

多运行方式下概率特征根灵敏度分析与 PSS 鲁棒设计

边晓燕¹, 周歧斌², 王克文³, 符杨¹

(1. 上海电力学院上海市电站自动化技术重点实验室, 上海 200090;
2. 上海市防雷中心, 上海 201615; 3. 郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要: 采用概率法对电力系统稳定器 (PSS) 进行鲁棒设计, 包括 PSS 定位与参数调节。本研究的目的是提高电力系统在多运行方式下的小干扰稳定。在多运行方式下, 系统特征根将以一定的概率分布在某些区间内, 正态假定下的均值、方差用来描述这种分布特性。传统的特征根灵敏度分析方法扩展为概率特征根灵敏度分析, 包括求解特征根均值和方差的灵敏度, 建立概率灵敏度指标, 用于对鲁棒的 PSS 进行选址和参数调节。并构建基于概率特征根的目标函数, 采用拟牛顿法对 PSS 参数进行最优协调, 在 8 机-24 节点算例系统上验证所研究方法的有效性。

关键词: 概率特征根; 概率特征根灵敏度; 电力系统稳定器 (PSS)

Probabilistic eigenvalue sensitivity analysis and PSS design in multi-operating conditions

BIAN Xiao-yan¹, ZHOU Qi-bin², WANG Ke-wen³, FU Yang¹

(1. Shanghai Key Laboratory of Power Station Automation Technology, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Shanghai Municipal Lightning Protection Center, Shanghai 201615, China; 3. College of Electrical Engineering Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: This paper presents a probabilistic algorithm for robust Power System Stabilizer (PSS) design, and the system robustness can be guaranteed because the load variation has been taken into account in probabilistic representation. Conventional eigenvalue analysis is first extended to the probabilistic environment in which the statistical nature of eigenvalues, corresponding to the load duration curves, is described by their expectations and variances. A probabilistic sensitivity index is then derived and successfully applied to the location, feedback signal and parameter selection of PSSs. A probabilistic eigenvalue-based objective function for coordinated synthesis of PSS parameters is then proposed. The quasi-Newton technique of nonlinear programming is used to solve the objective function and its convergence properties are discussed. The effectiveness of the proposed stabilizers, with a classical lead/lag structure, is demonstrated on an 8-machine system.

Key words: probabilistic eigenvalue; probabilistic eigenvalue sensitivity; power system stabilizer (PSS)

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)19-0077-07

0 引言

近年来, 随着我国经济的发展, 系统负荷不断增加, 电力系统的阻尼逐渐减小。特别是由于我国大区域电网互联的发展, 使得 0.2~2.5 Hz 频率范围的机电振荡时有发生。这些由于弱阻尼引起的机电振荡限制了电网的可传送容量, 影响系统的稳定运行。电力系统稳定器 (PSS) 作为解决这一问题的首选设备, 可以增加系统阻尼^[1~5], 通过对 PSS 进行

协调设计, 可以提高系统的小干扰稳定性。

特征根灵敏度分析法是目前发展最为完善的电力系统小干扰稳定分析方法, 其已成功地用于很多系统的 PSS 设计^[1~7]。然而传统的特征根灵敏度分析都是基于某一个或某几个运行点。而系统的运行状况随着负荷随时在变化, 在某个运行条件下设计的 PSS 参数, 在其他的运行状态下将可能不再适用, 这就促使了鲁棒的 PSS 设计。现有的许多方法是基于各样的在线调节技术^[8,9]而提出鲁棒的控制设计方法。但实际上电力部门仍然倾向于使用传统的特征根灵敏度法, 将其扩展为包含大范围运行状态的概率特征根与特征根灵敏度法, 进行鲁棒的 PSS 协调设计。

基金项目: 上海市浦江科技人才计划 (08PJ14060); 上海市教委科研创新项目 (09YZ341, 08ZZ92); 上海市优秀青年项目 (sd108010)

概率法适合于描述电力系统的多种运行状态, 并已成功解决很多电力系统问题^[10]。然而, 到目前为止, 概率法应用于电力系统小干扰稳定的研究还比较少^[11~15]。在文献[11]中, 两机系统的特征根概率属性由系统参数变化的统计属性决定, 例如转子角度和机械阻尼。文献[12]中, 针对单机无穷大系统的多个运行状态, 提出概率稳定的概念, 并用于研究该系统的动态稳定曲线。所有上述方法都仅应用于简单系统。

本文为考虑多种运行状态, 将文献[13~15]中的概率法扩展为 PSS 的鲁棒协调设计。文中第 II, 第 III 节系统地分析概率特征根与一阶、二阶概率特征根灵敏度的求解方法, 并提出了两类概率灵敏度指标 (PSIs), 分别用于 PSS 定位/输入信号选择与初始参数设置。第 IV 节介绍了用于 PSS 参数协调优化的拟牛顿法。第 V 节在一 8 机系统上对所述方法进行验证, 并采用优化算法对阻尼控制器的最后参数进行优化协调, 从而改善整个系统的小干扰稳定性。

1 概率特征根分析

本文的目的是研究电力系统的多运行状态即考虑负荷的变化, 负荷的不确定性通过负荷曲线来描述, 从而可以求得负荷的均值与方差。所有的节点电压(V), 节点注入(S)和特征根(λ)都被认为是随机变量, 本节的目的是确定系统特征根的均值与方差。在一个 N 节点的系统, 当将实部与虚部分开写, 有 $2N$ 个电压变量, 节点注入 S 可以由这些变量的二阶函数来描述

$$S = G(V_1 V_1, \dots, V_i V_j, \dots, V_{2N} V_{2N}) \quad (1)$$

由于 G 是二阶函数,

$$\bar{S} = G(\bar{V}_1 \bar{V}_1 + C_{V_1,1}, \dots, \bar{V}_i \bar{V}_j + C_{V_i,j}, \dots, \bar{V}_{2N} \bar{V}_{2N} + C_{V_{2N},2N}) \quad (2)$$

