

多干扰情况下的电力系统闭环辨识研究

吴超^{1,2}, 陆超³, 韩英铎³, 吴小辰⁴, 柳勇军⁴

(1. 深圳大学 机电与控制工程学院, 广东 深圳 518060; 2. 深圳市传感器技术重点实验室, 广东 深圳 518060;

3. 清华大学 电力系统国家重点实验室, 北京 100084; 4. 南方电网技术研究中心, 广东 广州 510623)

摘要: 电力系统中多处负荷投切与变化等随机性质小扰动, 导致系统响应始终存在类似噪声的小幅波动. 本文提出利用广域测量类噪声信号辨识被控电力系统模型, 及时准确地反映系统当前运行特性, 进而解决因仿真模型及参数误差造成的系统分析及控制器设计可信度难以评估等难题. 重点对多干扰情况下的系统模型闭环辨识问题进行理论性研究, 包括闭环可辨识性、辨识一致性及收敛性等方面, 分析得出类噪声环境下要实现系统闭环辨识需具备的条件, 并对理论研究结果进行了仿真验证.

关键词: 类噪声; 闭环辨识; 可辨识性; 一致性; 收敛性

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Closed-loop identification of power system with multiple disturbances

WU Chao^{1,2}, LU Chao³, HAN Ying-duo³, WU Xiao-chen⁴, LIU Yong-jun⁴

(1. College of Mechatronics and Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen Guangdong 518060, China;

2. Shenzhen Key Laboratory of Sensor Technology, Shenzhen Guangdong 518060, China;

3. The State Key Laboratory of Power System, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

4. Technology Research Centre of China Southern Power Grid, Guangzhou Guangdong 510623, China)

Abstract: Small fluctuations caused by random changes of loads exist continuously in power grids, which are called ambient signals. We put forward a method of using wide-area measured ambient data to identify the power system model. This model reflects accurate operating conditions currently, and provides information for solving problems in system analysis and controller design. The closed-loop identification of system with multiple disturbances is theoretically studied, including the closed-loop identifiability, the consistency and the convergence. The requirements for realizing the closed-loop identification are summarized. Simulation examples validate the theoretical research results.

Key words: ambient signal; closed-loop identification; identifiability; consistency; convergence

1 引言(Introduction)

现阶段, 对于大型互联电网一般采用仿真方式评估其运行性能, 继而进行电网发展规划、调度方式确定以及控制与保护设备设计等工作. 因此, 模型与参数的准确与否, 直接关系到仿真分析的准确性, 进而影响电网日常运行的安全性与经济性.

辨识是确定仿真用模型和参数的最主要方法, 通常通过安排专门试验或在电网发生明显扰动时收集辨识用数据^[1~3]. 但是, 安排专门试验, 代价高昂, 需要事先进行大量针对性分析, 以确保不会对系统产生负面影响. 在实际电力系统中, 明显扰动发生概率相对较小, 且不可人为操控, 数据量有限, 这种方法对计算速度的要求也相对较高, 难以达到理想的辨识效果. 此外, 也无法确保辨识结果能及时准确地反映电网当前运行特性, 极有可能导致严重的时效性

问题.

广域测量系统(wide area measurement system, WAMS)的迅速发展及广泛应用, 为解决上述问题提供了有利的条件. 观察发现, 电力系统日常运行过程中, 由于时刻存在的负荷投切与变化等随机性质的小幅扰动, 母线电压、相角和线路功率等信号时刻存在类似噪声的微小幅值波动. 现阶段, 已有研究基于广域测量类噪声信号辨识电力系统低频振荡特性^[4~9], 分析结果充分证明, 类噪声信号包含了丰富的电力系统动态特性信息. 进一步地, 本文提出基于广域测量类噪声信号辨识电力系统模型. 这种方式的辨识在电网正常运行过程中可随时进行, 能及时准确地反映系统当前动态特性, 对算法的快速性也没有严格要求, 为更具适应性的系统分析及控制器设计等奠定了良好的基础.

收稿日期: 2010-07-15; 收修改稿日期: 2010-12-28.

