

基于等值单机无穷大系统的多机系统 PSS 设计

贾继灏¹, 马丽丽¹, 刘宪林²

(1.河南安阳供电公司, 河南 安阳 455000; 2.郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 多机电力系统 PSS 的合理设计对于抑制低频振荡至关重要。基于单机无穷大系统的 PSS 设计方法简单明了, 但需要解决等值单机无穷大系统的求取问题。提出了一种直接利用多机系统 Phillips-Heffron 模型线性化矩阵对角元素形成等值单机无穷大系统 Phillips-Heffron 模型的新方法, 并采用相位补偿法进行 PSS 设计。与基于发电机间的节点导纳矩阵求取等值单机无穷大系统的方法相比, 新方法省去了各机组等值系统参数和线性化系数的计算工作。基于等值单机无穷大系统的 PSS 设计方法简洁, 物理概念清晰, 计算量小, 便于现场应用。算例比较表明, 基于等值单机无穷大系统设计的 PSS 增强系统阻尼的效果不比一些统一协调设计法的差。

关键词: PSS; 低频振荡; 单机无穷大系统; 特征值分析

PSS design in a multi-machine system based on equivalent single machine infinite bus power system

JIA Ji-hao¹, MA Li-li¹, LIU Xian-lin²

(1. Power Supply Company of Anyang, Anyang 455000, China;

2. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Appropriate design of PSS is very significant to damp system low-frequency oscillation in a multi-machine power system. Though some PSS design methods based on the single machine infinite bus power system are simple and understandable, there is problem in getting the equivalent model. A new approach, forming Phillips-Heffron model for equivalent single machine infinite bus power system directly using the linearization matrix diagonal element of Phillips-Heffron model for multi-machine systems and designing PSS by phase compensation method, is proposed. Compared to the algorithm of getting equivalent single machine infinite bus power system based on bus admittance matrix between generators, it isn't needed to calculate the parameters and linearization coefficients of every equivalent single machine infinite bus power system using the proposed approach. The method of PSS design based on equivalent single machine infinite bus power system is brief, with clear physical notion and little computational requirement. Testing computation and comparison show that the effect of enhancing damping by the method of designing PSS based on equivalent single machine infinite bus power system is not poorer than that of some uniform and coordinate methods.

Key words: PSS; low-frequency oscillator; single machine infinite bus power system; eigenvalue analysis

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)23-0070-05

0 引言

电力系统稳定器 (PSS) 作为增加电力系统机电振荡阻尼的有效措施得到了广泛的应用^[1-3]。但多机系统的 PSS 设计问题仍然没有得到很好解决。多机系统 PSS 的设计思路分为两种。一种是基于全系统模型的统一协调设计, 如根据 PSS 作用敏感度的设计法^[4], 极点配置法^[5], 基于遗传算法的协调优化法^[6,7]等。此外, 与 PSS 并行发展的还有基于最优分散协调思想的最优励磁反馈控制设计法等^[8]。统一协调设计方法充分利用全系统信息, 具有较好的效果。但多数统一协调设计方法都面临所需数据量大、算法复杂、计算量大等问题, 且部分方法物理

概念不清晰, 不便于现场技术人员理解和使用。另一种思路是把各机组与系统的关系近似等值成单机无穷大系统, 然后基于单机无穷大系统设计该机组的 PSS。基于单机无穷大系统设计 PSS 的方法非常丰富, 如极点配置法^[9]、相位补偿法、根轨迹法^[10], 自适应 PSS 设计法^[11,12]等。基于单机无穷大系统设计 PSS 的优点是物理概念清晰, 计算简单, 方法成熟, 便于现场人员对 PSS 进行整定。对指定机组求取等值单机无穷大系统是应用该方法的前提, 此问题似乎简单, 但相关分析很少^[10,13], 致使现场人员往往凭经验来确定等值单机无穷大系统的参数, 难以保证 PSS 参数设置的合理性。

