

基于 WAMS 的低频振荡模式在线辨识算法

陈树恒, 李兴源

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 提出了一种基于 WAMS 的低频振荡模式在线辨识算法。文章从 WAMS 主站中心角度将辨识过程分为四个阶段: 数据接收与存储, 数据预处理, 振荡模式参数计算和辨识结果分析。丢失数据估计、低通滤波、模型阶数优化等改进措施的应用提高了辨识过程的速度和辨识结果的可靠性。结合实际的 WAMS 系统和 Visual Studio 开发平台, 设计了运行于 WAMS 主站的在线辨识系统。以规划中的南方电网进行的算例研究验证了辨识结果的准确性。

关键词: 低频振荡; WAMS; Prony 模型; 相量测量单元; PMU; 在线辨识

An algorithm for identifying low frequency oscillation modes on line based on WAMS

CHEN Shu-heng, LI Xing-yuan

(Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: An algorithm is presented to identify low frequency oscillation modes on line based on WAMS. From the view of main station center, the identifying process is composed of four steps, which are receiving & saving data, preprocessing data, calculating LFO modes parameters and analyzing results identified. The speed of identifying process and the reliability of results are improved by predicting lost data, low frequency filtering and optimizing model order. Integrated with WAMS system and Visual Studio, the identifying system on line is designed which is running at main station. The research on South Power Grid in plan has proved that the algorithm is reliable.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No.50595412 and No.50577044).

Key words: low frequency oscillation; wide-area measure system; Prony model; PMU; on-line identification

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)20-0017-06

0 引言

电力系统低频振荡不仅是由电网结构及其元件参数共同决定的一种属性, 也是电力系统运行过程中存在的安全隐患之一^[1,2]。及时准确获知电网低频振荡的主导模式对电力生产具有重要意义。

低频振荡模式的传统分析方法是: 1) 根据电网结构和电力元件参数建立微分方程组; 2) 在系统不同稳定点对微分方程组进行线性化并形成状态空间表达式; 3) 计算特征矩阵的特征根并由特征根计算系统的低频振荡模式^[1,2]。然而, 随着电力系统规模的日益扩大, 该方法由于“维数灾”缘故, 在实际应用时面临越来越多的困难。

分析电力系统在小干扰作用下的暂态过程是一种理想的电力系统低频振荡模式计算方法^[3-9], 且该方法能实时跟踪电力系统低频振荡模式的变化。然而, 在传统的 SCADA 平台上, 由于控制中心不能

获得系统变量精确的、高准时的离散数据序列, 该方法难以得到深入研究。

近年来, 广域测量系统(WAMS)已经逐渐成熟, 并在电力系统中被广泛应用。凭借 WAMS 的同步对时系统, 在控制中心可形成高精度、高准时的等间隔离散数据列。这为研究在线辨识电力系统低频振荡模式提供了数据基础^[10,11]。在众多的模式分析方法中, 由 Prony 在 1795 年提出的 Prony 辨识算法与电力系统振荡模式之间具有直接的对应关系, 且此方法易理解、易计算和易应用^[6,7,12,13]。

结合 WAMS 系统, 国内外的学者对低频振荡模式辨识理论进行了大量研究^[12,13]。但这些研究主要是基于理论推导, 需要进一步工程化。

本文将结合 WAMS 系统, 研究低频振荡模式在线辨识算法。文章将首先提出低频振荡模式辨识算法的过程; 进一步结合 WAMS 系统和 Visual Studio 平台, 设计实现方案; 最后, 以规划中的南方电网交直流混合互联系统进行算例研究。

1 基于 WAMS 的电力系统低频振荡模式在

基金项目: 国家重点基础研究专项经费(2004CB217907);

国家自然科学基金(50595412, 50577044)

线辨识算法

电力系统在遭受小扰动时的暂态响应过程代表了系统的低频振荡特性^[14]。根据 Prony 算法, 暂态响应过程的有限长等间隔离散数据序列可以拟合为^[12,13]:

$$y(t) = \sum_{m=1}^{m=P} A_m e^{\alpha_m t} \cos(\omega_m t + \varphi_m) \quad (1)$$