基金项目: 广东省自然科学基金博士科研启动资助项目(S2011040000995); 深圳大学基础研究资助项目(201117); 深圳市传感器技术重点实验室开放基金资助项目(SST201106).

目前,对于系统辨识中关键性的可辨识性、辨识方法及准确性等问题,自动化领域学者已开展了大量研究^[10~13].但在电力系统领域,研究多关注于辨识方法的改进,而忽视了系统可辨识性、辨识准确性等重要基础性问题.如前所述,类噪声信号采集过程中,电力系统中存在多个干扰.广域阻尼控制器的投运使系统处于闭环运行状态,系统输出对输入或外界扰动的灵敏度降低,此时信号提供的信息量较之开环系统大为减少,辨识难度明显增加.针对上述情况,本文提出对多干扰情况下的电力系统闭环辨识问题进行系统的理论性研究.

2 真实系统和辨识用模型(Real system and identification model)

参照电力系统实际情况,构造图1所示真实系统(图1(a))和辨识用模型(图1(b))用于研究闭环辨识问题.模拟电力系统中存在的多处负荷随机性质小幅扰动,在真实系统中加入若干个处于不同位置的干扰信号.以系统中存在两个干扰信号为例.其中: u 和 y 分别表示被控系统输入、输出信号, e_{10} 和 e_{20} 表示均值为零、方差分别为 λ_{10} 和 λ_{20} 的互不相关平稳随机干扰信号, r 表示与信号 e_{10} 和 e_{20} 相互独立的外加参考信号, G_{10} 和 G_{20} 表示前向通道真实被控系统, H_{10} 和 H_{20} 分别表示前向通道上真实干扰信号 e_{10} 和 e_{20} 的首一可逆稳定滤波器, C_0 表示反馈通道真实控制器.显然,信号 u 和 y 均为系统响应信号,主要由干扰信号引起. e 表示辨识用均值为零、方差为 λ 的稳随机干扰信号, $G(q, \theta)$ 表示辨识用前向通道被控系统模型, $H(q, \theta)$ 表示辨识用前向通道干扰信号 e 的滤波器模型, $C(q, \theta)$ 表示辨识用反馈通道控制器模型, θ 表示待辨识模型参数, $t = 1, 2, \dots$.

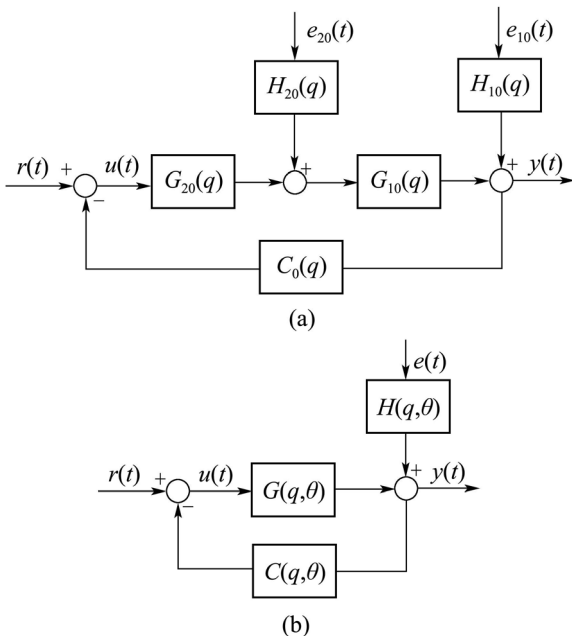


图1 真实系统及辨识用模型
Fig. 1 Real system and identification model

对于真实系统 Θ ,按照式(1),生成数据集 $Z^\infty = \{y(1), u(1), y(2), u(2), \dots\}$.

$$\begin{cases} y(t) = G_{10}(q)G_{20}(q)u(t) + H_{10}(q)e_{10}(t) + H_{20}(q)G_{10}(q)e_{20}(t), \\ u(t) = -C_0(q)y(t) + r(t), \end{cases} \quad (1)$$

其中 q 表示前移算子,满足 $qu(t) = u(t + 1)$.

