

文章编号:1671-6833(2005)02-0055-05

电力系统稳定器参数的协调优化

郭建峰, 张建芬, 王克文

(郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450002)

摘 要: 为了优化电力系统稳定器的参数, 在确定性运行方式下利用特征根灵敏度进行电力系统稳定器 PSS 的参数设计, 利用非线性规划技术进行参数的协调优化; 然后在多系统运行方式下, 结合已有的概率灵敏度指标设计 PSS 初始参数, 并利用非线性规划技术进行参数优化. 在一 8 机系统上的试算结果表明: 利用非线性规划技术对 PSS 的参数进行协调, 可以进一步协调控制器参数.

关键词: 特征根灵敏度; 电力系统稳定器; 非线性规划

中图分类号: TM 712 文献标识码: A

0 引言

在电力系统的运行过程中, 存在着许多随机扰动或不确定因素, 例如节点注入功率或网络结构的变化, 测量和估计误差等. 为考虑这些不确定因素的影响, 可采用概率特征根来分析多运行方式下系统的稳定性^[1,2], 并利用概率灵敏度指标对多运行方式下多机系统的电力系统稳定器(PSS) 进行设计^[3], 或使用非线性规划技术对 PSS 的参数进行优化^[4]. 在将该方法实用化的过程中, 需对各个环节进行考查. 概率潮流为概率特征根分析提供发电机的初始状态和节点电压的数字特征. 分析发现, 现有的保留二阶项的概率潮流算法能提供比较准确的均值, 但计算的电压协方差存在较大的误差. 文献[5]对现有的概率潮流计算模型加以改进, 提高了概率潮流的计算精度. 通过对几种可用的概率特征根计算模型的分析, 确定出相对准确的计算模型^[6]. 本文作者进一步分析和考查采用非线性规划技术进行 PSS 参数优化.

文献[4]在多运行方式下, 采用非线性规划的方法对 PSS 的参数进行优化, 取得了一定的进展, 然而优化过程的收敛特性并不是很令人满意. 为了分析收敛特性不理想的原因, 本文作者先在单系统运行方式下进行 PSS 参数设计, 结合其它的 PSS 参数设计方法确定初值. 利用非线性规划技术进行参数的协调优化, 确定利用非线性规划技术的可行性. 接着考虑多运行方式, 在已有的利用

非线性规划技术进行 PSS 参数优化的基础上, 对该系统的 PSS 参数进行协调.

1 优化问题的描述

1.1 单运行方式下的参数优化问题

为了确保系统的动态特性, 特征根应该分布在复平面上指定的范围内, 即对某特征根 $\lambda_k = \alpha_k + j\beta_k$, 满足式(1)和式(2):

$$\alpha_k < \alpha \tag{1}$$

$$\zeta_k > \zeta \tag{2}$$

式中: 阻尼比 $\zeta_k = -\alpha_k / \sqrt{\alpha_k^2 + \beta_k^2}$; α 和 ζ 为选定的门槛值.

根据上述要求, 构造非线性目标函数

$$\min F(\mathbf{K}) = \sum_{\alpha_k > \alpha} (\alpha_k - \alpha)^2 + \sum_{\zeta_k < \zeta} (\zeta_k - \zeta)^2 \tag{3}$$

式中, \mathbf{K} 代表可调参数向量.

1.2 多运行方式下的参数优化问题

多系统运行方式下, 特征根的统计特性可用相应的均值和方差描述. 对某一特征根 $\lambda_k = \alpha_k + j\beta_k$, 若其实部 α_k 具有均值 $\bar{\alpha}_k$ 和标准差 σ_{α_k} , 则 α_k 分布在 $\{\bar{\alpha}_k - 4\sigma_{\alpha_k}, \bar{\alpha}_k + 4\sigma_{\alpha_k}\}$ 范围内的概率为 0.999 93. 可接受的 σ_{α_k} 系数值可以是 3~4^[3], 本文中取 4). 为保证系统的动态特性, 特征根实部及阻尼比的分布边界应满足

$$\begin{cases} \alpha'_k = \bar{\alpha}_k + 4\sigma_{\alpha_k} < 0 \\ \zeta'_k = \bar{\zeta}_k - 4\sigma_{\zeta_k} < 0 \end{cases} \tag{4}$$

收稿日期: 2005-01-28; 修订日期: 2005-03-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50177028)

作者简介: 郭建峰(1977-), 男, 河南省镇平县人, 郑州大学硕士研究生.

