

基于改进 Prony 算法对 STATCOM 暂态稳定性模型的研究

赵乃卓¹, 于贺¹, 孙绍官²

(1. 辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105; 2. 北京品锐科技有限公司, 北京 100041)

摘要: STATCOM 控制器的详细模型在验证稳定性时存在很多困难。采用暂态稳定性模型 (TS 模型) 来代替详细模型, 并用改进 Prony 算法来提取电力系统的参数, 避免了计算幅值和相位时精度不高的问题, 克服了传统算法抗干扰较差的问题。在 PSCAD/EMTDC 中对详细模型和 TS 模型进行标准控制及辅助控制分析, 仿真结果表明, 提出的 TS 模型和改进的 Prony 算法能有效地解决控制器稳定性分析复杂的问题。

关键词: STATCOM; 暂态稳定性模型; 详细模型; Prony 算法; 标准控制; 辅助控制

Study on transient stability model of the STATCOM based on improved Prony algorithm

ZHAO Nai-zhuo¹, YU He¹, SUN Shao-guan²

(1. Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China;

2. Beijing PIN RUI Technology Company, Beijing 100041, China)

Abstract: Detailed model of STATCOM controller have many difficulties in stability validation. This paper adopts the transient stability (TS) model instead of the detailed model and uses improved Prony algorithm to extract the parameters of the power system. It avoids low accuracy of amplitude and phase calculated and overcomes the shortcoming in weak anti-interference ability of traditional algorithm. Standard control and supplementary control analysis of the detailed model and TS model is made in PSCAD/EMTDC. Simulation result show that TS model and the improved Prony method can solve the complex problem of controller stability analysis effectively.

Key words: STATCOM; TS model; detailed model; Prony method; standard control; auxiliary control

中图分类号: TM743

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)09-0008-06

0 引言

近些年随着电网互联越来越频繁, 电力故障信号的分析处理至关重要, 尤其是静止同步补偿器 (STATCOM)。STATCOM 是柔性交流输电技术的主要装置之一, 设计 STATCOM 控制器既要考虑到负荷的需求、供应水平、调度模型的不确定性, 还要考虑到电网电压、相角、频率等因素的稳定性及控制方法, 一旦 STATCOM 控制器发生故障, 势必对电网造成一定的影响, 所以验证 STATCOM 模型的稳定性是非常重要的^[1-2]。验证 STATCOM 模型的稳定性存在很多困难, 分析的繁琐也给计算带来巨大的挑战, 因此简化功率源和暂态稳定性的模型可以大大减少分析和计算所带来的负担, 同时对实测数据分析、提取电力系统参数对验证 STATCOM 模型也是必不可少的。通常分析暂态信号参数的方法有快速傅立叶变换法 (FFT)、自回归谱估计法

(AR)、小波算法、Prony 法等^[3-6]。文献[3]的 FFT 法主要存在采样时间长、频率分辨率低的缺点; 文献[4]的小波算法虽然能反映信号的时变特性, 但存在采样时间长、小波难以选取的问题; 文献[5]的 AR 谱估计法频率分辨率高, 但谱峰位置容易受到初相位的影响, 而 Prony 算法能准确地描述故障暂态信号特征, 具有数据需求量小的优点, 但计算复杂。

针对以上问题, 本文首先对 STATCOM 控制器^[7]采用简化的暂态稳定性模型 (TS 模型), 通过标准控制和附加控制在时域信号中与详细模型进行比较, 通过不同控制方法的比较, 验证整个模型系统中简化模型的作用。由于 Prony 算法计算比较复杂, 所以本文利用神经网络计算的快速性, 对 Prony 算法进行改进。通过在时域信号中对 TS 模型和详细模型的仿真, 验证改进算法具有较快、准确地提取相应参数, 同时也验证了 TS 模型的可行性, 避免了复杂的模型或者基于矩阵特征值建模等分析方

法带来的不便。

1 STATCOM 建模

STATCOM 主要的控制方法是采用 PWM 控制, 它是通过控制相角和控制器输出的电压来实现的, 具体的控制方法如图 1 所示。虽然 PWM 控制能减小低频谐波分量, 但是开关器件的开断频率较高, 开关损耗较大, 对电力传输系统存在不利的因素。