进行如下定义:

$$\begin{cases} G_0(q) = G_{10}(q)G_{20}(q), \\ H'_{20}(q) = H_{20}(q)G_{10}(q), \\ H_0(q)e_0(t) = H_{10}(q)e_{10}(t) + H'_{20}(q)e_{20}(t), \end{cases}$$

那么,式(1)所示真实系统 Θ 可用下式进行描述:

$$\begin{cases} y(t) = G_0(q)u(t) + H_0(q)e_0(t), \\ u(t) = -C_0(q)y(t) + r(t), \end{cases} \quad (2)$$

进一步写出闭环系统表达式

$$\begin{cases} y(t) = S_0(q)G_0(q)r(t) + S_0(q)H_0(q)e_0(t), \\ u(t) = S_0(q)r(t) - S_0(q)C_0(q)H_0(q)e_0(t), \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$S_0(q) = \frac{1}{1 + G_0(q)C_0(q)}.$$

类似地,辨识用模型 Ω 的表达式为

$$\begin{cases} y(t) = G(q, \theta)u(t) + H(q, \theta)e(t), \\ u(t) = -C(q, \theta)y(t) + r(t), \end{cases} \quad (4)$$

进一步写成如下形式:

$$\begin{cases} y(t) = S(q, \theta)G(q, \theta)r(t) + S(q, \theta)H(q, \theta)e(t), \\ u(t) = S(q, \theta)r(t) - S(q, \theta)C(q, \theta)H(q, \theta)e(t), \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$S(q, \theta) = \frac{1}{1 + G(q, \theta)C(q, \theta)}.$$

3 闭环可辨识性研究(Close-loop identifiability analysis)

对于系统辨识而言,在不同模型结构、辨识方法和实验条件下,系统不一定是可以辨识的,存在可辨识性问题.可辨识性是系统辨识的核心内容,研究的是辨识能否产生模型参数唯一解的问题,这主要取决于辨识用数据是否充分信息化^[13, 14].

采用预报误差法^[13]进行模型参数估计.假设基于拟平稳数据 Z^N 辨识得到两个模型 $W(q, \theta_1)$ 和 $W(q, \theta_2)$,显然存在如下关系:

$$0 = \bar{E} [(W(q, \theta_1) - W(q, \theta_2)) Z(t)]^2 = \bar{E} [|\Delta W_u \quad \Delta W_y \begin{bmatrix} u(t) \\ y(t) \end{bmatrix}|^2], \quad (6)$$

其中:

$$\begin{aligned}\bar{E}x &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N Ex(t), \quad i = 1, 2, \\ W(q, \theta_i) &= [W_u(q, \theta_i) \quad W_y(q, \theta_i)], \\ W_u(q, \theta_i) &= H^{-1}(q, \theta_i)G(q, \theta_i), \\ W_y(q, \theta_i) &= 1 - H^{-1}(q, \theta_i), \\ \Delta W_u &= W_u(q, \theta_1) - W_u(q, \theta_2), \\ \Delta W_y &= W_y(q, \theta_1) - W_y(q, \theta_2).\end{aligned}$$

接下来分别针对待辨识系统输入端不存在外加参考信号、存在外加参考信号两种情况研究系统的闭环可辨识性。

3.1 不存在外加参考信号(Without reference signal)

若待辨识系统输入端不存在外加参考信号, 如前所述, 假设基于拟平稳数据 Z^N 辨识得到两个模型 $W(q, \theta_1)$ 和 $W(q, \theta_2)$, 式(6)成立。

真实系统的输入、输出信号可表示为

$$\begin{bmatrix} u(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -S_0(q)C_0(q) \\ S_0(q) \end{bmatrix} H_0(q)e_0(t). \quad (7)$$

将式(7)代入式(6), 有

$$\bar{E}|(-\Delta W_u C_0 + \Delta W_y)S_0 H_0 e_0(t)|^2 = 0. \quad (8)$$

由信号 e_0 的定义可知, 它是由两个互不相关的具有白噪声特性的干扰信号 e_{10} 和 e_{20} 经滤波处理后组合而成的, 干扰信号的滤波器是稳定满秩的, 因此 $\Phi_{e_0}(\omega) > 0$ 恒成立。

