

# 电网电力系统稳定器的交互影响分析

Analysis on the Interactive Influence of Power System Stabilizers  
in Provincial Power Grid

康礼彦<sup>1</sup> 王克文<sup>1</sup> 王君亮<sup>2</sup>

(郑州大学电气工程学院<sup>1</sup>,河南 郑州 450001;河南电力试验研究院<sup>2</sup>,河南 郑州 450052)

**摘要:** 随着我国大区域电网互联的发展,低频振荡已是影响电力系统稳定的重要因素之一。目前,在发电机励磁系统上安装电力系统稳定器(PSS)仍是抑制低频振荡的一种较为经济和有效的方法。在分析了多机系统中PSS的交互影响并考虑多机系统PSS的相关性的基础上,采用特征值灵敏度分析法确定机电振荡模式,建立了优化模型。由特征值对PSS增益的灵敏度构成目标函数,实现了发电机对各机电模式的有效参与,从而求得系统中各机电模式与主参与机组PSS的对应关系。某省级电网系统的计算和分析,验证了所述方法的可行性。

**关键词:** 电力系统稳定器 特征值灵敏度 振荡模式 优化模型 交互影响 稳定性

**中图分类号:** TM712 **文献标志码:** A

**Abstract:** Along with the development of large regional power grid interconnection in our country, the low frequency oscillation becomes important factor affecting the stability of the power system. At present, installing power system stabilizer (PSS) in excitation of generator is still the one of the most economical and effective method to suppress low frequency oscillation. On the basis of analyzing the interactive influence of the power system stabilizers in multi-generator system and considering the correlation of PSS in multi-generator system, the electromechanical oscillation mode is determined by adopting eigenvalue sensitivity analysis method, and the optimization model is established. The objective function is built by the sensitivity of eigenvalue to the gain of PSS to implement the effective participation of generators to each electromechanical mode, thus the corresponding relation between each electromechanical mode and the PPS in mainly participating unit. The feasibility of the method proposed is verified through the calculating analysis of the power grid in certain province.

**Keywords:** Power system stabilizer (PSS) Sensitivity of eigenvalue Oscillation mode Optimization mode Interactive influence Stability

## 0 引言

近年来,随着电网规模的扩大和机电振荡模式的增多,多机系统机组间的交互影响逐渐明显。机组上所安装的电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)在提高机电振荡模式阻尼比的同时,可能会对机电振荡模式产生不利影响。

基于系统单运行方式,PSS最佳安装位置可根据传统的参与因子法<sup>[1-4]</sup>、基于Prony分析的留数法<sup>[5-7]</sup>和特征值灵敏度分析法<sup>[8-11]</sup>来确定,其中概率特征值灵敏度分析法<sup>[12-15]</sup>为多运行方式下的系统稳定性分析提供了可靠的选择指标。文献[3-4]采用参与因子法及模态分析选取PSS合适的安装位置。文献[11]采用特征分析法确定多机系统中PSS的最佳安装位置。

对10个机组以下的小系统,根据特征值灵敏度可

以很容易地确定各机电模式的主参与机组或强参与发电机。而在省级电网中,由于多机系统机组间的交互影响,人工确定对应各模式的PSS安装位置比较困难。因此,本文采用特征值灵敏度分析法建立优化模型,以分析系统中PSS的交互影响。

## 1 特征值分析法

基于多机系统表达式(generalized multimachine representation, GMR)及插入式建模技术(plug-in modeling technique, PMT)的电力系统仅由两类基本传输块构成。用于形成系统A的微分-代数方程<sup>[10]</sup>可简单表示为:

$$(K_a + p)X = (K_b + pK_c)(L_1X + L_3M) \quad (1)$$

$$L_7X + L_9M = 0 \quad (2)$$

式中: $X$ 和 $M$ 分别为状态变量和非状态变量矩阵; $K_a$ 、 $K_b$ 和 $K_c$ 分别为一阶传输块参数的对角矩阵; $L_1$ 和 $L_3$ 为子矩阵,仅由0和1构成; $L_7$ 和 $L_9$ 则描述了状态变量和非状态变量的代数关系。

