力系统稳定其参数设计[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(11): 20-23.
WANG Ke-wen, XIE Zhi-tang, SHI Shu-hong, et al. Power system stabilizer parameter design based on probabilistic eigenvalue analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(11): 20-23.
- [13] 孙扬声. 自动控制理论[M]. 北京:中国电力出版社, 2004.
SUN Yang-sheng. Automatic control theory[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.

收稿日期: 2010-03-16; 修回日期: 2010-05-05

作者简介:

邱磊(1984-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统稳定分析与控制; E-mail: jubite@sina.com

王克文(1964-),男,博士,教授,主要研究方向为电力系统稳定分析与控制;

李奎奎(1984-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统稳定分析与控制。