式(1)中, A_m 为振荡幅值, α_m 阻尼系数, ω_m 为振荡角频率, φ_m 为初相。式(1)描述了低频振荡过程中各种振荡模式的幅值、频率、相位及阻尼系数的主次关系。

利用 WAMS 同步对时系统, 远方的 PMU 能够对暂态过程进行精确采样, 并将离散数据列传送到主站中心进行 Prony 分析。利用有限长等间隔离散数据列计算电力系统低频振荡模式的过程分为四步, 逐一分析如下:

1) 暂态过程数据的接收与储存

在 WAMS 系统中, 小扰动激励下的暂态过程首先是由远方 PMU 进行采样; PMU 为各个采样数据对象赋以 GPS 时标。PMU 与 WAMS 主站之间通过建立 TCP/IP 连接进行采样数据传送。主站方通常被选定为协议的客户端。当数据被传送到主站后, 主站程序依据双方约定的应用规约对 TCP 数据报文进行解释。依据各个采样点自带的 GPS 时标, 暂态过程数据被存入原始数据缓冲区中。原始数据缓冲区的存储结构为:

```
typedef struct
{
    long    uctime;           // 起始数据 GPS 时标
    WORD   writeP;           // 写指针位置
    WORD   readP;            // 读指针位置
    float  buf[RLth];        // 数据区
}RXBUF
```

在数据结构 RXBUF 中, RLth 为数据区长度, 取值在 4k 左右; uctime 为长整数表示的统一 GPS 时标相对变量。利用整除取余算法使数据区成为环形存储结构。每次存入新的采样数据时及时修改写指针 writeP。依据实时性的原则, 应及时读取 TCP/IP 端口接收到数据包。如果 PMU 采样频率为 20 Hz, 主站接收端口的扫描周期为应小于 50 ms, 通常选择为 20~25 ms 之间。

2) 原始采样数据预处理

在原始采样数据的形成过程中, 包括以下两种异常现象: a. 在远方 PMU 进行的高频采样过程将引入噪声成分; b. 在 TCP/IP 规约的传输过程中个别数据包可能丢失; c. 交流采样中个别采样数据异常。

因此, 在振荡模式参数辨识计算前, 应对原始数据进行预处理。预处理过程包括三项内容: 剔除非法数据、估计缺失数据与过滤高频噪声。根据上下限条件, 即可实现剔除非法数据。本节主要研究估计缺失数据与过滤高频噪声的算法。

(1) 缺失数据估计

从原始数据缓冲区的读指针开始, 对存储区中的每个数据个体顺序编号组成离散数据列:

$$y(0), y(1), \dots, y(L-2), y(L-1) \quad (2)$$

序列(2)的长度为:

$$L = (\text{writeP} - \text{readP} + \text{RLth}) \% \text{RLth} \quad (3)$$

如果定义信号为 AR 模型, 可建立形如式(4)的差分方程, a_1, a_2, \dots, a_X 为差分方程系数。

$$y(n) = \sum_{k=1}^X a_k y(n-k) \quad (4)$$

参数 X 的取值范围在 5~10 之间。如果离散数据列(2)中的第 $N+X$ 个数据缺失。则估计该值的算法为:

令(4)中 n 分别为: $N, N+1, \dots, N+X-1$, 组成矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} y_{N-1} & y_{N-2} & \cdots & y_{N-X} \\ y_N & y_{N-1} & \cdots & y_{N-X+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{N+X-2} & y_{N+X-3} & \cdots & y_{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_N \\ y_{N+1} \\ \vdots \\ y_{N+X-1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

利用式(5)求可解式(4)中的 AR 模型系统列矩阵为:

$$A_d = [a_1, a_2, \dots, a_X]^T \quad (6)$$

第 $N+X$ 个采样数据的估计值为:

$$y(N+X) = \sum_{k=1}^X a_k y(N+k-1) \quad (7)$$

通过缺失数据估计计算后, 对数据列中各个数据重新编号组成新的数据列:

$$y'(0), y'(1), \dots, y'(L-2), y'(L-1) \quad (8)$$

数据列(8)采用形如原始数据存储区的中间缓冲区进行临时保存。

(2) 过滤高频噪声

由于低频振荡模式辨识关心的重点为被研究数据列中的低频成分, 因此基于计算效率的考虑, 本文采用低通数字滤波器进行高频滤波, 不采用比较复杂的自适应滤波或模糊滤波等方法^[13]。