将导纳矩阵 $Y$ 的网络方程式 $\Delta I = Y\Delta V$ 插入到 $L_9$

国家电网公司科技基金资助项目。

修改稿收到日期:2012-09-28。

第一作者康礼彦(1988-),女,现为郑州大学电力系统及其自动化专业在读硕士研究生;主要从事电力系统稳定分析与控制的研究。

中,得到4个实数矩阵,并消去式(1)和式(2)中的非状态变量  $M$ ,即可得到以下矩阵:

$$A = S(K_a F - K_b) \quad (3)$$

$$S = (I - K_i F)^{-1} \quad (4)$$

$$F = L_1 + L_3 H L_7 \quad (5)$$

$$H = -L_9^{-1} \quad (6)$$

式中: $F$ 和 $H$ 为特征值计算中的中间矩阵。

用于电力系统小干扰稳定分析的特征值由  $A$  阵求得。QR 算法<sup>[16]</sup>是求取全维特征值的有效算法之一,具有数值稳定、收敛可靠的优势,但存在维数限制问题。近年来出现的改进后 QR 算法可有效求解几千阶规模的矩阵。本文用 QR 算法求系统的特征值。

## 2 特征值灵敏度

特征值灵敏度既可用于确定机电振荡模式,又可用于选择 PSS 的最佳安装位置,其数值大小反映了单位增益变化引起的特征值变化程度,正负号体现了特征值的变化趋势。

设  $W_k$  和  $U_k$  分别为第  $k$  个特征值  $\lambda_k$  的左、右特征向量,且已经标准化,即  $W_k^T U_k = 1$ ,则第  $k$  个特征值  $\lambda_k = \alpha_k \pm j\beta_k$  对第  $m$  个 PSS 增益  $K_m$  的灵敏度<sup>[8]</sup>可表达为:

$$\frac{\partial \lambda_k}{\partial K_m} = W_k^T \frac{\partial A}{\partial K_m} U_k \quad (7)$$

由式(7)可知,系数矩阵  $A$  对 PSS 增益  $K_m$  的导数对求解特征值的灵敏度具有重要的作用,则:

$$\frac{\partial A}{\partial K_m} = S K_t \frac{\partial F}{\partial K_m} A + S K_a \frac{\partial F}{\partial K_m} \quad (8)$$

$$\frac{\partial F}{\partial K_m} = L_3 H \left( \frac{\partial L_9}{\partial K_m} H L_7 + \frac{\partial L_7}{\partial K_m} \right) \quad (9)$$

每个  $\frac{\partial L_7}{\partial K_m}$  和  $\frac{\partial L_9}{\partial K_m}$  中,仅在相应位置存在一个非零元素,且值为 1。

本文仅关心特征值实部  $\alpha_k$  及阻尼比  $\xi_k$  对 PSS 增益  $K_m$  的灵敏度。由于:

$$\xi_k = \frac{-\alpha_k}{\sqrt{\alpha_k^2 + \beta_k^2}} \quad (10)$$

因此有:

$$\frac{\partial \alpha_k}{\partial K_m} = \operatorname{Re} \frac{\partial \lambda_k}{\partial K_m} \quad (11)$$

$$\frac{\partial \xi_k}{\partial K_m} = \frac{-\frac{\partial \alpha_k}{\partial K_m}}{\sqrt{\alpha_k^2 + \beta_k^2}} + \frac{\alpha_k^2 \frac{\partial \alpha_k}{\partial K_m} + \alpha \beta_k \frac{\partial \beta_k}{\partial K_m}}{\sqrt{(\alpha_k^2 + \beta_k^2)^3}} \quad (12)$$

## 3 PSS 交互影响分析

电力系统各机组间容易出现交互影响。某 8 机

系统部分机电模式的特征值灵敏度如表 1 所示。其中, $K$  表示各 PSS 对应的增益; $\alpha$  表示各机电振荡模式。

表 1 特征值对 PSS 增益的灵敏度

Tab. 1 Sensitivities of eigenvalues to gains of PSS

模式	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_6$
$\alpha_1$	-2.315 4	-0.009 1	0.008 7	-0.001 4	-0.006 3
$\alpha_2$	-0.007 2	-1.266 0	0.015 6	-0.004 1	-0.449 6
$\alpha_3$	-0.002 5	0.041 8	0.019 1	-0.000 3	-1.990 3
$\alpha_4$	-0.000 0	-0.000 4	0.006 5	-0.618 0	-0.000 2
$\alpha_5$	0.004 9	0.000 4	2.850 5	-0.130 3	0.005 2
$\alpha_7$	0.153 6	0.038 7	1.573 5	-0.294 8	3.673 4