本文分析了基于系统节点导纳矩阵的等值单机

无穷大系统求取方法, 提出了一种基于多机系统 Phillips-Heffron 模型线性化矩阵的等值单机无穷大系统求取方法, 基于这两种等值单机无穷大系统采用传统的相位补偿法设计各机组的 PSS, 并将所得结果与统一协调设计法的结果进行了比较。

1 基于单机无穷大系统的 PSS 设计

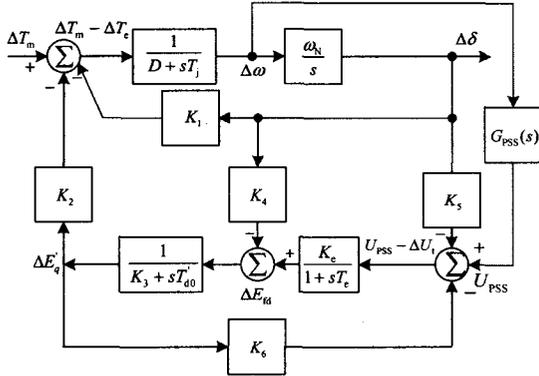


图 1 单机无穷大系统线性化模型

Fig.1 Linearization model for single machine infinite bus power system

单机无穷大系统线性化模型^[14]如图 1 所示。图中, 励磁系统用含 K_e 和 T_c 的一阶惯性环节表示; $K_1 \sim K_6$ 则为线性化系数, 表达式为:

$$\begin{cases} K_1 = \frac{U \sin \delta}{x_e + x_d'} (x_q - x_d') I_q + \frac{U \cos \delta}{x_e + x_q} [E_q' - (x_d' - x_q) I_d] \\ K_2 = I_q + \frac{x_q - x_d'}{x_e + x_d'} I_q \\ K_3 = 1 + \frac{x_d - x_d'}{x_e + x_d'} \\ K_4 = \frac{x_d - x_d'}{x_e + x_d'} U \sin \delta \\ K_5 = -\frac{U_{tq} U \sin \delta}{(x_e + x_d') U_{10}} x_d' + \frac{U_{ld} U \cos \delta}{(x_e + x_q) U_{10}} x_q \\ K_6 = \frac{x_e U_{tq}}{(x_e + x_d') U_{10}} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中 x_e 为发电机外接无穷大母线间的电抗, U 为无穷大母线电压, U_t 为发电机端电压, I 为发电机定子电流, 各运行参数均取工作点的数值。

U_{PSS} 是 PSS 输出信号。设 PSS 以转速偏差 $\Delta\omega$ 为输入信号, 其传递函数为

$$G_{PSS}(s) = K_{PSS} \left(\frac{sT}{1+sT} \right) \left(\frac{1+sT_1}{1+sT_2} \right)^k \quad (2)$$

对单机无穷大系统, 通常采用传统的相位补偿法设计 PSS^[2,13]。设计时, 一般取 $s = j\omega_n$

($\omega_n = \sqrt{K_1 \omega_N / T_j}$), 并根据工程经验令机电模式的期望阻尼比 $\zeta_n = 0.3$, 复位时间常数 $T = 3$ s。

2 多机系统中求取等值单机无穷大系统的方法

对多机电力系统中指定机组的 PSS 设计, 可将该机与系统近似等值为单机无穷大系统, 再按照上述单机无穷大系统线性化模型和 PSS 的设计方法进行设计。显然, PSS 的设计效果与等值单机无穷大系统的求取方法密切相关。

2.1 基于 K 阵的等值法

n 机系统的线性化模型如图 2 所示^[15]。图中系数 K_{kij} 为 n 阶线性化系数矩阵 $K_1 \sim K_6$ ($k=1,2,\dots,6$) 矩阵的元素。

$K_1 \sim K_6$ 阵中的非对角元素反映不同机组之间的动态关联, 而对角元素则包含有不同机组之间的静态关联信息。据此, 本文提出一种直接获取等值单机无穷大系统 Phillips-Heffron 模型的新方法, 即忽略 $K_1 \sim K_6$ 阵中的非对角元素的影响, 直接将其对角元素 $K_{1ii} \sim K_{6ii}$ 作为图 1 中线性化系数 $K_1 \sim K_6$ 。