这种情况下, 若控制器满足 $C_0 \neq \frac{\Delta W_y}{\Delta W_u}$, 即可推导出

$$\Delta W_y = \Delta W_u = 0, \quad (9)$$

这就意味着

$$W(q, \theta_1) = W(q, \theta_2). \quad (10)$$

将这一条件反映到实际电力系统中, 表现为反馈通道控制器不过于简单, 采用或高阶复杂或非线性或时变等形式, 即可保证辨识用数据充分信息化, 系统是闭环可辨识的。

3.2 存在外加参考信号(With reference signal)

若待辨识系统反馈通道控制器过于简单, 无法保证数据充分信息化, 为了实现电力系统闭环可辨识, 则需加入一个参考信号。

假设基于拟平稳数据 Z^N 辨识得到两个模型 $W(q, \theta_1)$ 和 $W(q, \theta_2)$, 式(6)成立。

真实系统输入输出信号为

$$\begin{bmatrix} u(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -S_0(q)C_0(q) \\ G_0(q) & S_0(q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0(q)r(t) \\ H_0(q)e_0(t) \end{bmatrix}. \quad (11)$$

将式(11)代入式(6), 有

$$\begin{aligned}0 &= \bar{E} \left| \begin{bmatrix} \tilde{W}_u & \tilde{W}_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0 r(t) \\ H_0 e_0(t) \end{bmatrix} \right|^2 = \\ &\bar{E} |\tilde{W}_y H_0 e_0(t)|^2 + \bar{E} |\tilde{W}_u S_0 r(t)|^2, \quad (12)\end{aligned}$$

其中

$$\begin{bmatrix} \tilde{W}_u & \tilde{W}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta W_u & \Delta W_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -S_0 C_0 \\ G_0 & S_0 \end{bmatrix}.$$

显然, 式(12)中两项均等于0, 对其进行具体分析。

$$1) \bar{E} |\tilde{W}_y H_0 e_0(t)|^2 = 0.$$

如前所述, 信号 e_0 是由两个互不相关的具有白噪声特性的干扰信号 e_{10} 和 e_{20} 经稳定满秩的滤波器处理后组合而成, 满足 $\Phi_{e_0}(\omega) > 0$ 恒成立, 由此推导得到 $\tilde{W}_y = 0$ 。

$$2) \bar{E} |\tilde{W}_u S_0 r(t)|^2 = 0.$$

要使 $\tilde{W}_u = 0$, 就必须满足 $\bar{E} |S_0 r(t)|^2 = 0$ 。 S_0 是由 G_0 和 H_0 共同确定的, $|S_0|^2$ 可能在有限多个点取值为0。此时, 只有 $\Phi_r(\omega) > 0$ 成立, 才能使 $\bar{E} |S_0 r(t)|^2 = 0$ 。也就是说, 若外加参考信号 r 是持续激励的, 则 $\tilde{W}_u = 0$ 成立。

分析可知, 行列式

$$\begin{vmatrix} 1 & -S_0 C_0 \\ G_0 & S_0 \end{vmatrix} \equiv 1,$$

即矩阵 $\begin{bmatrix} 1 & -S_0 C_0 \\ G_0 & S_0 \end{bmatrix}$ 可逆, 进而得到

$$\begin{bmatrix} \tilde{W}_u & \tilde{W}_y \end{bmatrix} = 0. \quad (13)$$

显然, 这就意味着式(9)(10)成立。

除此, 分析发现, 若反馈通道采用诸如 $u(t) = ay(t)$ 比例形式的简单控制器, 即使参考信号 r 是持续激励的, 数据 Z^N 也不一定是充分信息化^[13], 无法实现闭环可辨识。

由此可见, 待辨识系统输入端存在外加参考信号时, 要确保数据 Z^N 充分信息化, 实现系统闭环可辨识, 需满足: 参考信号是持续激励的, 同时反馈通道控制器具有一定的复杂度, 不是简单的比例形式。

3.3 多干扰情况下的闭环可辨识条件(Closed-loop identifiability requirements with multiple disturbances)