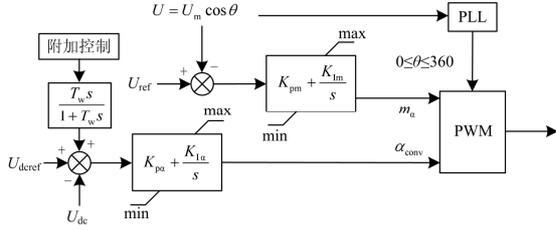


图 1 STATCOM 的 PWM 控制框图

Fig. 1 STATCOM block diagram with PWM control

针对以上问题, TS 模型越来越被广泛的应用, TS 模型的特点在于全局是一种复杂的非线性函数, 局部采用简单的线性函数, 模型当中没有变换器的开关现象^[8]。本文 TS 模型是通过其他的 TS 模型改进而得到的, 控制方法如图 2 所示, 具体的控制方法是在基波频率下控制器交流功率 P 和直流功率 P_{dc} 平衡状态下进行的。

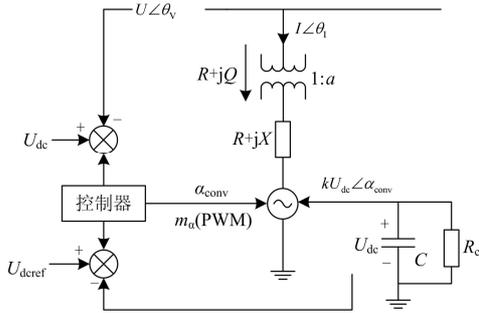


图 2 STATCOM 暂态稳定模型及其控制方法

Fig. 2 STATCOM transient stability model and its control

假设在基频下三相电压平衡的状态下^[9], 即

$$P = P_{dc} + P_{loss} \quad (1)$$

$$3\alpha \frac{U_{out} U}{X} \sin \alpha_{conv} = U_{dc} + I_{dc} + P_{loss} \quad (2)$$

式中: α 为变压器的变比; I_{dc} 为直流侧电流; P_{loss} 为变换器的损耗; U_{out} 为 STATCOM 输出电压; U 为系统电压。

通过式 (1) 和式 (2) 可得到直流侧电容的微

分方程, 即

$$\frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3\alpha k U}{CX} \sin \alpha_{conv} - \frac{U_{dc}}{R_c C} \quad (3)$$

式中, R_c 为变压器的损耗电阻, 主要取决于开关器件的数目和开关频率, 图 2 中的系数 k 与调制指数 m_a 成正比, 如果是两电平的变换器 $k = m_a / \sqrt{2}$ 。

2 Prony 方法原理与分析

2.1 传统 Prony 方法分析

Prony 方法主要是针对辨识电力系统等值线型模型^[10-13], 尤其在电力系统中低频振荡、负荷动态模型辨识、阻尼控制、暂态变量分析等方面。本文在介绍传统 Prony 方法的同时对该方法的缺点进行改进, 并将改进后的算法应用到系统辨识中。

首先把被测信号 $y(t)$ 分别用连续和离散方式表示出来, 即

$$y(t) = \sum_{i=1}^n \bar{R}_i e^{\lambda_i t} = \sum_{i=1}^{n/2} A_i e^{\alpha_i t} \cos(\beta_i t + \varphi_i) \quad (4)$$

$$y(l) = \sum_{i=1}^n \bar{R}_i Z_i^l \quad (5)$$

式中: \bar{R}_i 为输出的留数; $\lambda_i = \alpha_i + j\beta_i$; $Z_i = e^{\lambda_i T_s}$;

T_s 为采样时间; $A_i = 2|\bar{R}_i|$ 。

传统 Prony 方法是计算 λ_i 和 \bar{R}_i 。

(1) 把式 (4) 写成差分方程的形式, 得

$$y[l] = -\alpha_1 y[l-1] - \alpha_2 y[l-2] - \dots - \alpha_n y[l-n] \quad (6)$$