其中: $C_{V_i,j} = \overline{\Delta V_i \Delta V_j}$, 是节点电压间的协方差, \bar{S} 和 \bar{V} 分别代表节点注入 S 和节点电压 V 的均值。为求解电压的均值与协方差, 已知 S 中对应于负荷的子集的统计属性, 可以推导并求解出概率潮流公式 (2), 从而获得节点电压的均值与协方差。具体的方法如下, 将 \bar{V} 取一初值并代入公式 (2), 所得的结果 \bar{S} 与特解 \bar{S}_0 (即给定节点注入的均值) 的差值定义为 $\Delta \bar{S}$, 可以写成如下公式:

$$\begin{cases} \Delta \bar{S} = J_V \Delta \bar{V} & (3a) \\ C_V = \Delta \bar{V} \Delta \bar{V}^T = J_V^{-1} \overline{\Delta S \Delta S^T} (J_V^{-1})^T = J_V^{-1} C_S (J_V^{-1})^T & (3b) \end{cases}$$

(3a) 用于计算 $\Delta \bar{V}$ 的修正量; (3b) 用于计算电压协方差矩阵(节点注入的协方差 C_S 可以通过负荷变化曲线求得, J_V 是在 \bar{V} 处求得的雅克比矩阵)。这些值再代回公式 (2), 从而计算概率潮流程序, 进行叠代, 求得最后的概率潮流结果。

现在可以计算特征根的均值与协方差矩阵 C_λ 。如果 A 阵是线性系统动态方程的状态矩阵, 则它的均值 \bar{A} 可以通过以下公式求得:

$$\bar{A} = \bar{A}_0 + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^{2N,2N} \left(\frac{\partial^2 A}{\partial V_i \partial V_j} \right) \Big|_{V=\bar{V}} C_{V_i,j} \quad (4)$$

$$\text{和 } C_\lambda = J_\lambda C_V J_\lambda^T \quad (5)$$

其中: \bar{A}_0 是在 \bar{V} 处求得的, 而 J_λ 是特征根矩阵相对于电压 \bar{V} 的一阶偏导矩阵。

2 用于 PSS 定位和参数设计的概率灵敏度指标 PSIs

在考虑多种运行状态时, 系统稳定的程度取决于阻尼常数 α 与阻尼比 ξ 的概率分布。在本研究中, 阻尼控制器参数对 α 和 ξ 影响可以用概率灵敏度指标 (PSIs) 衡量, 而不是使用传统的灵敏度系数。本研究提出两类 PSIs: 第一类用于阻尼控制器位置与阻尼信号的选取; 第二类用于阻尼控制器参数的设定。对应于阻尼常数与阻尼比的 PSIs 由节点电压与阻尼控制器增益的二阶灵敏度决定。

对于某个特征根 $\lambda_k = \alpha_k + j\beta_k$, λ_k 的期望和标准方差分别写成 $\bar{\alpha}_k$ 和 σ_{α_k} (σ_{α_k} 是公式 (5) 的对角阵的平方根)。 λ_k 在区域 $\{-\infty, \bar{\alpha}_k + 4\sigma_{\alpha_k}\}$ 的概率非常接近于 1-近 0.99996^[16]。这个分布区域的上限, 写成 α'_k (如公式 (6a) 所示), 可以认为是多运行条件下用来衡量系统鲁棒稳定的新的阻尼系数, 定义为扩展阻尼系数。对于阻尼比 $\xi_k = -\alpha_k / \sqrt{\alpha_k^2 + \beta_k^2}$, 阻尼比的期望与方差分别表示为 $\bar{\xi}_k$ 和 σ_{ξ_k} , 扩展阻尼比定义如公式 (6b)。当 $\alpha'_k \leq 0$ 和 $\xi'_k \geq \xi_c$ 时, 系统为鲁棒稳定。

$$\alpha'_k = \bar{\alpha}_k + 4\sigma_{\alpha_k} \leq 0 \quad (6a)$$

$$\xi'_k = \bar{\xi}_k - 4\sigma_{\xi_k} \geq \xi_c \quad (6b)$$

α'_k (ξ'_k) 相对于参数 x 的灵敏度系数表明该参数对 α'_k (ξ'_k) 调节的有效程度, 将其定义为概率灵敏度系数 (PSIs), 其可用于多运行条件下鲁棒阻尼控制器的定位与输入信号选择。

$$S_{\alpha'_k, x} = \frac{\partial \alpha'_k}{\partial x} = \frac{\partial \bar{\alpha}_k}{\partial x} + 4 \frac{\partial \sigma_{\alpha_k}}{\partial x} \quad (7a)$$

$$S_{\xi_k, x} = \frac{\partial \xi_k'}{\partial x} = \frac{\partial \bar{\xi}_k}{\partial x} - 4 \frac{\partial \sigma_{\xi_k}}{\partial x} \quad (7b)$$