假设低通数字滤波器为 $H(z)$, 式(8)中数据经过该滤波器处理后将形成数据序列:

$$y''(0), y''(1), \dots, y''(L-2), y''(L-1) \quad (9)$$

经过以上预处理过程, 数据列 (9) 已成为低频振荡模式计算的数据来源。数据列 (9) 存储于形如原始数据存储区的数据结构中, 该缓冲区称作辨识数据存储区。当有多个变量时, 须开辟与变量数目相等的相同缓冲区。

3) 振荡模式参数计算

从辨识数据存储区的读指针开始, 依次取 M 个数据形成数据列 (10), M 的取值是 100~200。

$$x(0), x(1), \dots, x(M-2), x(M-1) \quad (10)$$

由序列 (10) 计算低频振荡模式的过程分为三步: 阶数判定、前向预测系数计算和模式参数计算。

(1) 阶数优化计算

Prony 拟合模型阶数采用经验与前向预测误差最小的原则结合计算, 一共分为五步:

第一步: 根据经验法则^[15]: Prony 模型阶数应该选择在 $\frac{M}{3} \leq p \leq \frac{M}{2}$ 之间。在区间 $\left[\frac{M}{3} \sim \frac{M}{2}\right]$ 中通过前向预测误差比较, 选择最优模型阶数。

第二步: 计算 $k = \frac{M}{3}$ 时的前向预测误差。

计算矩阵 \mathbf{Z} 与 \mathbf{x} :

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} x_{k-1} & x_{k-2} & \dots & x_0 \\ x_k & x_{k-1} & \dots & x_1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{2k-1} & x_{n+M-2} & \dots & x_{k-1} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x}^T = [x_k \quad x_{k+1} \quad \dots \quad x_{2k-1}]$$

$$\hat{\mathbf{a}} = (\mathbf{Z}^T \mathbf{Z})^{-1} \mathbf{Z}^T \mathbf{x} \quad (11)$$

利用式 (11) 计算式 (10) 表示数据序列区间的前向估计值序列 \hat{x} 。

在式 (10) 表示数据序列区间上计算前向功率误差及平方值:

$$\hat{e} = x - \hat{x} \quad (12)$$

$$\rho_k = \hat{\sigma}_e^2 = \frac{1}{k} \hat{e}^T \hat{e} = \frac{1}{k} [x - \hat{x}]^T [x - \hat{x}] \quad (13)$$

第三步: 计算

$$FPE(k) = \frac{M+k}{M-k} \rho_k \quad (14)$$

第四步:

增加阶数为 $M/3+1$, 重复第二步和第三步计算 $FPE(k+1)$ 。逐次增加阶数值, 依次计算 $FPE(k)$, 直到 $k = \frac{M}{2}$ 。于是得到数据序列:

$$FPE(k), \quad k = \frac{M}{3}, \dots, \frac{M}{2} \quad (15)$$

第五步:

根据文献[15], 序列 (15) 存在最小值。取数据列 $FPE(k)$ 中的最小值对应的阶数 k 为 Prony 模型阶数 N_{opt} 。

(2) 预测系数与功率估计误差计算

取 $p = N_{opt}$, 假设信号过程为 AR 模型, 计算序列 (10) 的协方差序列^[16]:

$$\hat{r}_x(l, k) = \begin{cases} \frac{1}{M-p} \sum_{n=p}^{M-1} x(n-l)x(n-k) \\ \hat{r}_x(k, l) \end{cases}$$

$$l, k = 1, 2, \dots, p \quad (16)$$

利用式 (16) 构造方程式 (17)。

$$\begin{bmatrix} \hat{r}_x(1,1) & \hat{r}_x(1,2) & \dots & \hat{r}_x(1,p) \\ \hat{r}_x(2,1) & \hat{r}_x(2,2) & \dots & \hat{r}_x(2,p) \\ \dots & \vdots & & \vdots \\ \hat{r}_x(p,1) & \hat{r}_x(p,2) & \dots & \hat{r}_x(p,p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_p \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \hat{r}_x(1,0) \\ \hat{r}_x(2,0) \\ \dots \\ \hat{r}_x(p,0) \end{bmatrix} \quad (17)$$