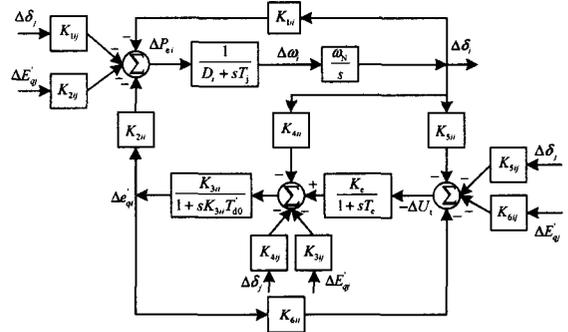


图 2 多机电力系统线性化模型

Fig.2 Linearization model for multi-machine power systems

由于求取多机系统的特征根、校核 PSS 设计效果必然需要计算 $K_1 \sim K_6$ 阵。采用本方法直接利用 $K_1 \sim K_6$ 阵的对角元素即可进行 PSS 设计, 没有附加的计算量, 非常简便。

2.2 基于 Y 阵的等值法

消去中间节点、只保留发电机节点的多机系统节点电压方程为

$$I = YU_t \quad (3)$$

式中:

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \dots & Y_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix}$$

文[13]提出用自导纳 Y_{ii} 近似计算第 i 台机与无穷大母线间的联系阻抗及等值无穷大母线的电压, 形成如图 3 所示的等值单机无穷大系统。

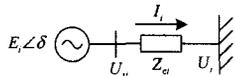


图 3 等值单机无穷大系统

Fig.3 Equivalent single machine infinite bus power system

图中

$$Z_{ci} = \frac{1}{Y_{ii}} \quad (4)$$

$$U_i = U_{ii} - I_i Z_{ci} \quad (5)$$

式中: 机端电压 U_{ii} 和定子电流 I_i 根据潮流计算结果确定。

显然, 这种等值方法与系统规模和发电机与系统联系是否紧密有关, 系统规模越大、发电机与系统联系越弱, 等值效果越好。

基于 Y 阵求取等值单机无穷大系统及进行 PSS

设计, 不仅需要计算等值参数, 还要逐机进行线性化系数 $K_1 \sim K_6$ 的计算, 而校核 PSS 设计效果还要计算 $K_1 \sim K_6$ 矩阵。因此, 其不如上述基于 K 阵的直接获取等值单机无穷大系统 Phillips-Heffron 模型的方法简便。

3 算例及分析

本文以中国电科院 6 机系统和 New England 10 机系统为算例, 基于上述两种方法分别求取指定机组的等值单机无穷大系统并设计 PSS。然后在多机系统线性化模型中加入 PSS, 计算系统的特征根, 分析机电模式的阻尼比。并与直接基于多机系统模型的全局 PSS 或最优励磁控制器的设计效果进行了比较。比较指标采用通行的最弱机电模式的阻尼比, 即所谓最小阻尼比^[6,7]。

3.1 6 机系统算例

中国电科院 6 机系统接线图和详细数据见文献[8]。该系统 1# 机为等值机, 6# 机为调相机, 二者不需设计 PSS。加装 PSS 前后系统的机电模式示于表 1。由表可见, 加装 PSS 前系统虽然稳定, 但最小阻尼比仅为 0.0141。加入基于前述两种等值方法所设计的 PSS 后, 所有机电模式的阻尼都有改善, 其中最小阻尼比也分别提高到为 0.041 和 0.043, 效果均很显著。目前笔者尚无查到可供直接比较的基于多机模型的 6 机系统 PSS 优化设计结果。表 1 中列出采用最优分散协调励磁控制器^[8]的控制效果, 以资对比。