同时写成矩阵形式 $Y = D\Theta$

式中:

$$Y = [y_{l+n} \quad y_{l+n+1} \quad y_{l+n+2} \quad \dots \quad y_{l+N}]^T_{N-n+1}$$

$$\Theta = [-\alpha_n \quad -\alpha_{n-1} \quad \dots \quad -\alpha_1]^T$$

$$D = \begin{bmatrix} y_{l+n-1} & y_{l+n-2} & \dots & y_l \\ y_{l+n} & y_{l+n-1} & \dots & y_{l+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{l+N-1} & y_{l+N-2} & \dots & y_{l+N-n} \end{bmatrix}_{(N-n+1)}$$

N 为采样个数, 对矩阵形式采用最小二乘法以下形式, 即

$$\Theta = (Z^H Z)^{-1} Z^H Y \quad (7)$$

式中, $Z^H = (Z^*)^T Z^H$ 。

(2) 计算出系统特征值 Z_i , 系统的特征根公式得

$$Z^n + \alpha_1 Z^{n-1} + \alpha_2 Z^{n-2} + \dots + \alpha_n = 0 \quad (8)$$

(3) 把式 (5) 写成近似于矩阵的形式, 通过计

算出的特征值 Z_i , 求出留数 \bar{R}_i 。

2.2 改进 Prony 方法原理与分析

由于求出留数 R_i 需要先求出特征值 Z_i , 通过上面的公式可得知要对高维数 Z_i 求逆, 求逆过程计算较大, 容易造成一定的误差。由于留数与振荡模型的幅值及相位存在这样的关系 $A_i = 2|\bar{R}_i|$, 故采用神经网络训练, 求得幅值和相位, 这样能大大地优化整个系统的计算时间。

设有 N 个原始数据 $x(n)$, 其中 $n=0\sim N-1$, 由式 (6) 可知, 常系数线性差分方程为

$$y(l) = -\sum_{i=1}^p a_i y(l-i) \quad (9)$$

设估计误差为 $d(n)=x(n)-y(l)$, 将估计误差方程代入式 (9) 得

$$x(n) = -\sum_{i=1}^p a_i x(n-i) + u(n) \quad (10)$$

式中, $u(n) = \sum_{i=1}^p a_i d(n-i)$ 。

设 $x(n)$ 为神经网络训练数据的样本, $y(n) = \sum_{i=1}^p z_i^n b_i = Z(n,:)B$ 。式中 z_i^n 是隐层神经元的激励函数, b_i 是神经网络的权值, 设权值矩阵 $W=[w_1, w_2, \dots, w_p]^T = [b_1, b_2, \dots, b_p]^T$, 激励函数的矩阵 $C=[c_1, c_2, \dots, c_p]^T$, $c_i = z_i^n (n=0, 1, \dots, N-1)$, 神经网络输出函数为

$$y(n) = \sum_{i=1}^p z_i^n b_i = W^T C \quad (11)$$

误差函数为

$$e(n) = x(n) - y(n) \quad (n=0, 1, \dots, N-1) \quad (12)$$

设性能指标为

$$Q = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{N-1} e_i^2(n) \quad (13)$$

采用最小二乘法对权值进行计算, 由 $\frac{\partial Q}{\partial W} = 0$

得最小二乘法递推算法, 即

$$\begin{cases} H(n+1) = [E - K(n)C^T(n)]H(n) \\ W(n+1) = W(n) + K(n)[x(n) - C^T(n)W(n)] \\ K(n) = H(n)C(n) / [1 + C^T(n+1)H(n)C(n)] \end{cases} \quad (14)$$

令 $W(0)=0$, $H(0)=\beta E$, β 为足够大的正数, E 为单位阵, 这样就可计算出第一组数据的权值, 按照此方法, 通过神经网络训练可计算出神经网络权

值向量 W 。在根据式 (15) 可计算出第 i 种振荡模型的振幅 A_i 和 θ_i , 这样就可以很快地计算出留数。

$$\begin{cases} A_i = |w_i| \\ \theta_i = \arctan[\text{Im}(w_i) / \text{Re}(w_i)] \end{cases} \quad (15)$$

3 仿真分析

在 PSCAD/EMTDC 仿真软件中对 STATCOM 的详细模型和 TS 模型进行仿真分析, 使用图 3 中的总线系统对两种模型进行研究测试, 总线 1 和 2 分别是独立的电源, 总线 3 处所带的负载是 900 MW 和 300 Mvar。在总线 3 处安装容量为 200 Mvar 的 STATCOM, 控制策略采用图 1 所示的方法, 具体的数据如表 1 所示。