发电机上安装了 PSS, $K$  值表示相应机组的增益。由表 1 可见,模式 1、2、4 和机组 1、2、4 只有一个灵敏度值很大,且一一对应,因此模式 1、2、4 的主参与机组分别为机组 1、2、4;而机组 3 和机组 6 均控制两个模式,且模式 7 由机组 3 和机组 6 同时控制,因此存在交互影响。模式 5 和模式 7 的灵敏度方向相同,可以在发电机 3 上安装 PSS 同时改善两个模式;而模式 3 和模式 7 灵敏度方向相反,在发电机 6 上安装 PSS 可能会对两个模式起到相反的作用,于是有必要对此情况做优化处理。

由上述分析可知,当灵敏度方向相同时,在某机组上加装 PSS,可以同时改善多个机电振荡模式的阻尼特性。因此,本文只考虑有交互影响且灵敏度方向相反的机组。

构成的目标函数可表示为:

$$\max F = \sum_{k,m} T_m \frac{\partial \alpha_k}{\partial K_m} + \sum_{k,m} T_m \frac{\partial \xi_k}{\partial K_m} \quad (13)$$

式中: $T_m$  为第  $m$  台发电机的权重系数,反映每台发电机 PSS 的参与情况。当  $m=0$  时,表示发电机上不安装 PSS;当  $m=1$  时,表示安装 PSS;当  $m=-1$  时,则表示安装 PSS 但符号相反。 $T_m$  的值由枚举产生。

式(13)中仅包含了 PSS 有交互影响且作用相反的机组及其相关的机电振荡模式。机电模式的灵敏度有正有负,可能增强或削弱模式的阻尼。 $T_m$  的使用正是为了协调这种影响。

为了分析 PSS 的交互影响,得到各机电振荡模式的主参与机组,每个机电振荡模式应尽可能选择最灵敏的机组。当机电振荡模式对某台发电机 PSS 的灵敏度影响很小时,在这台发电机上安装 PSS 对机电模式的改善效果并不明显,因此,可以通过设定阈值来选择需要优化的相关机组,并形成新的模块进行求解。方法实现的过程如下。

① 建立状态空间方程,形成系数矩阵  $A$ 。根据式(3)~式(6),采用 QR 算法,求出特征值  $\lambda$ 。

② 由步骤①得到矩阵  $A$  和左右特征向量  $W、U$ ,根据式(7)~式(12),求解零增益下特征值实部  $\alpha$  的灵敏度及阻尼比  $\zeta$  的灵敏度。

③ 根据特征值的灵敏度大小,选出每个机电模式的主参与机组,并判断各机组主导的机电模式的个数  $N$ 。若  $N>1$ ,且对应的机电模式的灵敏度方向相反,则进行优化处理;否则,保存这些机组的主导模式。

④ 搜索需要优化处理的机组所主导的机电振荡模式,并根据设定的阈值,选择各模式的相关机组,以做进一步的优化。

⑤ 将选出的满足优化条件的机组及其主导的各机电模式形成新模块。根据式(13)和式(14),采用枚举法进行优化处理,得到各机电振荡模式的主参与机组并予以保存。

⑥ 根据最终得到的各机电模式的主参与机组,用 PSS 控制其主参与模式,并进一步做 PSS 参数的协调优化,判断该方法的有效性。

## 4 算例分析

### 4.1 特征值计算

算例采用 2011 年冬季大运行方式的运行数据。

考虑的省网共有 1 124 个节点、1 103 条线路、180 台双绕组变压器、445 台三绕组变压器。

运行发电机数为 109 台,其中某电厂内两台发电机的机组参数、控制器参数完全一致,将其合并为一台,加上 4 台边界等值机。特征值计算中,共考虑 112 台发电机,存在 111 种机电振荡模式。用 QR 法计算全维特征值和左、右特征向量矩阵  $W$  和  $U$ ,得到 1 623 个特征值。用右特征方程校核,误差中实部和虚部的最大偏差值为  $-3.610\ 54\times 10^{-8}$ ;左特征方程校核的最大误差为  $1.617\ 38\times 10^{-8}$ ;左、右特征向量乘积的最大误差为  $-1.209\ 25\times 10^{-11}$ 。

### 4.2 零增益下交互影响分析

在零增益下,计算特征值实部灵敏度和阻尼比灵敏度。由于同一个振荡模式的两类灵敏度的值基本对应,根据特征值实部灵敏度选择每个模式下最灵敏的机组,即各模式的主参与机组,共得到 18 组具有交互影响的机组。