其中: $\bar{\alpha}_k$, $\bar{\xi}_k$, σ_{α_k} 和 σ_{ξ_k} 灵敏度的求取方法如文献[13~15]。

留数法广泛地用于控制器位置选择。在多运行条件下, PSI 可以认为是当阻尼控制器为零时的留数系数。则用于阻尼控制器定位的 PSI 为:

$$S_{\alpha_k, G_m} \Big|_{G_m=0} = \frac{\partial \alpha_k'}{\partial G_m} \Big|_{G_m=0} \quad (8a)$$

$$S_{\xi_k, G_m} \Big|_{G_m=0} = \frac{\partial \xi_k'}{\partial G_m} \Big|_{G_m=0} \quad (8b)$$

其中: G_m 是第 m 个阻尼控制器的增益。

鲁棒稳定性也可以通过另外指标来衡量, 即标准阻尼常数 $\alpha_k^* = -\bar{\alpha}_k / \sigma_{\alpha_k}$ 与标准阻尼比 $\xi_k^* = (\bar{\xi}_k - \xi_c) / \sigma_{\xi_k}$, 则公式 (6) 改写为式 (9):

$$\alpha_k^* = -\bar{\alpha}_k / \sigma_{\alpha_k} \geq 4 \quad (9a)$$

$$\xi_k^* = (\bar{\xi}_k - \xi_c) / \sigma_{\xi_k} \geq 4 \quad (9b)$$

α_k^* 和 ξ_k^* 的灵敏度定义为第二类 PSI。标准阻尼常数 α_k^* 与标准阻尼比 ξ_k^* 相对于控制器参数 x 的 PSI 由下式求得:

$$S_{\alpha_k^*, x} = \frac{\partial \alpha_k^*}{\partial x} = \frac{-1}{\sigma_{\alpha_k}} \frac{\partial \bar{\alpha}_k}{\partial x} + \frac{\bar{\alpha}_k}{\sigma_{\alpha_k}^2} \frac{\partial \sigma_{\alpha_k}}{\partial x} \quad (10a)$$

$$S_{\xi_k^*, x} = \frac{\partial \xi_k^*}{\partial x} = \frac{1}{\sigma_{\xi_k}} \frac{\partial \bar{\xi}_k}{\partial x} - \frac{\bar{\xi}_k - \xi_c}{\sigma_{\xi_k}^2} \frac{\partial \sigma_{\xi_k}}{\partial x} \quad (10b)$$

公式 (6) 中的 $\alpha_k' = \bar{\alpha}_k + 4\sigma_{\alpha_k}$ 仅表明 α_k 分布上限的位置。而公式 (9) 标准期望 $\alpha_k^* = -\bar{\alpha}_k / \sigma_{\alpha_k}$ 反映了 $\{\alpha_k < 0\}$ 的概率分布, 或 α_k 的稳定程度。因此, α_k^* 和它的灵敏度 $S_{\alpha_k^*, x}$ 比 α_k' 和 $S_{\alpha_k', x}$ 更适合于阻尼控制器参数调节。

3 非线性规划法对 PSSs 参数的协调与优化

为优化所有 PSSs 的参数, 采用标准阻尼常数 α_k^* 与阻尼比 ξ_k^* 并重写为:

$$\alpha_k^* = -(\bar{\alpha}_k - \alpha_c) / \sigma_{\alpha_k} \geq 4 \text{ 和 } \xi_k^* = (\bar{\xi}_k - \xi_c) / \sigma_{\xi_k} \geq 4 \quad (11)$$

其中: α_c 和 ξ_c 是阻尼常数与阻尼比的特定参数, 分别定为 0 和 0.1。

因此, 优化问题可以表达为如公式 (12), 仅考虑弱阻尼的特征根(即具有 $\alpha_k^* < 4$ 或 $\xi_k^* < 4$)。特征根越是弱阻尼, 它在目标函数 F 中的参与度越

大。

$$\text{Minimize } F(\mathbf{K}) = \sum_{\alpha_k^* < 4} (\alpha_k^* - 4)^2 + \sum_{\xi_k^* < 4} (\xi_k^* - 4)^2 \quad (12)$$

其中: \mathbf{K} 表示 PSS 的参数向量。

公式 (12) 可以采用梯度下降法 (SD) [16]。起始点为初始参数 $\mathbf{K}^{(0)}$ 。迭代采用下述公式,

$$\mathbf{K}^{(i+1)} = \mathbf{K}^{(i)} - \mu_1^{(i)} \nabla F(\mathbf{K}^{(i)}) \quad (13)$$

其中: i 表示迭代次数, $\nabla F(\mathbf{K}^{(i)})$ 是 $F(\mathbf{K})$ 在 $\mathbf{K}^{(i)}$ 点的梯度, 即 $\nabla F(\mathbf{K}^{(i)}) = \partial F(\mathbf{K}) / \partial \mathbf{K} |_{\mathbf{K}=\mathbf{K}^{(i)}}$, $\mu_1^{(i)}$ 是采用一维搜索法获得的沿 $-\nabla F(\mathbf{K}^{(i)})$ 方向优化步长。

为提高收敛速度, 本文采用带修正方程的拟牛顿法 [16], 如公式 (14)

$$\mathbf{K}^{(i+1)} = \mathbf{K}^{(i)} - \mu_2^{(i)} \mathbf{H}^{(i)} \nabla F(\mathbf{K}^{(i)}) \quad (14)$$

其中: $\mu_2^{(i)}$ 是采用一维搜索法获得的优化步长, $\mathbf{H}^{(i)}$ 是二阶偏导矩阵 $F(\mathbf{K})$ 在点 $\mathbf{K}^{(i)}$ 的倒数。初始点取 \mathbf{I} , \mathbf{H} 在每一次迭代都会改善。