也可用标准化的均值来描述

$$\begin{cases} \alpha_k^* = -(\bar{\alpha}_k - \alpha_k) / \sigma_{\alpha_k} \geq 4 \\ \zeta_k^* = -(\bar{\zeta}_k - \zeta_k) / \sigma_{\zeta_k} \geq 4 \end{cases} \quad (5)$$

式中： α_k^* 和 ζ_k^* 分别是特征根阻尼系数和阻尼比的标准化均值。

计及所有不满足要求的特征根，可构成如下优化问题目标函数

$$\min F(\mathbf{K}) = \sum_{\alpha_k^* < 4} (\alpha_k^* - 4)^2 + \sum_{\zeta_k^* < 4} (\zeta_k^* - 4)^2 \quad (6)$$

式中： \mathbf{K} 仍表示可调参数向量。

硬件和运行条件对参数的限制可以表达为

$$K_{j, \min} \leq k_j \leq K_{j, \max} \quad (7)$$

在最优步长的一维搜索中，可以方便地考虑约束条件。

可用非线性规划方法求解该优化问题。

2 概率灵敏度指标

对应于式(4)和(5)，可构成以下两类概率特征根的灵敏度指标。

第 k 个特征根实部上限对第 m 个 PSS 增益 G_m 的概率灵敏度指标^[3]，如式(8)所示：

$$PSI'_{\alpha'_{k,m}} = S'_{\alpha'_{k,m}} = \frac{\partial \alpha'_{k,m}}{\partial G_m} = \frac{\partial \bar{\alpha}_k}{\partial G_m} + 4 \frac{\partial \sigma_{\alpha_k}}{\partial G_m} \quad (8)$$

类似地，阻尼比的概率灵敏度指标^[3]为

$$PSI'_{\zeta'_{k,m}} = S'_{\zeta'_{k,m}} = \frac{\partial \zeta'_{k,m}}{\partial G_m} = \frac{\partial \bar{\zeta}_k}{\partial G_m} - 4 \frac{\partial \sigma_{\zeta_k}}{\partial G_m} \quad (9)$$

这种基于特征根实部上限 α'_k 和阻尼比下限 ζ'_k 的灵敏度称为第一类灵敏度指标，可用来确定 PSS 的最佳安装位置。

标准化均值 α_k^* 和 ζ_k^* 对控制器参数（如增益和时间常数）的灵敏度可以表达为^[4]

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

$$S_{\zeta_k}^* = \frac{\partial \zeta_k^*}{\partial K_m} = \frac{1}{\sigma_{\zeta_k}} \frac{\partial \bar{\zeta}_k}{\partial K_m} + \frac{\bar{\zeta}_k - \zeta_k}{\sigma_{\zeta_k}^2} \frac{\partial \sigma_{\zeta_k}}{\partial K_m} \quad (11)$$

式中： K_m 表示第 m 个控制器参数。这种基于 α_k^* 和 ζ_k^* 的灵敏度称为第二类灵敏度指标，主要用来调整 PSS 的参数。

3 算例分析

3.1 单运行方式下 PSS 的参数优化

所有的发电机均采用五阶模型，在安装 PSS 之前，系统共有 88 个特征根，其中不满足稳定要求的机电振荡模式列于表 1。

表 1 无 PSS 时的系统临界特征根和阻尼比

Tab. 1 Critical eigenvalues and damping ratios without PSS

编号	α	β	ζ
51	-1.908 077 1	16.260 036 0	0.116 5
59	-0.622 866 8	10.756 449 0	0.057 8
61	-0.599 159 4	9.834 641 3	0.060 8
63	-0.596 377 9	8.202 451 3	0.072 5
71	-0.453 546 7	7.057 067 7	0.064 1
77	-0.374 723 1	6.4542 52 0	0.058 0
88	0.000 207 4	3.857 638 0	-0.000 1