当同一机组主导的不同机电模式的灵敏度方向相同时,通过调整一台发电机上的 PSS 参数,可以同时改善其他的机电振荡模式;而当灵敏度方向相反时,则会削弱其他机电模式的阻尼。机组 50768 相关的机电模式灵敏度如表 2 所示,其中 G50711、G50712、G50719 表示与机组 50768 有交互影响的机组。

表 2 机组 50768 相关的机电模式灵敏度

Tab.2 Sensitivities of electromechanical modes related to unit 50768

模式	机电模式灵敏度										
	G50711	G50712	G50765	G50766	G50767	G50768	G50771	G50772	G50831	G50861	G50709
$\alpha_3$	0.000 0	0.000 0	0.001 9	0.001 3	0.000 0	-0.100 9	-0.090 0	-0.088 7	-0.005 4	0.000 0	0.000 0
$\alpha_7$	0.000 0	0.000 0	-0.474 6	-0.092 9	0.002 7	-1.160 7	0.000 3	0.000 3	-0.001 1	0.000 0	-0.000 2
$\alpha_{94}$	-0.000 2	-0.001 1	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.157 8	0.000 0	0.000 0	-0.000 3	0.026 8	0.015 6
$\alpha_{97}$	-0.265 6	-0.025 5	0.000 0	0.000 0	0.000 3	-0.269 8	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 1
$\alpha_{105}$	-0.000 4	0.001 0	0.000 0	-0.000 2	0.002 8	77.746 9	0.000 0	0.000 0	0.001 6	0.000 0	0.000 0

以上 5 种模式的主参与机组均为 50768,但其灵敏度方向不一致,需要做进一步优化处理。此处设定灵敏度的阈值为 0.002,针对各机电模式选择相关机组,即共有 11 台相关机组,由此形成新模块。根据优化模型,通过枚举法确定各机组权重系数的值,从而得到各机组 PSS 的参与情况。

本算例中,由机组 50768、50845、50846 和 50868 主导的机电振荡模式灵敏度方向不完全一致,即共有 4 组交互影响的机组需要做进一步的优化处理。

通过枚举法求解优化模型。将这 4 组发电机模块分别经过 PSS 的交互影响分析,最终与同一机组主导

的机电振荡模式灵敏度方向保持一致,且数值都相对灵敏,从而使得总灵敏度之和最大,即选定了 PSS 的最佳安装位置。交互影响分析前后的主参与机组的部分结果如表 3 所示。

表 4 给出了各模块的计算规模,其中机组 50768 的模块计算维数较大,但由于模块规模很小,计算速度很快;其他模块,由于维数很小,计算时间更短,甚至接近 0。

各机电模式由其主参与机组的 PSS 控制,并经过 PSS 参数的协调优化。优化后的机电模式如表 5 所示。

表 3 各机电模式的主参与机组

Tab.3 The mainly participating generation unit of each electromechanical mode

优化前		优化后	
模式	机组	模式	机组
$\lambda_4$	G50766	$\lambda_3$	G50771
$\lambda_8$	G50714	$\lambda_7$	G50765
$\lambda_{13}$	G50870	$\lambda_{94}$	G50768
$\lambda_{18}$	G50744	$\lambda_{97}$	G50711
$\lambda_{22}$	G50840	$\lambda_{105}$	G50768
$\lambda_{26}$	G50707	$\lambda_{15}$	G50845
$\lambda_{34}$	G50819	$\lambda_{52}$	G50846
$\lambda_{48}$	G50721	$\lambda_{59}$	G50845
$\lambda_{55}$	G50826	$\lambda_{88}$	G50846
$\lambda_{62}$	G50788	$\lambda_{60}$	G50735
$\lambda_{72}$	G50801	$\lambda_{64}$	G50847
$\lambda_{75}$	G50805	$\lambda_{73}$	G50846
$\lambda_{80}$	G50805	$\lambda_{79}$	G50727
$\lambda_{96}$	G50800	$\lambda_2$	G50868
$\lambda_{102}$	G50701	$\lambda_{110}$	G50846

表 4 计算规模

Tab.4 Calculating scale

机组	模式数量	相关机组数	规模/台	t/ms
G50768	5	11	177 147	391
G50845	4	5	243	2
G50846	4	7	2 187	15
G50868	2	3	27	0