解方程 (17), 计算出预测系数:

$$a_1, a_2, \dots, a_p \quad (18)$$

以系数序列 (18) 为基础, 计算式 (10) 的功率估计误差:

$$\hat{\sigma}_e^2 = \hat{\rho}_{\min} = \frac{1}{M-p} \sum_{n=p}^{M-1} (x(n) + \sum_{k=1}^p a_k x(n-k))x(n) =$$

$$\hat{r}_x(0,0) + \sum_{k=1}^p a_k \hat{r}_x(0,k) \quad (19)$$

(3) 计算低频振荡模式参数

以系数序列 (18) 构造多项式:

$$1 + a_1 z + a_2 z^2 + a_3 z^3 + \dots + a_p z^p = 0 \quad (20)$$

解此方程则可得其根为:

$$z_0, z_1, \dots, z_{p-1} \quad (21)$$

利用 z_0, z_1, \dots, z_{p-1} 构造矩阵:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ z_1 & z_2 & \dots & z_p \\ \dots & \dots & \dots & \vdots \\ z_1^{p-1} & z_2^{p-1} & \dots & z_p^{p-1} \end{bmatrix} \quad (22)$$

和矩阵:

$$Y = [x(1) \ x(2) \ \dots \ x(p)]^T \quad (23)$$

组成矩阵方程:

$$ZR = Y \quad (24)$$

解矩阵方程得:

$$R = [R_1 \ R_2 \ \dots \ R_p]^T \quad (25)$$

以 (21) 和 (25) 中的计算结果为基础, 并假设离散数据列 (10) 的采样周期为 ΔT , 进一步计算式 (1) 所示 Prony 模型的全部参数:

$$\begin{cases} A_m = |R_m| \\ \alpha_m = \ln |z_m| / \Delta T \\ f_m = \arctan [\text{Im}(z_m) / \text{Re}(z_m)] / (2\pi\Delta T) \\ \varphi_m = \arctan [\text{Im}(R_m) / \text{Re}(R_m)] \end{cases} \quad (26)$$

辨识结果采用结构数组存储。数据结构为:

```
typedef struct
{
    float m_Zhenfu;           // 振幅
    float m_Zunishu;         // 阻尼系数
    float m_Pinlv;           // 频率
    float m_Chuxiang;        // 初始相位
}LFOMODESTRUCT
```

结构数组长度的取值为可能的最大模式数。修改辨识数据存储区读指针的位置, 读取新的数据列继续下一次振荡模式辨识分析。通常将读指针移动 $M/3$ 的长度。读指针的修改方法为:

$$readP = (readP + M/3) \% RLth \quad (27)$$

4) 辨识结果分析与处理

存储在辨识结果存储区的数据, 需做进一步分析, 挖掘其中隐含的重要信息, 最终为调度员提供决策支持。对辨识结果进行的分析工作包括: 计算低频振荡的主导模式; 模式数据屏幕显示; 事故报警; 实时打印及数据存盘, 等等。

2 实现方案设计

通常通过在 WAMS 主站研制对应的应用程序系统来实现由第 1 节提出的电力系统低频振荡模式在线辨识算法。结合 Windows 系统运行平台和 Visual Studio 应用程序开发平台, 拟研制的基于 WAMS 系统的电力系统低频振荡模式在线辨识系统的总体结构如图 1。

图 1 所示的应用程序架构是基于单机系统设计的。辨识程序分为两个组成部分: 数据库和计算线程。数据库包括参数数据库和实时数据库; 参数数据库存储系统的设定参数, 由组态软件进行维护; 实时数据库用于保存计算过程的中间结果。计算过

程分为四个线程: 通讯服务线程, 数据预处理线程, 模式参数计算线程和辨识结果分析线程。四个线程通过中间结果存储区进行协调。当被监视变量为多个时, 各个线程通过循环机制完成对全部离散数据列的分析与计算。