在确定性的单运行方式下，仍可用式(8)和式(9)，但不计标准差的灵敏度（即式中右侧的第二项）。各不满足稳定条件的机电模式对 PSS 增益的灵敏度如表 2 所示。

表 2 临界特征根对 PSS 增益的灵敏度

Tab. 2 Sensitivities of critical engenvalues to gains of PSS

参数	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8
α_1	-1.890 5	-0.009 3	0.009 4	-0.001 4	-0.002 9	-0.006 3	0.007 3	0.000 0
ζ_1	0.117 8	0.000 6	-0.000 5	0.000 1	0.000 2	0.000 4	-0.000 5	0.000 0
α_2	-0.002 2	-0.761 7	0.008 4	-0.005 6	-0.009 7	-0.546 7	-0.001 7	-0.000 7
ζ_2	0.000 2	0.075 2	-0.000 8	0.000 5	0.000 7	0.051 2	0.000 2	0.000 1
α_3	-0.015 0	-0.304 7	0.025 2	-0.005 0	-0.010 8	-1.109 4	0.078 8	0.005 3
ζ_3	0.001 6	0.031 7	-0.002 3	0.000 4	0.001 0	0.119 3	-0.008 4	-0.000 4
α_4	-0.000 1	-0.000 3	-0.000 5	-0.642 5	-0.579 0	-0.000 1	0.000 1	0.000 0
ζ_4	0.000 0	0.000 0	0.000 1	0.072 6	0.065 8	0.000 0	0.000 0	0.000 0
α_5	0.003 3	-0.000 0	2.412 4	-0.069 7	-0.155 2	0.000 5	0.025 2	0.000 2
ζ_5	-0.000 4	0.000 0	-0.306 0	0.009 3	0.020 4	-0.000 1	-0.003 7	0.000 0
α_6	-0.001 5	-0.002 0	0.069 2	-0.224 7	-0.485 2	0.015 0	0.722 4	0.003 3
ζ_6	0.000 3	0.000 3	-0.007 7	0.033 5	0.072 1	-0.001 9	-0.105 4	-0.000 5
α_7	0.041 4	0.034 7	0.590 5	-0.127 4	-0.259 4	0.030 9	0.701 3	0.192 3
ζ_7	-0.010 9	-0.008 9	-0.152 6	0.032 9	0.067 1	-0.007 9	-0.181 2	-0.049 7

从表 2 可以看出,模式 1,2,3,4,5,6 和 7 可以通过在发电机 1,2,6,4,3,7 上装设 PSS 来提高稳定性.选择功率偏差信号作为 PSS 的输入信号.参考文献[7]中对 PSS 超前/滞后时间常数的分析,采用两个超前滞后环节,并且所有 PSS 的传递函数为如下形式:

$$F_{PSS}(s)=K_{PSS}\frac{T_w s}{1+T_w s}\cdot\frac{1+T_{1s}}{T_{2s}}\cdot\frac{1+T_{3s}}{T_{4s}}\quad (12)$$

采用根轨迹法确定 PSS 的增益.隔直环节时间常数 T_w 取定值, $T_w=5s$.

参考文献[7]中 PSS 时间常数的设计方法:为保持电路稳定, T_2, T_4 的最小值一般应不小于 40 ms.为使 PSS 在更宽的频率范围内有合适的相位补偿, PSS 的两节超前滞后单元应选取不同的参数.为了使 PSS 适应各种振荡频率,选用的超前滞后环节传递函数应在频率较小时,超前较小,滞后环节滞后较大,整体呈滞后特性;当频率较大时,滞后环节滞后较小,超前环节超前较大,整体呈超前特性,以补偿励磁系统频率特性在低频区滞后较小,高频区滞后过大的问题.

根据上述方法,确定 PSS 初始参数见表 3.加装 PSS 后系统的特征根共有 106 个,其中不满足稳定要求的特征根见表 4.可以看出,除两个机电模式外,又有 3 个实根不稳定.

利用拟牛顿法求解式(3),对控制器的参数进行协调,其中 $\alpha=-0.1, \zeta=0.15$.调整的参数不仅包括 PSS 的参数,还增添了励磁系统的增益,经过优化后的参数见表 5,优化后的特征根见表 6.