节 2 中, λ_k 的区域 $\{-\infty, \bar{\alpha}_k + 4\sigma_{\alpha_k}\}$ 中标准方差 σ_{α_k} 的系数在分布区间上可接受的值为 3~4 [16], 其值越大意味着越稳定, 所以公式 (14) 中的 α^* 和 ξ^* 都应该大于 3~4 间的一个值。本文最后优化的标准取为 3.5, 即

$$\min\{\alpha_k^*\} \geq 3.5 \text{ and } \min\{\xi_k^*\} \geq 3.5 \quad (15)$$

4 算例分析

4.1 算例系统

图 1 所示的 8 机系统取自电力系统分析软件包 [17], 其中忽略了直流输电电路。不同的日负荷曲线分别分配在节点功率 $S_{L1} - S_{L9}$, $P_{G1} - P_{G7}$, 和 Q_{G3} , Q_{G6} 。节点 24 取为参考节点, 其电压的变化根据文献 [18,19] 中曲线。

表 1 8 机系统机电振荡模式 (未装 PSS)

Tab.1 Electromechanical modes without PSS

No.	$\bar{\alpha}$	$\bar{\beta}$	σ_{α}	α^*	P_{α}	$\bar{\xi}$	σ_{ξ}	ξ^*	P_{ξ}
1	-1.731	15.85	0.0432	40.11	1.000	0.1086	0.0033	2.61	0.9955
2	-0.758	11.11	0.0852	9.19	1.000	0.0680	0.0071	-4.47	0.0000
3	-0.564	9.83	0.0489	11.53	1.000	0.0573	0.0037	-11.40	0.0000
4	-0.637	7.91	0.0171	37.14	1.000	0.0803	0.0036	-5.56	0.0000
5	-0.650	7.53	0.0984	6.60	1.000	0.0860	0.0111	-1.26	0.1038
6	-0.420	6.48	0.0304	13.84	1.000	0.0647	0.0047	-7.54	0.0000
7	-0.010	3.82	0.0116	0.86	0.805	0.0026	0.0030	-32.22	0.0000

期望: $\lambda = \bar{\alpha} \pm j\bar{\beta}$ 和 $\bar{\xi}$, 标准方差: σ , 概率: $P_{\alpha} = P\{\alpha < 0\}$; $P_{\xi} = P\{\xi > 0.1\}$

算例系统的所有发电机模型选为六阶模型，则图 1 中的 8 机系统具有 88 个特征根（38 个实根，25 对复根）。该系统 7 个机电模式的概率结果如表 1 所示（为简化，具有足够的概率稳定的其他特征根并未在表格中列出）。从表 1 可以看出，所有的 7 个模式都不是鲁棒稳定，其中模式 1 较不稳定而模式 7 非常不稳定。为改善该系统的阻尼，PSS 将安装于该系统，进行协调设计以改善整个系统的小干扰稳定。

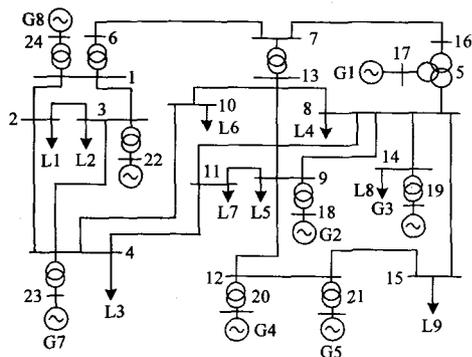


图 1 8 机系统

Fig.1 8-machine system

4.2 PSS

PSS 的基本功能是通过调节发电机励磁为同步机间的振荡提供阻尼，从而提高系统的稳定极限。为提供阻尼，PSS 必须在转子上产生与转子速度变化同向的电磁转矩，同时 PSS 的调节必须能够补偿励磁系统，发电机以及外部电力系统的增益与相位。经验表明，通过使用 PSS 能够显著的减少低频振荡的发生。

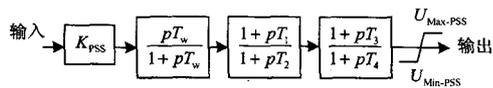


图 2 PSS 控制器

Fig.2 PSS controller

PSS 控制器可以表达为含有放大环节，隔直环节与两个超前滞后环节的传递函数^[20]。超前滞后环节为励磁系统的输入与发电机电磁转矩间的相位差提供超前或滞后相位补偿。PSS 控制器的结构与参数如图 2 所示。

4.3 PSS 定位

鲁棒的 PSS 位置可由对应于参与因子和留数的第一类 PSI（公式 7）指标确定，如表 2，表 3 和表 4 所示，绝对值较大的 PSI 用黑色字体标出。在选取的输入信号分别为 $\Delta\omega$ 和 ΔP 时，前 5 个机电模式

所对应的最大 PSI 出现的位置一致，对于振荡模式 6 则稍有不同，而对于模式 7，由于是区间模式，其振荡与很多发电机有关，因此具有较复杂的灵敏度关系。通过比较表 2, 3 和 4，本算例系统将选取 ΔP 作为 PSS 的输入信号，根据最大 PSI 出现的位置，模式 2, 3, 4, 5 和 6 分别通过安装在发电机 2, 6, 5（或 4），3 和 7 的 PSS 进行改善，而区间振荡模式 7 则可通过安装在发电机 3, 6 和 7 上的 PSS 进行改善。模式 1 的概率稳定虽不足够，但不需要单独安装 PSS，可通过其他 PSS 的协调对其进行改善。因此，本系统共选 5 个 PSS（发电机 2-6-5-3-7）。

表 2 对应于参与因子的概率灵敏度指标 PSI

(输入信号为 $\Delta\omega$)