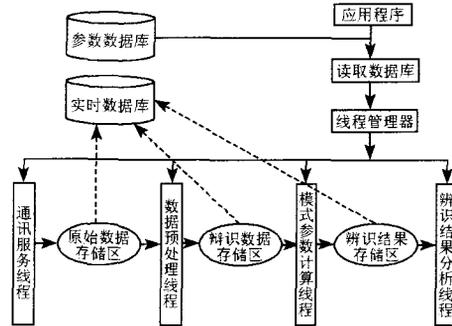


图 1 在线监辨识低频振荡模式的程序结构

Fig.1 Program structure for identifying LFO modes on line

3 算例研究

3.1 概述

图 2 描述的是经过简化的南方电网 2008 年电网结构规划图。

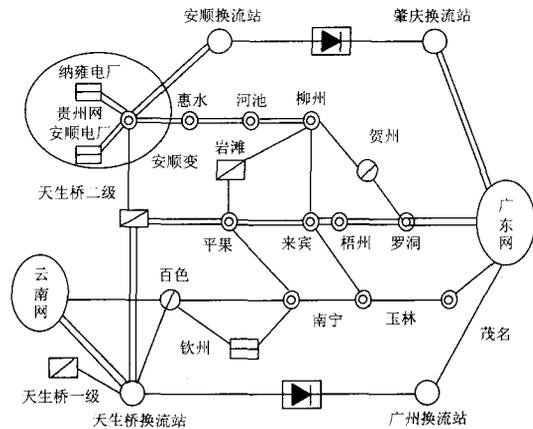


图 2 南方电网交直流混合互联电网地理接线图

Fig.2 Geographical chart of AC/DC mixed connection of South Power Grid

南方电网是我国典型的大规模交直流混合互联电网。本节将以规划中的南方电网为研究对象进行在线辨识低频振荡模式算例研究。

采用西门子公司研制的 NETOMAC 仿真软件建立南方电网的仿真模型, 并进行机电暂态仿真。在仿真进行到 2.2 s 时, 模拟在广西天生桥二级水电站到平果变电站间的 500 kV 联络线上发生三相接地瞬时短路故障; 在 2.2 s 时, 在单回联络线中点发生三相接地; 0.099 s 后线路两端开关跳闸且故障消

失, 再经 0.099 s 后开关重合闸成功。

3.2 数据预处理

以 10 Hz 采样频率在 0~12.8 s 时间段内对广东电网的频率偏差进行采样, 形成由 128 个数据点组成的等间隔离散数据序列。设计低通滤波器对离散数据序列高频滤波预处理。图 3 对比显示了预处理前后的交流频率偏差扰动过程曲线。预处理后的曲线比预处理前的曲线变化要平滑。

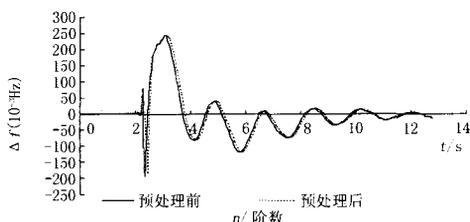


图 3 频率暂态曲线预处理前后比较

Fig.3 Comparison of frequency transient curves between before preprocessed and after preprocessed

3.3 模型阶次估计

将预处理后离散数据列中 2.2 s 至 10.2 s 时间段内的 81 个点组成新的数据列, 计算 Prony 拟合模型的预选最佳阶数, 计算结果为 33 阶。模型阶数 n 与预测误差 ρ^2 的函数关系如图 4。