表 3 PSS 的初始参数

Tab.3 Initial parameters of PSS

PSS	K_{PSS}	T_w/s	T_1/s	T_2/s	T_3/s	T_4/s
PSS ₁	0.61	5.0	0.250	0.050	0.070	0.200
PSS ₂	0.61	5.0	0.240	0.050	0.055	0.210
PSS ₃	-0.32	5.0	0.525	0.080	0.315	0.300
PSS ₄	0.51	5.0	0.520	0.060	0.155	0.200
PSS ₆	0.33	5.0	0.240	0.060	0.070	0.250
PSS ₇	-0.40	5.0	0.380	0.050	0.095	0.150

表 4 加装 PSS 后的临界特征根

Tab.4 Critical eigenvalues with PSS

编号	α	β	ζ
69	-1.291 05	9.866 29	0.129 75
71	-1.226 87	8.960 59	0.135 65
104	-0.085 63	0.000 00	1.000 00
105	-0.085 22	0.000 00	1.000 00
106	-0.071 61	0.000 00	1.000 00

表 5 优化后的 PSS 参数

Tab.5 Opti mized PSS parameters

PSS	K_{PSS}	T_w/s	T_1/s	T_2/s	T_3/s	T_4/s
PSS ₁	0.612 5	5.0	0.250 0	0.050 0	0.068 7	0.070 0
PSS ₂	0.653 2	5.0	0.240 2	0.050 0	0.039 3	0.070 0
PSS ₃	-0.273 1	5.0	0.524 5	0.080 0	0.303 8	0.090 0
PSS ₄	0.449 5	5.0	0.520 0	0.060 0	0.154 8	0.090 0
PSS ₆	0.413 9	5.0	0.240 4	0.060 0	0.070 6	0.080 0
PSS ₇	-0.173 7	5.0	0.380 0	0.050 0	0.094 3	0.053 0

表 6 优化后的特征根

Tab.6 Eigenvalues after opti mization process

编号	α	β	ζ
54	-3.247 900 3	14.368 819 0	0.220 48
65	-1.809 620 8	3.748 824 6	0.434 72
67	-1.646 527 4	6.587 428 0	0.242 49
69	-1.546 756 3	9.866 328 1	0.154 88
71	-1.367 865 0	8.954 171 8	0.151 01
73	-1.208 877 1	6.999 201 6	0.170 20
85	-0.547 875 2	3.580 508 8	0.151 26
105	-0.086 537 3	0.000 673 1	0.999 97
106	-0.085 485 6	0.000 000 0	1.000 00

经过优化,系统的稳定特性得到改善.主要关心的机电模式的阻尼系数和阻尼比都满足稳定要求.与文献[3]相比,由于参数初值更合理,且多增加了一个 PSS,收敛特性比较满意.因此用非线性规划方法可以实现控制器参数的进一步协调.

3.2 多运行方式下 PSS 的参数优化

所有发电机均采用五阶模型,8 机系统共有 88 个特征根,其中 38 个实根和 25 对复根.7 个机电模式的概率结果如表 7 所示.

根据式(8)和(9)计算各临界特征根对 PSS 增益的灵敏度,结果如表 8 所示.由表 8 可知,在第 1,2,6,5 和 3 上装设 PSS,分别可以改善模式 1,2,3,4 和 6 的稳定性.模式 7 不能仅仅依赖于在第 6 台发电机上装设的 PSS 来提高稳定性,因为该 PSS 已经用来改善模式 3,而且模式 7 和模式 3 对第七台发电机的 PSS 的灵敏度指标的符号相反.因此,可以通过第 3 和第 7 台发电机上的 PSS 来改善模式 7 的稳定性.

考虑相位补偿后,确定 PSS 的初始参数.装设 PSS 后各临界特征根的概率特性见表 9.用非线性规划方法进行参数优化,各机电模式的概率特性见表 10,收敛特性见图 2.从表 10 和图 2 可知,经过参数优化,不仅所有的特征根均能够达到满意的稳定要求,且在该算例下,具有较好的收敛特性.