在 PSCAD 中建立详细的 STATCOM 模型, 包括开关器件及缓冲电路, 并采用 PWM 控制, 载波频率采用 1 260 Hz, 增大载波频率可以有效减小小变频器输出电压中的谐波分量, 在总线 3 处接一个电容器组, 主要消除开关器件所产生的高次谐波, 并且可以提供一些无功功率。对 TS 模型, 使用图 2 的控制策略。仿真主要在标准控制和附加控制两种形式下进行, 对详细模型和 TS 模型的结果进行详细的比较研究。

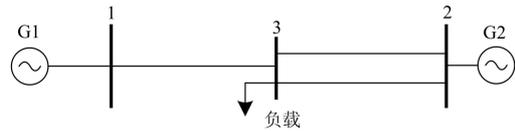


图 3 3 总线系统

Fig. 3 3-bus test system

表 1 STATCOM 模型数据参数

Table 1 STATCOM static data

K_{pu}	K_{lu}	K_{pm}	K_{lm}	T_w/s
0.06	0.6	10	100	10
R_c/Ω	R/Ω	X/Ω	$C/\mu F$	
200	0	0.108	704	

(1) 标准控制分析

根据不同负载条件分别对 STATCOM 详细模型和 TS 模型进行研究, 当线路 2-3 中断到恢复正常时, 功率源 G1 输出功率发生变化, 采用改进的 Prony 方法对模型进行参数的识别, 这时时域信号中两种 STATCOM 模型的仿真结果非常相似, 如图 4 所示。由表 2 可以看出, 当总线 3 处负载逐渐增加时, 模型不如预期的稳定, 衰减率的逼近精度也随着降低, 原因可能是在建立 TS 模型时存在偏差; 由 Prony

算法和神经网络训练得到的频率存在一定的误差; 信号中有噪声的影响, 这些都是造成误差的因素, 但从详细模型和 TS 模型的特征值中可以看出有一定的关联, 通过结果基本验证了 TS 模型的可行性。

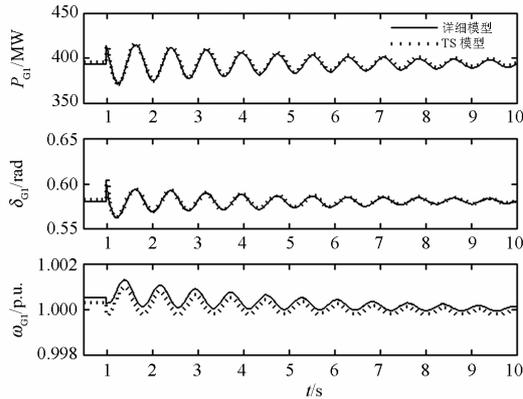


图 4 标准控制下系统负载等级为160%的响应曲线

Fig. 4 Test system response at a 160% loading in standard control

表 2 标准控制下的模型参数

Table 2 Model parameters in standard control

负载等级	详细模型	TS 模型
	特征值, 衰减率	特征值, 衰减率
100% (900 MW)	-0.5600 ± j8.11 6.89%	-0.5500 ± j8.11 6.77%
130% (1 170 MW)	-0.3686 ± j8.12 4.53%	-0.3698 ± j8.11 4.56%
160% (1 440 MW)	-0.1993 ± j8.08 2.47%	-0.2170 ± j8.07 2.69%
190% (1 710 MW)	-0.0294 ± j8.02 0.37%	-0.0674 ± j8.00 0.84%

(2) 附加控制分析

为了抑制阻尼振荡, 在图 1 中 STATCOM 控制中增加附加信号, 通常是线路中或者相邻线路的电流或功率信号, 本文的附加信号用在线路 1-3 上。相同负载等级的情况下, 鉴定的特征值结果如表 3 所示, 表 3 和图 5 的结果与表 2 的结果相比较可以明显地看出有附加信号比没有附加信号振荡更小。然而在有附加信号的情况下, 如图 6 所示, TS 模型计算出的特征值相对于详细模型有一定的误差, 但从衰减率上看 TS 模型衰减的较少, 从 TS 模型特征值角度来分析, 图 6 的效果还是不错的。