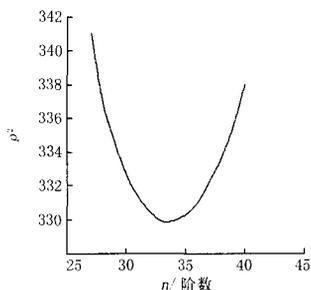


图 4 预测误差 ρ^2 与模型阶数 n 之间的函数关系

Fig.4 Function relation between predicting error ρ^2 and order n

3.4 低频振荡模式在线辨识结果有效性验证

表 1 低频振荡主导模式

Tab.1 Dominant modes of low frequency oscillation

多项式特征根	留数	振幅 (10^{-3})	阻尼系数	频率/Hz	相位/ $^\circ$
0.978±0.026i	9.76±82.3i	82.9	-0.439	0.844	±1.45
0.973±0.177i	-45.9±12.0i	47.5	-0.22442	0.572	±2.88
0.801±0.469i	-5.31±0.96i	5.40	-1.4911	1.69	±2.963
0.771±0.545i	3.05±2.01i	3.66	-1.1479	1.96	±0.583
0.932±0.318i	-1.18±2.59i	2.85	-0.30816	1.05	±1.99
0.881±0.445i	1.88±0.62i	1.98	-0.24898	1.49	±0.32
0.102±0.917i	0.325±1.04i	1.09	-1.6048	4.65	±1.268

以优化模型阶数为基础, 对预处理后的离散数据列应用本文提出的算法计算 Prony 拟合模型的参数。表 1 归纳了 Prony 信号模型中振幅大于 1 毫赫

兹的振荡模式。

由表 1 可见, 信号主要包括 0.844 Hz, 0.572 Hz 和 1.69 Hz 等 7 种振荡模式。因此, 信号可以用一个 14 阶的模型进行拟合。图 5 对比显示了经过预处理的辨识数据曲线和 Prony 拟合模型曲线。

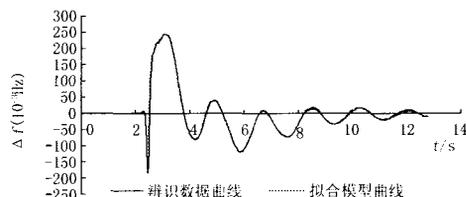


图 5 原始曲线与 Prony 模型曲线比较

Fig.5 Comparison between initial curve and Prony model curve

可见, 辨识数据列曲线和拟合模型曲线几乎没有什么区别。因此, 本文提出的电力系统低频振荡模式在线辨识算法是有效的。

4 结语

结合 WAMS 系统和 Visual Studio 开发平台, 本文提出了一种在线辨识电力系统低频振荡模式的算法及其应用程序架构。通过理论研究和算例仿真可得以下结论:

(1) 电力系统在小扰动下的暂态响应为系统各个振荡模式指数项的线性组合, 满足 Prony 算法定义的信号模型。

(2) 通过对接收到的 WAMS 生数据进行数据预处理 (缺失数据估计和低通滤波) 可有效提高辨识结果的精度。

(3) 对模型阶数的优化计算不仅保证了辨识结果的精度, 而且降低了辨识过程中的计算量, 有利于提高辨识速度。

(4) 将辨识过程分解为四个线程协调完成, 有利于从总体上提高辨识应用程序的性能, 包括快速性、可靠性和准确性。

本文提出的辨识算法在工程应用中具有一定的应用价值。

参考文献

[1] 李兴源. 高压直流输电系统的运行与控制 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.

[2] Kundur P. 电力系统稳定与控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.

[3] Bounou M, Lefebvre S, Malhame R P. A Spectral Algorithm for Extracting Power System Modes from Time Recordings[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(2):665-671.