表 7 无 PSS 时的机电模式

Tab. 7 Electromechanical modes without PSS

编号	$\bar{\alpha}$	β	σ_{α}	α	P_{α}	ζ	σ_{ζ}	ζ^*	P_{ζ}
51	-1.731	15.853	0.043 2	40.11	1.000 0	0.108 6	0.003 3	2.61	0.995 5
55	-0.758	11.112	0.082 5	9.19	1.000 0	0.068 0	0.007 1	-4.47	0.000 0
69	-0.564	9.832	0.048 9	11.53	1.000 0	0.057 3	0.003 7	-11.40	0.000 0
63	-0.637	7.908	0.017 1	37.14	1.000 0	0.080 3	0.003 6	-5.56	0.000 0
59	-0.650	7.530	0.098 4	6.60	1.000 0	0.086 0	0.011 1	-1.26	0.103 8
75	-0.420	6.482	0.030 4	13.84	1.000 0	0.064 7	0.004 7	-7.56	0.000 0
88	-0.010	3.823	0.011 6	0.86	0.805 1	0.002 6	0.003 0	-32.22	0.000 0

表 8 临界特征根对 PSS 增益的第一类灵敏度指标

Tab. 8 First type of sensitivity indices of critical eigenvalues to PSS gains

参数	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8
α_1	-2.315 4	-0.009 1	0.008 7	-0.001 4	-0.003 1	-0.006 3	0.006 4	0.000 1
ζ_1	0.137 8	0.000 5	-0.000 5	0.000 1	0.000 2	0.000 4	-0.000 5	-0.000 0
α_2	-0.007 2	-1.266 0	0.015 6	-0.004 1	-0.006 2	-0.449 6	-0.014 5	-0.000 6
ζ_2	0.000 7	0.123 5	-0.001 7	0.000 3	0.000 5	0.042 2	0.001 2	0.000 1
α_3	-0.002 5	0.041 8	0.019 1	-0.000 3	-0.000 5	-1.990 3	0.013 1	0.008 2
ζ_3	0.000 3	-0.003 1	-0.002 4	0.000 0	0.000 1	0.226 2	-0.003 3	-0.000 7
α_4	-0.0	-0.000 4	0.006 5	-0.618 0	-0.709 6	-0.000 2	-0.001 7	-0.000 0
ζ_4	0.000 0	0.000 0	-0.001 7	0.063 6	0.076 2	0.000 0	0.000 2	0.000 0
α_5	0.004 9	0.000 4	2.850 5	-0.130 3	-0.076 8	0.005 2	-0.030 5	0.000 4
ζ_5	-0.000 6	-0.000 1	-0.337 0	0.016 4	0.010 7	-0.000 7	0.002 1	-0.000 0
α_6	-0.001 9	-0.001 6	0.082 7	-0.226 9	-0.482 5	0.012 0	0.734 7	0.004 3
ζ_6	0.000 4	0.000 3	-0.009 4	0.033 1	0.070 1	-0.001 0	-0.104 6	-0.000 6
α_7	0.153 6	0.038 7	1.573 5	-0.294 8	-0.611 1	3.673 4	1.649 6	1.010 9
ζ_7	-0.024 4	-0.005 7	-0.247 3	0.046 2	0.095 9	-0.978 9	-0.254 9	-0.175 6

说明:绝对值大者为黑体.

表 10 优化后的特征根

Tab. 10 Eigenvalues after optimization computation

编号	$\bar{\alpha}$	β	σ_{α}	α^*	P_{α}	ζ	σ_{ζ}	ζ^*	P_{ζ}
59	-1.761 6	7.330 8	0.181 3	9.718 4	1.000 0	0.233 7	0.018 6	7.204 5	1.000 0
62	-1.559 7	9.119 4	0.133 6	11.675 3	1.000 0	0.168 6	0.010 2	6.719 7	1.000 0
66	-1.434 3	10.675 2	0.034 0	42.144 6	1.000 0	0.133 2	0.005 3	6.292 7	1.000 0
69	-1.212 3	9.677 9	0.045 3	26.755 6	1.000 0	0.124 3	0.002 7	9.048 0	1.000 0
72	-1.011 6	4.197 4	0.158 9	6.366 5	1.000 0	0.234 3	0.033 5	4.008 7	1.000 0
74	-0.990 3	2.446 9	0.125 0	7.922 7	1.000 0	0.375 2	0.027 2	10.127 7	1.000 0
76	-0.837 5	7.742 9	0.015 0	55.964 6	1.000 0	0.107 5	0.000 9	8.345 6	1.000 0