综上所述, 电力系统中存在多个干扰信号时, 要基于类噪声信号闭环辨识得到电力系统模型参数的唯一解, 需满足以下条件之一:

1) 待辨识系统反馈通道控制器采用或高阶复杂或时变或非线性形式;

2) 待辨识系统输入端加入持续激励的参考信号, 同时反馈通道控制器不是简单的比例形式。

接下来, 从一致性、收敛性两个角度, 评价闭环辨识的准确性, 分析影响辨识效果的主要因素, 进而

提出改善多干扰情况下电力系统闭环辨识效果的措施。

4 闭环辨识一致性分析(Consistency analysis of closed-loop identification)

采用图1所示的真实系统和模型进行闭环辨识, 辨识时将干扰模型 H_θ 固定为 H_* . 预报误差的谱为

$$\left\{ \begin{aligned} \Phi_\varepsilon(\omega, \theta) = & \frac{|G_0 + B_\theta - G_\theta|^2 \Phi_u(\omega)}{|H_*|^2} + \\ & \frac{|D_\theta|^2}{|H_*|^2} \left(\lambda_{20} - \frac{\Phi_{ue_{20}}(\omega) \Phi_{e_{20}u}(\omega)}{\Phi_u(\omega)} \right) + \\ & \frac{|H_{10} - H_*|^2}{|H_*|^2} \lambda_{10} + \lambda_{10} + \lambda_{20} - \\ & \frac{|H_{10} - H_*|^2 \Phi_{ue_{10}}(\omega) \Phi_{e_{10}u}(\omega) \lambda_{20}}{|H_*|^2 (\lambda_{20} \Phi_u(\omega) - \Phi_{ue_{20}}(\omega) \Phi_{e_{20}u}(\omega))}, \\ B_\theta = & \frac{\Phi_{e_{20}u}(\omega) (H'_{20} - H_\theta)}{\Phi_u(\omega)} + \\ & \frac{\Phi_{e_{10}u}(\omega) (H_{10} - H_\theta)}{\Phi_u(\omega)}, \\ D_\theta = & (H'_{20} - H_\theta) - \\ & \frac{\Phi_{e_{10}u}(\omega) \Phi_{ue_{20}}(\omega) (H_{10} - H_\theta)}{\lambda_{20} \Phi_u(\omega) - \Phi_{ue_{20}}(\omega) \Phi_{e_{20}u}(\omega)}, \end{aligned} \right. \quad (14)$$

其中: Φ_u 表示输入信号 u 的谱, λ_{10} 和 λ_{20} 表示信号 e_{10} 和 e_{20} 的谱, $\Phi_{ue_{i0}}$ 和 $\Phi_{e_{i0}u}$ 表示信号 u 和 e_{i0} 之间的互谱($i = 1, 2$), 上式将 $e^{i\omega}$ 省略。

预报误差法基本原则是使误差尽可能小. 因此, 由式(14)可知, 系统辨识结果 G_θ 的极限为 $G_0 + B_\theta$, B_θ 表示辨识偏差。

分析可知, 输入信号 u 和干扰信号 e_{i0} 之间的互谱存在:

$$|\Phi_{e_{i0}u}(\omega)|^2 = \Phi_u^{e_{i0}}(\omega) \lambda_{i0}. \quad (15)$$

进一步将辨识偏差 B_θ 写成:

$$\begin{aligned} |B_\theta|^2 = & \left| \frac{\Phi_{e_{20}u}(\omega)}{\Phi_u(\omega)} (H'_{20} - H_\theta) + \frac{\Phi_{e_{10}u}(\omega)}{\Phi_u(\omega)} (H_{10} - H_\theta) \right|^2 \geq \\ & \frac{|\Phi_{e_{20}u}(\omega)|^2}{|\Phi_u(\omega)|^2} |H'_{20} - H_*|^2 + \frac{|\Phi_{e_{10}u}(\omega)|^2}{|\Phi_u(\omega)|^2} |H_{10} - H_*|^2. \end{aligned} \quad (16)$$

从式(16)可看出, 要提高闭环辨识的一致性, 使辨识偏差尽可能小, 应满足:

- 1) 辨识用干扰模型与真实模型尽可能一致;
- 2) 输入信号与干扰信号之间的信噪比尽可能大;
- 3) 输入信号中干扰信号的贡献尽可能小。

其中条件2)和3)与干扰信号有关. 如前所述, 本文中干扰信号为电力系统中负荷投切与变化等随机性质的小幅扰动. 这些信号是无法人为操控的. 因此, 要缩小辨识偏差, 应重点放在提高辨识用干扰模型的准确性上。

实际系统中, 各个干扰信号对应滤波器不可能全部相等, 即 $H_{10} \neq H'_{20}$, 也就是说, 辨识用干扰模型 H_* 不可能同时等于多个互不相同的真实干扰模型. 由式(14)可知, 偏差 $B_\theta \neq 0$. 换言之, 多干扰情况下, 闭环辨识必然存在偏差。

扩展到系统中存在 L 个干扰信号的情况, 对辨识偏差 B_θ 进行分析。

$$\begin{aligned} |B_\theta|^2 = & \left| \sum_{i=1}^L \left[\frac{\Phi_{e_{i0}u}(\omega)}{\Phi_u(\omega)} (H'_{i0} - H_*) \right] \right|^2 \geq \\ & \sum_{i=1}^L \left[\frac{\lambda_{i0} \Phi_u^{e_{i0}}(\omega)}{|\Phi_u(\omega)|^2} |H'_{i0} - H_*|^2 \right]. \end{aligned} \quad (17)$$

由式(17)可看出, 随着系统中干扰信号个数的增多, 偏差 B_θ 增大. 提高外加参考信号 r 的能量, 该信号对输入信号的贡献 Φ_u^r 相应增大, 输入信号的总能量 Φ_u 也随之增大, 辨识偏差 B_θ 自然随之减小。

综上所述, 对于多干扰情况下的电力系统闭环辨识而言, 辨识偏差始终存在, 并随干扰信号个数的增多而增大. 为了提高闭环辨识的一致性, 减小辨识偏差, 有必要在系统输入端加入具有一定能量的持续激励参考信号。

5 闭环辨识收敛性分析(Convergence analysis of closed-loop identification)

采用图1所示的真实系统和模型进行闭环辨识, 分别针对辨识时干扰模型未固定、干扰模型固定两种情况, 研究闭环辨识的收敛性。

5.1 辨识时干扰模型未固定(Identifying with unfixed disturbance model)

推导得到辨识模型传递函数方差为

$$\text{cov} \hat{G}_N \approx \frac{n \Phi_{v_0}(\omega)}{N \Phi_u^r(\omega)}, \quad (18)$$

其中: N 表示辨识用数据长度, 信号

$$v_0(t) = H_{10}(q)e_{10}(t) + H'_{20}(q)e_{20}(t).$$

将各信号谱表达式代入, 得出被控系统闭环辨识方差为

$$\text{cov} \hat{G}_N \approx \frac{n |H'_{20}|^2 \lambda_{20} + |H_{10}|^2 \lambda_{10}}{N |S_0|^2 \Phi_r(\omega)}. \quad (19)$$

从上式可看出, 辨识时干扰模型未固定时:

- 1) 若待辨识系统输入端不存在持续激励的参考信号, 辨识方差将趋向无穷大;
- 2) 辨识方差与模型阶次成正比, 与辨识用数据长度成反比。

扩展到系统中存在 L 个干扰信号的情况, 被控系统闭环辨识方差为

$$\text{cov}\hat{G}_N \approx \frac{n}{N} \frac{\sum_{i=1}^L |H'_{i0}|^2 \lambda_{i0}}{|S_0|^2 \Phi_r(\omega)}. \quad (20)$$

由式(20)可知, 随着系统中干扰信号个数的增多, 辨识方差将增大. 适当提高参考信号的能量, 辨识方差将随之减小. 这一结果再次说明, 多干扰情况下进行系统闭环辨识, 有必要加入持续激励的参考信号.