Tab.2 PSI corresponding to participation factor (speed signal)

	$\Delta\omega_1$	$\Delta\omega_2$	$\Delta\omega_3$	$\Delta\omega_4$	$\Delta\omega_5$	$\Delta\omega_6$	$\Delta\omega_7$	$\Delta\omega_8$
α_1	0.5065	0.0044	0.0045	0.0006	0.0008	0.0016	0.0008	0.0000
α_2	0.0011	0.4387	-0.0026	0.0029	0.0037	0.0680	-0.0002	0.0000
α_3	0.0002	0.0034	0.0059	0.0026	-0.0458	0.4559	0.0603	0.0060
α_4	0.0000	0.0000	-0.0042	0.2947	0.2078	0.0000	-0.0002	0.0000
α_5	0.0007	-0.0008	0.4201	0.0532	0.0529	-0.0002	0.0105	-0.0004
α_6	0.0003	0.0002	0.0115	0.0997	0.2475	-0.0325	0.2418	0.0000
α_7	0.0096	0.0120	0.0319	0.0493	5.8438	0.2970	0.0480	-0.5703

表 3 对应于留数的概率灵敏度指标 PSI (x0.01)

(输入信号为 $\Delta\omega$)

Tab.3 PSI corresponding to residue index (x0.01) (speed signal)

	$\Delta\omega_1$	$\Delta\omega_2$	$\Delta\omega_3$	$\Delta\omega_4$	$\Delta\omega_5$	$\Delta\omega_6$	$\Delta\omega_7$	$\Delta\omega_8$
ξ_1	-0.0554	0.0000	-0.0003	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ξ_2	-0.0010	-0.0721	0.0005	0.0000	0.0001	-0.0023	0.0002	0.0000
ξ_3	-0.0005	0.0000	0.0014	0.0000	0.0001	-0.0699	0.0026	-0.0003
ξ_4	0.0000	0.0000	0.0036	-0.0418	-0.0304	0.0000	0.0000	0.0000
ξ_5	-0.0018	0.0010	-0.1892	-0.0080	-0.0025	0.0004	0.0017	0.0000
ξ_6	-0.0033	-0.0002	-0.0179	-0.0140	-0.0215	-0.0030	-0.0204	0.0000
ξ_7	-0.3305	-0.0801	-0.3225	-0.0724	-0.1041	-0.0008	-0.1404	-0.0619

表 4 对应于留数的概率灵敏度指标 PSI(x0.01)

(输入信号为 ΔP)

Tab.4 PSI corresponding to residue index (power signal)

	Δp_{e1}	Δp_{e2}	Δp_{e3}	Δp_{e4}	Δp_{e5}	Δp_{e6}	Δp_{e7}	Δp_{e8}
ξ_1	0.1510	0.0007	-0.0007	-0.0001	-0.0002	0.0004	-0.0003	0.0000
ξ_2	0.0006	0.1009	-0.0011	-0.0004	-0.0006	0.0383	0.0014	0.0000
ξ_3	0.0001	-0.0059	-0.0017	0.0000	0.0000	0.1719	0.0004	-0.0010
ξ_4	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0882	-0.0994	0.0000	0.0003	0.0000
ξ_5	-0.0007	0.0000	-0.4380	-0.0682	-0.0108	-0.0006	0.0055	-0.0001
ξ_6	0.0002	0.0002	-0.0160	-0.0368	-0.0784	-0.0027	-0.0991	-0.0007
ξ_7	-0.0565	-0.0147	-0.5844	-0.1097	-0.2272	-0.9304	-0.6181	-0.3626

4.4 控制器初始参数协调设定

如图 2 的 PSS 结构图, 其初始参数包括增益 K_{PSS} , 隔直环节时间常数 T_w , 以及超前与滞后环节时间常数 $T_1/T_2, T_3/T_4$ 。为确定 PSSs 的初始参数, 本文第 III 节介绍了用于设定该参数的 PSI 指标(公式(10))。通过考虑 PSS 的相位偏移来补偿由励磁系统产生的相位滞后(θ_{exc})^[4]。则获得 PSS 初始参数如下所示。

$$K_{PSS2}^{(0)} = -0.03 \text{ (for } \lambda_2), K_{PSS6}^{(0)} = -0.01 \text{ (for } \lambda_3),$$

$$K_{PSS5}^{(0)} = -0.50 \text{ (for } \lambda_4), K_{PSS3}^{(0)} = -0.73 \text{ (for } \lambda_5),$$

$$K_{PSS7}^{(0)} = -0.55 \text{ (for } \lambda_6), K_{PSS3}^{(0)} = -0.73,$$

$$K_{PSS6}^{(0)} = -0.01 \text{ and } K_{PSS7}^{(0)} = -0.55 \text{ (for } \lambda_7)$$

在所选择的 5 台发电机上安装 PSS 并设定初始参数后, 所对应的概率稳定性不足的模式(即该模式 $\alpha^* < 3.5$ 或 $\xi^* < 3.5$) 如表 5 所示。

表 5 PSS 取初始参数时对应的概率稳定不足的模式

Tab.5 Unsatisfactory modes with initial PSS parameters

No.	$\bar{\alpha}$	$\bar{\beta}$	σ_α	α^*	P_α	$\bar{\xi}$	σ_ξ	ξ^*	P_ξ
1	-1.752	15.91	0.0591	29.62	1.0	0.1094	0.0037	2.54	0.9943
2	-1.541	13.97	0.0821	18.76	1.0	0.1096	0.0028	3.48	0.9998
4	-1.204	10.90	0.0677	17.79	1.0	0.1097	0.0054	1.80	0.9633
7	-1.040	3.99	0.1614	6.44	1.0	0.2522	0.0404	3.76	0.9999
8	-0.987	2.62	0.1568	6.29	1.0	0.3529	0.0732	3.46	0.9997
9	-0.576	0.68	0.1259	4.57	1.0	0.6462	0.1501	3.64	0.9999