通过端电压 U_1 、直流侧电压 U_{dc} 、相角 α_{conv} 等参数对两种模型进行了详细的对比, 如图 7 所示, 显示出两种模式之间的差异。当线路 2-3 进行重合闸瞬间, 并没有捕捉到 TS 模型的数据进行快速的

瞬变, 这是因为 TS 模型是平衡的。通常基频下的电压源型控制器被定义为时间常数较大的一个微分方程, 对于详细的模型, 当直流侧电压瞬变时输出电压也受到了直接影响。

表 3 附加控制下的模型参数

Table 3 Model parameters in supplementary control

负载等级	详细模型	TS 模型
	特征值, 衰减率	特征值, 衰减率
100% (900 MW)	-0.9778 ± j8.51 11.41%	-1.0252 ± j8.44 12.06%
130% (1 170 MW)	-0.7038 ± j8.72 8.04%	-0.8067 ± j8.63 9.31%
160% (1 440 MW)	-0.4439 ± j8.76 5.06%	-0.5952 ± j8.66 6.86%
190% (1 710 MW)	-0.1766 ± j8.70 2.03%	-0.3641 ± j8.60 4.23%

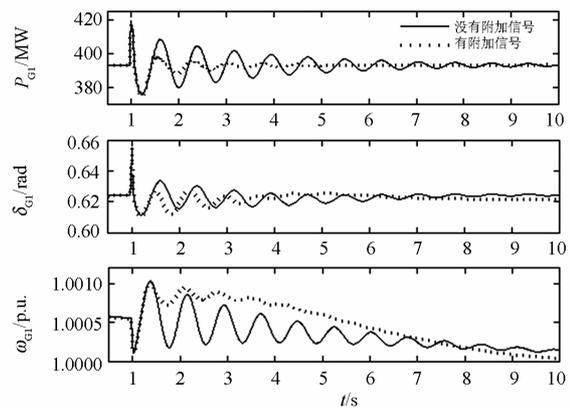


图 5 有和没有附加控制的 STATCOM 详细模型在系统负载等级为 130% 的响应曲线

Fig. 5 Test system response at a 130% loading level with and without supplementary control of STATCOM detailed model

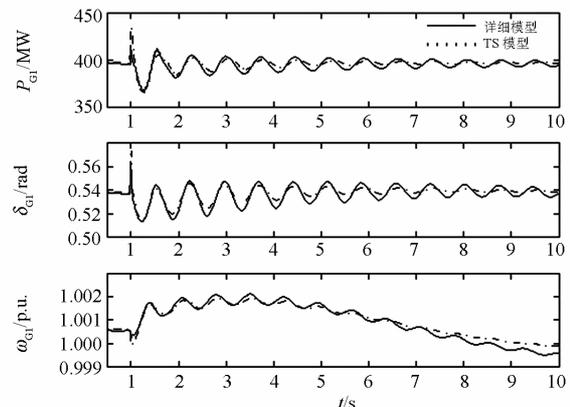


图 6 STATCOM 附加控制在系统负载等级为 190% 的响应曲线

Fig. 6 Test system response at a 190% loading level with STATCOM supplementary control

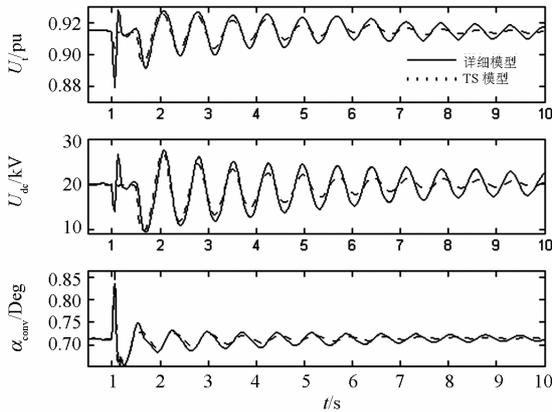


图 7 STATCOM 附加控制下的内部变量在系统负载等级为 190% 的响应曲线

Fig. 7 Test system response at a 190% loading level with STATCOM supplementary control