表 5 优化后的机电模式

Tab.5 Electromechanical modes after optimization

机组	模式	特征值实部	阻尼比
G50700	$\lambda_{101}$	-0.464 840	0.038 423
G50701	$\lambda_{102}$	-0.454 802	0.037 664
G50748	$\lambda_{92}$	-0.453 304	0.036 618
G50749	$\lambda_{106}$	-0.779 761	0.061 310
G50755	$\lambda_{104}$	-0.259 081	0.040 695
G50759	$\lambda_{107}$	-0.215 337	0.042 439
G50768	$\lambda_{105}$	-0.264 142	0.040 231
G50769	$\lambda_{98}$	-0.598 731	0.048 674
G50772	$\lambda_{99}$	-0.602 214	0.047 009
G50773	$\lambda_{100}$	-0.543 369	0.042 316
G50773	$\lambda_{111}$	-0.692 469	0.055 437
G50823	$\lambda_{108}$	-0.255 814	0.034 800
G50846	$\lambda_{110}$	-0.360 743	0.047 508
G50789	$\lambda_{109}$	-0.383 679	0.031 485

本文将机电模式满足优化的条件定为特征值实部大于-0.03 或阻尼比小于 0.05,而优化后稳定的条件为特征值实部小于-0.01 且阻尼比大于 0.03。表 5 中只列出了需要 PSS 优化的机电振荡模式。由表 5 可知,优化后每个机电模式都得到了改善,特征值实部均小于-0.2,阻尼比均大于 0.03,满足了机电模式的稳定条件。

## 5 结束语

本文根据特征值灵敏度的大小对机电模式的主参与机组进行初步选定,并通过判断交互作用机组的特征值灵敏度方向,对灵敏度方向相反的机组做进一步的优化分析,选择相关机组建立新模块,用枚举法求解优化模型,得到机电模式与主参与机组 PSS 的最佳对应关系。对某省级算例的 PSS 交互影响分析及参数协调优化的结果表明,采用特征值灵敏度分析法来分析机组 PSS 的交互影响,可以得到满意的效果。

### 参考文献

- [1] Kunder P. Power system control and stability [M]. New York: McGraw-Hill Professional, 1994.
- [2] 杨晓静,赵书强,马燕峰. 采用广域测量信号的 PSS 参数优化设计[J]. 电力自动化设备,2006,26(3):47-50.
- [3] 徐光虎,苏寅生,孙衢,等. 基于特征值分析法的 PSS 最佳安装地点的确定[J]. 继电器,2004,32(8):1-4.
- [4] 韩肖清,梁睿灵,韩肖宁. 基于 PSASP 的 PSS 选址及参数整定的仿真研究[J]. 电力学报,2007,22(4):432-435.
- [5] 芦晶晶,郭剑,田芳,等. 基于 Prony 方法的电力系统振荡模式分析及 PSS 参数设计[J]. 电网技术,2004,28(15):31-34.
- [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.
- [7] 郭成,李群湛,王德林. 基于 Prony 和改进 PSO 算法的多机 PSS 参数优化[J]. 电力自动化设备,2009,29(3):16-21.
- [8] Tse C T, Tso S K. Design optimization of power system stabilisers based on modal and eigenvalue sensitivity analyses [J]. IEEE Pro-C, 1988,135(5):406-415.
- [9] Voumas C D, Papadias B C. Power system stabilization via parameters optimization-application to the hellenic interconnected system [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1987,2(3):615-622.
- [10] Wang K W, Chung C Y, Tse C T, et al. Multimachine eigenvalue sensitivities of power system parameter [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000,15(2):741-747.
- [11] 翁祖泽. 用特征分析法决定多机系统中稳定器的最佳安装地点[J]. 电机工程学报,1982(4):22-31.
- [12] Chung C Y, Wang K W, Tse C T, et al. Probabilistic eigenvalue sensitivity analysis and PSS design in multimachine systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003,18(4):1439-1445.
- [13] Chung C Y, Wang K W, Tse C T, et al. Power system stabilizer (PSS) design by probabilistic sensitivity indexes (PSIs) [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002,17(3):688-693.
- [14] Tse C T, Wang K W, Chung C Y, et al. Parameter optimization of robust power system stabilisers by probabilistic approach [J]. IEEE Proceedings of Generation Transm and Distribution, 2000,147(2):69-75.
- [15] 邱磊,王克文,李奎奎,等. 多频段 PSS 结构设计和参数协调 [J]. 电力系统保护与控制,2011,39(5):102-107.
- [16] 王锡钊,方万良,杜正春. 现代电力系统分析 [M]. 北京:科学出版社,2003.