[4] Hauer J F. Application of Prony Analysis to the Deter-

- mination of Modal Content and Equivalent Models Measured Power System Response[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991,6(3): 1062-10 68.
- [5] Grund C E,Paserba J J,Hauer J F,et al.Comparison of Prony and Eigenanalysis for Power System Control Design[J] IEEE Trans on Power Systems,1993,8(3): 964-971.
- [6] Trudnowski D J,Smith J R,Short T R,et al.An Application of Prony Methods in PSS Design for Multimachine Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems,1991,6(1): 118-126.
- [7] Bounou M,Lefebvre S, Malhame R P. A Spectral Algorithm for Extracting Power System Modes from Time Recordings[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992,7(2):665-671.
- [8] 刘红超, 李兴源. 基于Prony辨识的交直流并联输电系统直流阻尼控制[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 54-57.
LIU Hong-chao,LI Xing-yuan. Study of DC Damping Control in AC/DC Transmission Systems Based on Prony Method[J]. Proceedings of the CSEE,2004,22(7):54-57.
- [9] 肖晋宇, 谢小荣, 胡志祥. 基于在线辨识的电力系统广域阻尼控制[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(24): 22-27.
XIAO Jin-yu,XIE Xiao-rong,HU Zhi-xiang. Power Systems Wide-area Damping Control Based on Online System Identification[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(7):22-27.
- [10] 丁军策, 蔡泽祥, 王克英. 基于广域测量系统的状态估计研究综述[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(7): 98-103.
DING Jun-ce, CAI Ze-xiang, WANG Ke-ying. An Overview of State Estimation Based on Wide-area Measurement System[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(7):98-103.
- [11] 丁军策, 蔡泽祥, 王克英. 基于广域测量系统的混合量测状态估计算法[J]. 中国电机工程学报, 2006,26(2): 58-62
DING Jun-ce, CAI Ze-xiang, WANG Ke-ying. Mixed Measurements State Estimation Based on WAMS[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(2): 58-62.
- [12] 菊平, 谢欢, 孟远景. 基于广域测量信息的在线辨识低频振荡[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 56-60.
JU Ping, Xie Huan, MENG Yuan-jing. On Line Identification of Low-frequency Oscillation Based on Wide-area Measurements[J]. Proceedings of the CSEE, 2005,25(22): 56-60.
- [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算法[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 Based on Fuzzy Filtering and Prony Algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(1):14-19.
- [14] 刘豹. 现代控制理论[M]. 北京: 机械工业出版社,2002.
- [15] 张明友, 吕明, 等. 近代信号处理理论与方法[M]. 北京: 国防工业出版社,2005.
- [16] 黄甫堪, 陈建文. 现代数字信号处理[M]. 北京: 电子工业出版社,2003.
-
- 收稿日期: 2007-05-14; 修回日期: 2007-06-12
作者简介:
陈树恒(1974-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail:chenshuheng_scu@163.com
李兴源(1945-), 男, 教授, 博士生导师, 中国电机工程学会理事, IEEE 高级会员, 从事电力系统稳定与控制方面的研究工作。
-
- (上接第 16 页 continued from page 16)
- [7] Monticelli A, Garcia A. Modeling Zero Impedance Branches in Power System State Estimation[J]. IEEE Trans on power Systems, 1991,6(4):1561-1570.
- [8] Contreras J,Losi A,Russo M et al. Simulation and Evaluation of Optimization Problem Solutions in Distributed Energy Management Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems ,2002,17(1):1257-1262.
- [9] 郑相华, 米增强, 赵洪山, 等. 基于PMU的状态估计研究[J]. 继电器, 2004,32(17):16-19.
ZHENG Xiang-hua, MI Zeng-qiang, ZHAO Hong-shan et al. Research on State Estimation Based on PMU[J]. Relay, 2004,32(17):16-19.
- [10] 王克英, 穆刚, 陈学允. 计及PMU的状态估计精度分析及配置研究[J]. 中国电机工程学报, 2001,21(8):29-33.
WANG Ke-ying, MU Gang, CHEN Xue-yun. Precision Improvement and PMU Placement Studies on State Estimation of a Hybrid Measurement System with PMUs[J]. Proceedings of the CSEE, 2001,21(8):29-33.
- [11] LIN W M,Teng J H. State Estimation for Distribution Systems with Zero-injection Constraints[J]. IEEE Trans on Power Systems ,1996,11(1):34-38.
- [12] 倪小平, 张步涵. 一种带有等式约束的状态估计新算法[J]. 电力系统自动化, 2001,10(5):42-44.
NI Xiao-ping, ZHANG Bu-han. New State Estimation Algorithm with Equality Constraints[J]. Automation of Electric Power Systems,2001,10(5):42-44.
-
- 收稿日期: 2007-03-28
作者简介:
李阳林(1983-), 男, 硕士, 主要从事高电压与绝缘技术方面的工作; E-mail:yanglin_li@163.com
卫志农(1962-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析、运行和控制, 配电网自动化等;
万军彪(1968-), 男, 高级工程师, 长期从事高电压与绝缘技术方面的工作。