4 结论

本文针对验证 STATCOM 模型稳定性比较复杂的问题进行改进, 同时对提取电力系统参数的 Prony 方法进行改进, 采用 TS 模型和详细模型对 STATCOM 进行稳定性的分析。通过不同控制方法的仿真结果表明了本文提出的方法具有不错的收敛性, 能快速、准确地提取系统中的参数, 但还是存在一定的误差, 如何更好地消除误差所带来的影响是需要进一步研究的问题。

参考文献

- [1] PIAGI P, LASSETER R H. Autonomous control of microgrids[C] // IEEE-PES General Meeting, Montreal, June, 2006.
- [2] 赵渊, 董力, 谢开贵. FACTS 元件的可靠性成本/效益分析及其优化配置模型的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 107-114.
ZHAO Yuan, DONG Li, XIE Kai-gui. Research on optimal placement of FACTS devices based on reliability cost/benefits analysis[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 107-114.
- [3] 朱翔, 解大, 高强. 基于 FFT 和 db20 小波变换的电力系统谐波联合分析策略[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 62-71.
ZHU Xiang, XIE Da, GAO Qiang. Analyzing strategy for power system harmonics based on FFT and DWT using db20[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 62-71.
- [4] 张鹏, 李红斌. 一种基于离散小波变换的谐波分析方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 252-259.
ZHANG Peng, LI Hong-bin. A novel algorithm for harmonic analysis based on discrete transforms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 252-259.
- [5] 李明, 王晓茹. 一种用于电力系统间谐波谱估计的自回归模型算法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 72-76.
LI Ming, WANG Xiao-ru. An autoregressive model algorithm for the inter-harmonic spectral estimation in the power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 72-76.
- [6] 王辉, 苏小林. Prony 算法的若干改进及其在低频振荡监测中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 32(12): 140-145.
WANG Hui, SU Xiao-lin. Several improvements of Prony algorithm and its application in monitoring low-frequency oscillations in power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 32(12): 140-145.
- [7] 王存平, 尹项根, 张哲. 配电变一体化 STATCOM 结构设计及其控制方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 34-40.
WANG Cun-ping, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe. Structure design and control method research of DT-STATCOM[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 34-40.
- [8] XIA Y, LIU J M. Effect of superconducting fault current limiters on power system protection and transient stability[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2007, 26(2): 45-48, 58.
- [9] 荣飞, 罗安, 范卿. 应用与不平衡系统的 STATCOM 电压控制新方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 138-143.
RONG Fei, LUO An, FAN Qing. A novel voltage control method applied in STATCOM under unbalanced system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,

- 2010, 25(3): 138-143.
- [10] 孙晓明, 高孟平, 刘涤尘. 改进自适应 Prony 方法的电力故障信号的分析与处理[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(28): 80-87.
SUN Xiao-ming, GAO Meng-ping, LIU Di-chen. Analysis and processing of electrical fault signals with modified adaptive Prony method[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(28): 80-87.
- [11] 竺炜, 唐颖杰, 周有庆. 基于改进 Prony 算法的电力系统低频振荡模式识别[J]. 电网技术, 2009, 33(5): 44-48.
ZHU Wei, TANG Ying-jie, ZHOU You-qing. Identification of power system low frequency oscillation mode based on improved Prony algorithm[J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 44-48.
- [12] BRACALE A, CARAMIA P, CARPINELLI G. Adaptive Prony method for waveform distortion detection in power system[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2007(29): 371-379.
- [13] 李大虎, 曹一家. 基于模糊滤波和 Prony 算法的低频振荡模式在线辨识方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(1): 14-19.
LI Da-hu, CAO Yi-jia. An online identification method for power system low frequency oscillation mode based on fuzzy filtering and Prony algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(1): 14-19.

收稿日期: 2013-08-07; 修回日期: 2013-09-01

作者简介:

赵乃卓(1970-), 女, 硕士, 副教授, 主要从事智能控制理论及应用与计算机测控技术及应用方面的研究工作;

于贺(1987-), 男, 通信作者, 研究生, 研究方向为电力传动系统的计算机控制技术与仿真。E-mail: 416863836@qq.com