表 9 加 PSS 后的临界特征根

Tab. 9 Critical eigenvalues with PSSs

$\bar{\alpha}$	β	ζ	α^*	ζ^*
-0.635 0	0.672 5	0.686 5	3.998 8	13.928 7
-0.577 8	3.281 5	0.173 4	5.380 8	1.951 6

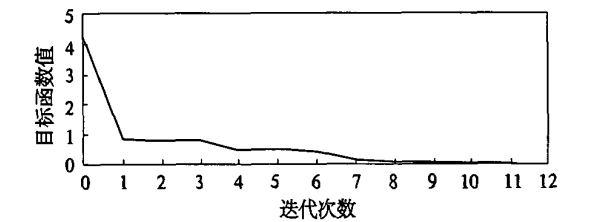


图 2 目标函数的收敛特性

4 结论

本文作者在确定性运行方式下考查利用非线性规划技术进行 PSS 参数优化的可行性,接着考虑多运行方式,对一 8 机系统的 PSS 参数进行设计和优化.参考已有的 PSS 参数初值确定方法,结合相位补偿的概念,确定 PSS 参数的初值.与文献 [4] 相比,多加了一个 PSS,但收敛特性改善很多.在 8 机系统上优化的结果表明,利用非线性规划技术对 PSS 参数进行协调,可以进一步改善系统的稳定性.

Fig. 2 Convergence character of objective function

参考文献:

[1]

WANG K W, TSE C T, TSANG K M. Algorithm for power system dynamic stability studies taking account of the variation of load power[J]. Electric Power Systems Research, 1998, 46(3) : 221~227.

[2]

王克文, 钟志勇, 谢志棠, 等. 混合使用中心矩与累加量的电力系统概率特征根分析方法. 中国电机工程学报, 2000, 20(5) : 37~41.

[3]

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器参数设计[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(11) : 20~23.

[4]

TSE C T, WANG K W, CHUNG C Y, et al. Parameter optimization of robust power system stabilisers by probabilistic approach[J]. IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., 2000, 147(2) : 69~75.

[5]

张建芬, 王克文, 宗秀红, 等. 几种概率潮型的准确性比较分析. 郑州大学学报(工学版), 2003, 24(4) : 32~36.

[6]

ZHANG Jian - fen, TSE C T, WANG Ke - wen, et al. Studies of the computational error in the probabilistic eigenvalue analysis[R]. Hong Kong: The 2nd International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies, 2004.

[7]

方思立, 朱 方. 电力系统稳定器的原理及其应用[M]. 中国电力出版社, 1996.

Coordination of Power System Stabilizers

GUO Jian - feng, ZHANG Jian - fen, WANG Ke - wen

(College of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract : Under deterministic system operating condition, PSS parameters are designed by using the eigenvalue sensitivity approach to investigate the feasibility of parameters optimization using the nonlinear programming technique. With multi - operation conditions considered the parameters optimization by the nonlinear programming technique is tested in which the initial parameters are determined by the nonlinear programming. Testing computation on an eight - machine system indicates that the controller parameters can be further optimized.

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

(上接第 46 页)

Study on Best Variable Pairs Selection of Multivariable Unified Power Flow Controller

ZHANG Fang, FANG Da - zhong, SONG Wen - nan

(School of Electrical Engineering & Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract : Unified Power Flow Controller (UPFC) is a multivariable controller with multiple control input and output variables, therefore interactions inevitably exist among multiple control channels, which are formed between these input and output variables. According to control theory, the degree of interactions of a multivariable control system has a close relationship with selections of variable pairs. This paper applies the relative gain analysis (RGA) method in control theory to select the best input/output pairs for UPFC controller; hence the selection of the best variable pairs is based on firm theory foundation. The well selected input/output pairs make the interactions among UPFC multiple control channels very weak, therefore there is no need to take decoupling measures in the design of UPFC controller, which makes the controller design simplified greatly. Simulation results on the New England test system show that UPFC has the perfect steady state control performance under the control scheme of the best variable pairs.

Key words : UPFC ; multivariable controller ; best variable pairs ; relative gain analysis (RGA)