表 1 6 机系统机电模式

Tab.1 Modes of six machines systems

振荡模式编号	加装 PSS 前			基于 K 阵的等值法		基于 Y 阵的等值法		最优分散协调控制	
	振荡模式	强相关机组	阻尼比	振荡模式	阻尼比	振荡模式	阻尼比	振荡模式	阻尼比
1	-0.282 6±j20.078	2	0.014 1	-4.537 2±j18.315	0.240 5	-15.649±j21.947	0.580 6	-0.220 5±j24.072	0.009 0
2	-0.382 3±j11.909	5	0.032 1	-6.368 0±j12.387	0.457 2	-4.122 5±j13.473	0.292 6	-3.192 4±j10.7603	0.284 4
3	-0.174 5±j10.245	3	0.017 1	-0.406 29±j9.892	0.041 0	-0.425 18±j9.889	0.043 0	-2.896 8±j9.3825	0.295 0
4	-0.384 94±j9.943	4	0.038 7	-4.587 9±j9.524	0.434 0	-4.797 2±j10.365	0.420 0	-2.184 9±j6.5905	0.314 7
5	-0.372 97±j7.889	4	0.047 2	-0.924 87±j6.892	0.133 0	-1.567 0±j7.167	0.213 6	-1.487 6±j5.1122	0.279 4

3.2 10 机系统算例

New England 10 机 39 节点系统接线图和详细数据见文献[5]。该系统 6# 机为等值机, 不需设计 PSS。加装 PSS 前后系统的机电模式示于表 2。由表可见, 加装 PSS 前, 系统有 4 个不稳定模式。加入基于前述两种等值方法所设计的 PSS 后, 系统成为稳定系统, 且最小阻尼比也分别达到 0.165 1 和 0.171 1, 效果良好。文献[6]采用三种全局优化算法

进行本算例系统的 PSS 设计, 其中遗传算法的效果最好列于表 2, 其最小阻尼比为 0.128 1。另外, 文献[5]采用极点配置法对本算例系统设计 PSS, 效果也不如本文方法。限于篇幅, 具体数据恕不列写。

在多机系统中, PSS 往往是根据系统具体情况按照一定规则逐步增加投入数量的。这时, 可能出现新增 PSS 恶化其他机电模式阻尼比甚至导致系统不稳定的现象。本算例 4 个不稳定的机电模式 4、8

和{6, 9}分别与 1#、5#和 10#号机强相关, 同时在这 3 台机上配置本文设计的 PSS, 然后根据 PSS 作用下的最小阻尼比机电模式与机组的强相关性在对应机组上添加 PSS, 如此类推, 直到全部机组均配置上 PSS。结果示于表 3。由表可见, 采用本文方法所设计的 PSS, 随着 PSS 数量的增加系统最小阻

尼比也逐步增加, 没有出现系统阻尼恶化的现象。对 6 机系统, 结果类似。

由上可见, 对以上两算例而言, 采用两种基于等值单机无穷大系统的 PSS 设计方法设计多机系统 PSS 都很有效, 且效果不比基于多机系统模型的全局设计方法差。

表 2 加装 PSS 前后的 10 机系统机电模式

Tab.2 Modes of ten machines systems without PSS and with PSS

振荡模式编号	加装 PSS 前			基于 K 阵的等值法		基于 Y 阵的等值法		遗传算法全局优化	
	振荡模式	强相关机组	阻尼比	振荡模式	阻尼比	振荡模式	阻尼比	振荡模式	阻尼比
1	-0.263 1±j7.762 6	4	0.033 9	-2.193 4±j7.328 6	0.286 7	-1.773 2±j7.363 4	0.234 1	-1.712±j9.011	0.186 7
2	-0.313 5±j7.778 8	7	0.040 3	-1.727 0±j7.338 3	0.229 1	-2.034 4±j7.227 0	0.271 0	-1.593±j9.163	0.171 3
3	-0.299 6±j7.630 1	7	0.039 2	-1.942 8±j7.222 4i	0.259 8	-2.078 7±j7.185 6	0.277 9	-1.120±j8.671	0.128 1
4	0.010 6±j6.430 0	1	-0.001 7	-1.195 6±j6.409 4	0.183 4	-1.366 5±j6.257 6	0.213 4	-1.160±j7.465	0.153 6
5	-0.216 8±j6.542 1	2	0.033 1	-1.569 0±j6.082 0	0.249 8	-1.633 0±j6.082 9	0.259 3	-0.939±j6.998	0.133 0
6	0.096 7±j5.519 1	10	-0.017 5	-1.211 0±j5.771 2	0.205 4	-1.254 2±j5.719 5	0.214 2	-1.924±j7.257	0.256 3
7	-0.114 4±j6.121 5	8	0.018 7	-0.871 4±j5.204 4	0.165 1	-0.891 6±j5.135 3	0.171 1	-1.177±j6.294	0.183 8
8	0.040 2±j5.756 5	5	-0.007 0	-1.062 1±j5.388 3	0.193 4	-1.111 4±j5.344 4	0.203 6	-1.414±j5.657	0.242 5
9	0.024 5±j3.136 9	10	-0.007 8	-0.485 8±j2.754 7	0.173 7	-0.506 6±j2.703 5	0.184 2	-0.834±j3.385	0.239 2