4.5 PSS参数的协调优化

本文采用拟牛顿法进行 PSS 参数的最终寻优。根据隔直环节的特性, 所有隔直时间常数 T_w 取为 5 s, 不参与优化。优化过程中采用拟牛顿法迭代次数

表 6 采用拟牛顿法时优化迭代步骤的记录

Tab.6 Records of some iteration steps for QN method

迭代次数	目标值	N_{α^*, ξ^*}	$\text{Min}\{\alpha^*, \xi^*\}$	主要改善模式
1	3.2829	4	2.5671	1,4
2	2.5539	5	2.9141	4
3	2.3746	5	2.9723	4
7	1.7093	5	3.1662	4
9	0.4256	4	3.5286	8,9
15	0.2610	2	3.5322	9

N_{α^*, ξ^*} 代表概率稳定性不足的模式(即 $\alpha^* < 4$ 或 $\xi^* < 4$) 的个数

与结果如表 6。经过 12 次迭代后, 所有特征根都满足公式(22)的条件, 所有的特征根都被优化。从表 6 的最后一列可以看出, 模式 7 首先被改善。模式被改善的次序取决于 $\nabla F(\mathbf{K}^{(0)})$ 对应的特征根灵敏度, 灵敏度越大, 对应参数迭代时的变化就越大, 从而加快优化的收敛速度。

表 7 最终设计的 PSS 参数

Tab.7 Final PSS parameters

	PSS2	PSS3	PSS5	PSS6	PSS7
K_{PSS}	-0.014	-0.733	-0.382	-0.013	-0.481
T_w	5 s	5 s	5 s	5 s	5 s
T_1	1.100 s	0.185 s	0.226 s	1.500 s	0.228 s
T_2	0.070 s	0.198 s	0.200 s	0.040 s	0.201 s
T_3	0.994 s	0.062 s	0.055 s	1.500 s	0.060 s
T_4	0.091 s	0.050 s	0.050 s	0.040 s	0.050 s

表 8 发电机安装所设计的 PSS 后的相关模式

Tab.8 Concerned modes with PSSs

No.	$\bar{\alpha}$	$\bar{\beta}$	σ_α	α^*	P_α	$\bar{\xi}$	σ_ξ	ξ^*	P_ξ
1	-1.766	15.86	0.0387	45.57	1.0	0.1106	0.0023	4.67	1.0
2	-1.525	12.36	0.0569	26.80	1.0	0.1225	0.0054	4.17	1.0
3	-0.977	8.03	0.0189	51.82	1.0	1.1209	0.0018	11.91	1.0
4	-1.449	10.61	0.0366	39.59	1.0	0.1353	0.0025	14.19	1.0
5	-1.403	6.63	0.1572	8.93	1.0	0.2072	0.0192	5.57	1.0
6	-1.796	6.84	0.2872	6.26	1.0	0.2540	0.0373	4.13	1.0
7	-0.973	3.98	0.1481	6.57	1.0	0.2373	0.0366	3.75	0.9999
8	-1.031	2.51	0.1378	7.49	1.0	0.3804	0.0665	4.22	1.0
9	-0.574	0.68	0.1249	4.60	1.0	0.6434	0.1528	3.55	0.9998

鲁棒的 PSS 参数的最后协调优化结果如表 7 所示。对应的 7 个机电模式与另外两个模式如表 8 所示。表 1→表 5→表 8 描述相关模式的改善过程: 即从未加 PSS 时原始模式变化到当 PSS 取初值时的变化, 以及参数协调优化后的模式, 本算例系统验证了采用概率灵敏度分析法与协调优化算法极大的改善了系统的阻尼, 且由于 PSSs 之间相互作用产生的振荡模式(模式 12 和 21, 如表 5 和表 8 所示) 被很好的抑制。使得全部特征根都满足 $\xi^* > 3.5$ (同时也满足阻尼常数的标准 $\bar{\alpha} < 0$)。

5 结论

本文将概率法应用于多机系统的特征根灵敏

度分析和 PSS 的鲁棒设计。多运行状态下的系统特征根用其期望与方差表示, 并建立特征根所对应的概率稳定极限。根据概率稳定极限, 提出应用于 PSS 位置选择与参数调节的概率灵敏度指标。为改善整个系统的阻尼, 本文采用非线性规划法对含特征根的目标函数进行求解, 研究 PSS 的协调与优化。所设计的阻尼控制器最后通过算例系统进行了验证。

然而, 本文在对多运行状态进行概率稳定分析时, 仅考虑了负荷变化的随机性, 其他因素如发电机输出, 网络参数/结构的变化都没有研究。在下一步的研究中将对这些情况进行考虑以完善基于概率法的小干扰稳定分析/改善方法。

附录

(1) 特征根灵敏度的确定

W_k^T 和 U_k 分别是左右特征向量, 并且满足 $W_k^T U_k = 1$, κ_i 和 κ_j 代表参数变量, 则特征值 (λ_k) 一阶与二阶灵敏度可以通过文献[21]获得为

$$\frac{\partial \lambda_k}{\partial \kappa_i} = W_k^T \frac{\partial A}{\partial \kappa_i} U_k \quad (16a)$$

$$\frac{\partial^2 \lambda_k}{\partial \kappa_i \partial \kappa_j} = W_k^T \frac{\partial^2 A}{\partial \kappa_i \partial \kappa_j} U_k + \frac{\partial W_k^T}{\partial \kappa_i} \frac{\partial A}{\partial \kappa_j} U_k + \frac{\partial W_k^T}{\partial \kappa_j} \frac{\partial A}{\partial \kappa_i} U_k \quad (16b)$$