表 3 10 机系统装设 PSS 顺序及系统最小阻尼比

Tab.3 PSS installing order and the minimum damping ratio with PSS in the ten-machine system

装设 PSS 的机组顺序	1,5,10	2	4	9	7	3	8
基于 K 阵的等值法	0.033 096	0.039 815	0.044 61	0.054 786	0.071 478	0.105 99	0.165 14
基于 Y 阵的等值法	0.033 096	0.039 729	0.044 469	0.055 282	0.069 661	0.118 92	0.171 07

4 结论

(1) 本文提出了一种基于多机系统 Phillips-Heffron 模型 $K_1 \sim K_6$ 矩阵对角元素的等值单机无穷大系统的求取方法。与基于 Y 阵的方法相比, 这一方法计算量小, 易于嵌入多机系统特征根计算分析程序, 非常简便。

(2) 基于等值单机无穷大系统的相位补偿多机系统 PSS 设计方法概念清晰, 计算量小, 简单易行, 便于工程应用。算例表明, 其效果不比算法复杂且计算量大的基于多机模型的一些 PSS 全局优化方法差。

参考文献

- [1] Kundur P, Klein M, Rogers G J, et al. Application of Power System Stabilizers for Enhancement of Overall System Stability[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4(2):614-626.
- [2] 余耀南. 动态电力系统[M]. 何大愚, 刘肇旭, 周孝信, 译. 北京: 水利水电出版社, 1985.
- [3] YU Yao-nan. Dynamic Power Systems[M]. HE Da-yu,

LIU Zhao-xu, ZHOU Xiao-xin, Trans. Beijing: The Public of Water Conservancy and Electric Power, 1985.

- [3] Larson E V, Swann D A. Applying Power System Stabilizers Part I: General Concept[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(6):3017-3024.
- [4] 周二专, 王宗淦, 陈寿荪. 多机电力系统 PSS 设计综合理论和方法研究[J]. 中国电机工程学报, 1988, 8(5):28-36.
- [5] ZHOU Er-zhuan, WANG Zong-gan, CHEN Shou-sun. Theory and Method for Designing and Synthesizing PSS in Multimachine Power Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 1988, 8(5):28-36.
- [5] de Araujo P B, Zanetta Jr L C. Pole Placement Method Using the System Matrix Transfer Function and Sparsity[J]. Electrical Power & Energy Systems, 2001, (23): 173-178.
- [6] Zhang P, Coonick A H. Coordinated Synthesis of PSS Parameters in Multi-machine Power Systems Using the Method of Inequalities Applied to Genetic Algorithms[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2):811-816.
- [7] 牛振勇, 杜正春, 夏道止. 基于进化策略的多机系统 PSS 参数优化[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2):22-27.

- NIU Zhen-yong, DU Zheng-chun, XIA Dao-zhi. Parameter Optimization of Multi-machine Power System Stabilizers Using Evolutionary Strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 22-27.
- [8] 韩英铎, 王仲鸿, 陈淮金. 电力系统最优分散协调控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
HAN Ying-duo, WANG Zhong-hong, CHEN Huai-jin. Optimization Decentralized Control of Power System[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.
- [9] Chow J H, Sanchez Gasca J J. Pole-Placement Designs of Power System Stabilizers[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4(1): 271-277.
- [10] 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. The Theory and Application of PSS[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1996.
- [11] Joze Ritonja, Drago Dolinar, Bojan Grcar. Design of an Adaptive Power System Stabilizer[J]. IEEE Trans on International Symposium, 1999, 3(12): 1306-1311.
- [12] 王海风, 韩祯祥. 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): 1-10.
WANG Hai-feng, HAN Zhen-xiang. Adaptive Power System Stabilizer Design in Frequency Domain[J]. Proceedings of the CSEE, 1992, 12(6): 1-10.
- [13] 安德逊 M, 佛阿德 A A. 电力系统的控制与稳定翻译
- 组译 电力系统的控制与稳定(第一卷)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1979.
- Anderson P M, Fouad A A. Team of Power System Control and Stability Translate, Power System Control and Stability[M]. Volume I. The Public of Water Conservancy and Electric Power, 1979.
- [14] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
NI Yi-xin, CHEN Shou-sun, ZHANG Bao-lin. Theory and Analysis of Dynamic Electric Power System[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [15] Liu Q, Zhou S X, Feng Z H. Using Decoupled Characteristic in the Synthesis of Stabilizers in Multi-machine Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1987, 2(1): 31-36.

收稿日期: 2009-06-01

作者简介:

贾继灏(1981-), 男, 硕士研究生, 现在从事输变电运行部工作; E-mail: jihaoj@yahoo.com.cn

马丽丽(1982-), 女, 硕士研究生, 现在从事变电检修工作;

刘宪林(1955-), 男, 教授, 现从事电力系统分析与控制和电力电子与电力传动方面的科研与教学工作。

(上接第 69 页 continued from page 69)

- TAI Neng-ling, HOU Zhi-jian, LI Tao, et al. New Principle Based on Wavelet Transform for Power System Load Forecasting[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 45-50 (in Chinese).
- [7] Fryzlewicz P, Bellegem S V, Sachs R V. Forecasting Non-stationary Time Series by Wavelet Process Modeling[J]. Annals of the Institute of Statistical Mathematics, 2003, 55(4): 737-764.
- [8] 李天云, 高磊, 聂永辉, 等. 基于经验模式分解处理局部放电数据的自适应直接阈值算法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(15): 29-34.
LI Tian-yun, GAO Lei, NIE Yong-hui, et al. A New Adaptive Direct-threshold Algorithm to Partial Discharge Data Processing Based on Empirical Mode Decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(15): 29-34.
- [9] 牛东晓, 李媛媛, 乞建勋, 等. 基于经验模式分解与因素影响的负荷分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 96-102.
NIU Dong-xiao, LI Yuan-yuan, QI Jian-xun, et al. A Novel Approach for Load Analysis Based on EMD and Influencing Factors[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(16): 96-102.
- [10] 祝志慧, 孙云莲, 季宇, 等. 基于 EMD 和 SVM 的短期负荷预测[J]. 高电压技术, 2007, 33(5): 118-122.
ZHU Zhi-hui, SUN Yun-lian, JI Yu, et al. Short-term Load Forecasting Based on EMD and SVM[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(5): 118-122.
- [11] Huang N E, Shen Z, Long S R. The Empirical Mode Decomposition Method and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Nonstationary Time Series Analysis[A]. in: Proceeding of the Royal Society of London, Series A[C]. 1998. 454: 903-955.
- [12] Balocchi R, Menicucci D, Varanini M. Empirical Mode Decomposition to a Approach the Problem of Detecting Sources from a Reduced Number of Mixtures[A]. in: Proceeding of the 25th Annual International Conference of the IEEE EMBS[C]. Cancun Mexico: 2003.

收稿日期: 2008-12-15; 修回日期: 2009-01-16

作者简介:

郑连清(1964-), 男, 博士研究生, 教授, 主要研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用;

郑艳秋(1983-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为短期电力负荷预测. E-mail: zyqq1983@126.com