其中: 左特征向量 W_k^T 的偏导是所有特征向量的线性组和, 对一个有 n 个特征根的系统, 该偏导可以表述为:

$$\frac{\partial W_k^T}{\partial \kappa_i} = \sum_{m \neq k}^n \left(\frac{1}{\lambda_k - \lambda_m} W_k^T \frac{\partial A}{\partial \kappa_i} U_m W_m^T \right) \quad (17)$$

(2) 概率特征根灵敏度的确定

为了计算 σ_{α_k} 的概率灵敏度, 特征根 λ_k 的协方差 C_{α_k, α_k} , C_{α_k, β_k} , C_{β_k, α_k} 和 C_{β_k, β_k} 可以通过公式 (3b) 的 C_V 求得, 求解方法如公式 (16) 所示, 其中 (γ, η) 代表 α_k 和 β_k 的四个组合。

$$C_{\gamma, \eta} = \sum_{i=1}^{N,N} \left(\frac{\partial \gamma_k}{\partial V_i} \frac{\partial \eta_k}{\partial V_j} C_{V_i, V_j} \right) \quad (18)$$

根据公式 (18), 协方差相对于控制器参数 κ 的灵敏度可以表述为

$$\frac{\partial C_{\gamma, \eta}}{\partial \kappa} = \sum_{i,j=1}^{N,N} \left[C_{V_i, V_j} \left(\frac{\partial^2 \gamma_k}{\partial V_i \partial \kappa} \frac{\partial \eta_k}{\partial V_j} + \frac{\partial \gamma_k}{\partial V_i} \frac{\partial^2 \eta_k}{\partial V_j \partial \kappa} \right) \right] \quad (19)$$

考虑到 $\sigma_{\alpha_k}^2 = C_{\alpha_k, \alpha_k}$ 和 $\gamma_k = \eta_k = \alpha_k$, 标准方差 σ_{α_k} 的灵敏度可以通过公式 (20) 求得。

$$\frac{\partial \sigma_{\alpha_k}}{\partial \kappa} = \frac{1}{2\sigma_{\alpha_k}} \frac{\partial C_{\alpha_k, \alpha_k}}{\partial \kappa} \quad (20)$$

在公式 (18)、(19) 和 (20) 中, 特征根对节点电压的一阶灵敏度可以由公式 (3a) 获得, 通过将 (16a) 里的 K_i 换成 V_i 或 V_j 。特征根对节点电压和 PSS 参数 K 的二阶灵敏度(19)可以根据公式 (16b) 计算, 其中 K_i 替换成 V_i 或 V_j , K_j 替换成 K 。

为计算阻尼比期望与标准方差的灵敏度, 对第 k 个特征根的阻尼比在其期望处进行线性化, $\bar{\lambda}_k = \bar{\alpha}_k + j\bar{\beta}_k$, 则

$$\Delta \xi_k = D_{Ak} \Delta \alpha_k + D_{Bk} \Delta \beta_k \quad (21)$$

其中:

$$D_{Ak} = -\bar{\beta}_k^2 / |\bar{\lambda}_k|^3, \quad D_{Bk} = \bar{\alpha}_k \bar{\beta}_k / |\bar{\lambda}_k|^3 \quad (22)$$

因此, 阻尼比期望的灵敏度可以表达为

$$\frac{\partial \bar{\xi}_k}{\partial x} = D_{Ak} \frac{\partial \bar{\alpha}_k}{\partial x} + D_{Bk} \frac{\partial \bar{\beta}_k}{\partial x} \quad (23)$$

根据式(21), 阻尼比 ξ_k 的方差可以推导为

$$C_{\xi_k} = D_{Ak}^2 C_{\alpha_k, \alpha_k} + D_{Bk}^2 C_{\beta_k, \beta_k} + 2D_{Ak} D_{Bk} C_{\alpha_k, \beta_k} \quad (24)$$

其灵敏度表达为

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{\xi_k}}{\partial x} = & D_{Ak}^2 \frac{\partial C_{\alpha_k, \alpha_k}}{\partial x} + D_{Bk}^2 \frac{\partial C_{\beta_k, \beta_k}}{\partial x} + D_{Ak} D_{Bk} \frac{\partial C_{\alpha_k, \beta_k}}{\partial x} + \\ & 2(D_{Ak} C_{\alpha_k, \alpha_k} + D_{Bk} C_{\alpha_k, \beta_k}) \frac{\partial D_{Ak}}{\partial x} + \\ & 2(D_{Bk} C_{\beta_k, \beta_k} + D_{Ak} C_{\alpha_k, \beta_k}) \frac{\partial D_{Bk}}{\partial x} \end{aligned} \quad (25)$$

其中

$$\frac{\partial D_{Ak}}{\partial x} = -\frac{3}{\bar{\alpha}_k} D_{Ak} \bar{\xi}_k^2 \frac{\partial \bar{\alpha}_k}{\partial x} - \left[\frac{2}{\bar{\alpha}_k} - \frac{3}{\bar{\xi}_k} D_{Ak} \right] D_{Bk} \frac{\partial \bar{\beta}_k}{\partial x} \quad (26a)$$

$$\frac{\partial D_{Bk}}{\partial x} = [1 - 3 \bar{\xi}_k^2] \frac{D_{Bk}}{\bar{\alpha}_k} \frac{\partial \bar{\alpha}_k}{\partial x} + \left[\frac{1}{\bar{\beta}_k} + \frac{3}{\bar{\xi}_k} D_{Bk} \right] D_{Bk} \frac{\partial \bar{\beta}_k}{\partial x} \quad (26b)$$

因此, 标准方差 σ_{ξ_k} 的灵敏度为

$$\frac{\partial \sigma_{\xi_k}}{\partial x} = \frac{1}{2\sigma_{\xi_k}} \frac{\partial C_{\xi_k}}{\partial x} \quad (27)$$

在确定 $\bar{\alpha}_k$, $\bar{\xi}_k$, σ_{α_k} 和 σ_{ξ_k} 的灵敏度后, 就可以计算公式(7) 和 (10) 的概率灵敏度指标, 并将其

若按国内电铁的运行经验最大冲击电流一次 400 A, 系统变电所二回线与大系统联接, 一回线承受一次 200 A 的电流突变, 折算至二次侧 (CT 按 1200/5 考虑), 二次电流突变为 0.83 A, 目前湖南省网一般将线路保护、故障录波器电流突变量启动定值整定为 $0.1I_n$, 即为 0.5 A, 因此要考虑调整电流突变量启动定值。若考虑 N-1 或 N-2 方式, 则电流突变量可能进一步增大, 因此应密切监视有关电铁负荷变化情况, 定期测量有关变电所电流、电压各分量数据, 根据实际测量值调整突变量启动定值, 防止出现影响保护动作行为的情况发生。

4 结论

目前, 武广铁路客运专线还未正式投运, 投运后在实际运行中又会发现许多新问题, 应该从以下几方面进行更加细致的研究。

(1) 实测并认真分析在各种条件和运行方式下电铁负荷给 220 kV 主系统带来的高次谐波;

(2) 牵引机车的冲击性负荷对 220 kV 系统内相关变电站及线路保护的影响和对策;

(3) 针对电铁负荷的特殊性, 结合电铁保护的实际情况, 进一步研究电铁保护的装置性能及整定原则。

参考文献

- [1] GB/T18038-2000, 电气化铁道牵引供电系统微机保护装置通用技术条件[S].
- [2] DL/T599-94, 220~500kV 电网继电保护装置运行整定规程[S].
- [3] CSC-109A 数字式线路保护装置说明书[Z]. 北京四方继保自动化股份有限公司.
- [4] RCS-904 系列高压输电线路成套保护装置技术和使用说明[Z]. 南瑞继保电气有限公司.

- [5] PSL607 数字式线路保护装置技术说明书[Z]. 国电南京自动化股份有限公司.
- [6] 钱海. 哈大电铁 220 kV 线路继电保护运行相关问题探讨[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(12): 68-71.
QIAN Hai. Discussion of 220 kV Line Protection Operation in Ha-Da Electricfield Railway Road[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(12): 68-71.
- [7] 李保福, 邱金辉, 张丽英. 电铁工程 220kV 两相式供电系统继电保护动态试验模型的研究[J]. 东北电力系统, 2001, 4: 20-23.
LI Bao-hu, QIU Jin-hui, ZHANG Li-ying. Research on Relay - Protection Dynamic - test Model for 220 kV Two - phase Power Supply System of Electrified Railway Road[J]. Northeast Power System, 2001, (4): 20-23.
- [8] 郑太一, 王建勋. 220kV 两相供电线路短路电流与继电保护定值计算[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(5): 97-99.
ZHENG Tai-yi, WANG Jian-xun. Short Circuit Current and Relaying Protection Setting Calculation of a 220 kV Two-Phase Transmission Line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(5): 97-99.
- [9] 盛海华, 朱炳铨. 电气化铁路外围供电系统保护配置及运行有关问题的探讨[J]. 浙江电力, 2006, (4): 29-39.
SHENG Hai-hua, ZHU Bing-quan. Peripheral Power System of Electric-Railway: Protection Scheme and Operation[J]. Zhejiang Electric Power, 2006, (4): 29-39.

收稿日期: 2008-10-21; 修回日期: 2009-01-05

作者简介:

陈剑(1976-), 男, 博士生, 工程师, 主要从事电力系统规划和电能质量评估的工作;

李炜(1975-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事继电保护的整定计算和技术管理的工作。E-mail:lyweyl@163.com

(上接第 83 页 continued from page 83)

- [18] Wang K W, Tse C T, Tsang K M. Algorithm for Power System Dynamic Stability Studies Taking Account the Variation of Load Power[J]. International Journals of Electric Power Systems Research, 1998,46:221-227.
- [19] Yang X T. Theoretical Calculation and Analysis of Electric Network Losses[M]. Beijing:Chinese Hydro Resource and Electric Power Press, 1985
- [20] Cai L J, Erlich I. Simultaneous Coordinated Tuning of PSS and FACTS Damping Controllers in Large Power Systems[J]. IEEE Trans on PAS, 2005,20(1):294-300.

- [21] Wang K W, Chung C Y, Tse C T, et al. Multimachine Eigenvalue Sensitivities of Power System Parameters[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000,15(2).

收稿日期: 2009-04-21; 修回日期: 2009-06-23

作者简介:

边晓燕(1976-), 女, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统稳定与控制、风力发电; E-mail: kuliz@163.com

周歧斌(1977-), 男, 博士, 工程师, 研究方向为雷电防护与电磁兼容;

王克文(1964-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统稳定性分析与控制。