5.2 辨识时干扰模型固定(Identifying with fixed disturbance model)

类似地, 推导得到被控系统闭环辨识方差为

$$\text{cov}\hat{G}_N \approx \frac{n}{N} \frac{\Phi_{v_0}(\omega)}{\Phi_u(\omega)} = \frac{n}{N} \frac{|H'_{20}|^2 \lambda_{20} + |H'_{10}|^2 \lambda_{10}}{\Phi_u(\omega)}. \quad (21)$$

根据式(21)可知, 这种情况下, 即使系统输入端不存在持续激励参考信号, 辨识方差也不会趋于无穷大.

扩展到系统中存在 L 个干扰信号的情况, 被控系统闭环辨识方差为

$$\text{cov}\hat{G}_N \approx \frac{n}{N} \frac{\sum_{i=1}^L |H'_{i0}|^2 \lambda_{i0}}{\Phi_u(\omega)}. \quad (22)$$

由式(22)可知, 随着系统中干扰信号个数的增多, 闭环辨识方差将增大. 适当提高参考信号的能量, 可减小辨识方差, 提高闭环辨识的收敛性. 这也再次说明, 多干扰情况下进行系统闭环辨识, 持续激励参考信号存在的必要性.

比较辨识时干扰模型固定、干扰模型未固定两种情况下的辨识方差, 显然

$$\frac{n}{N} \frac{\Phi_{v_0}(\omega)}{\Phi_u(\omega)} < \frac{n}{N} \frac{\Phi_{v_0}(\omega)}{\Phi_u^r(\omega)}. \quad (23)$$

这说明, 辨识时固定干扰模型可减小辨识方差.

综上所述, 对于多干扰情况下的系统闭环辨识而言, 随着干扰信号个数的增多, 辨识方差将增大. 适当提高持续激励参考信号的能量、辨识时将干扰模型固定, 都将有助于缩小辨识方差, 改善闭环辨识的收敛性.

6 多干扰情况下实现电力系统闭环辨识的条件(Requirements for realizing the closed-loop identification with multiple disturbances)

综上所述, 要实现多干扰情况下的系统闭环辨识, 需满足以下条件:

1) 从闭环可辨识的角度来说, 反馈通道控制器采用或高阶复杂或非线性或时变形式, 或者系统输

入端加入持续激励参考信号, 同时反馈通道控制器不是简单的比例形式, 即可实现类噪声环境下的闭环可辨识;

2) 从辨识准确性的角度来说, 系统中多个干扰信号的存在, 导致辨识偏差必然存在, 辨识偏差和方差都将随着干扰信号个数的增多而变大. 为了改善辨识的准确性, 有必要加入具有一定能量的持续激励参考信号, 并在辨识时固定干扰模型.

结合电力系统的实际情况, 要实现电力系统模型的类噪声闭环辨识, 建议反馈通道控制器采用高阶复杂形式, 系统输入端加入具有一定能量的持续激励参考信号, 同时辨识时将干扰模型固定.

7 仿真实验(Simulation validation)

以图2所示4机两区系统为例, 仿真检验上述闭环辨识理论研究的准确性.

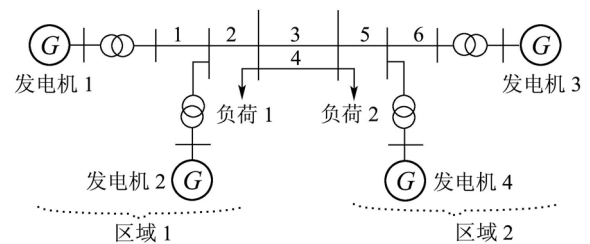


图 2 4机两区系统

Fig. 2 Four-machine two-area system

模拟实际电力系统的类噪声波动情况, 以MATLAB为仿真工具, 在系统中加入多个不同位置的随机性质小幅扰动, 该信号由高斯白噪声通过截止频率很低的低通滤波器产生. 系统响应的波动幅度根据大量的电力系统实测信号统计结果进行设置. 同时, 在电力系统中实施广域阻尼控制, 采用综合主模比和改进留数方法^[15,16]选择区域间联络线有功功率作为反馈信号, 控制信号作用于发电机4励磁侧, 也就是说, 以发电机4励磁侧输入信号、区域间联络线有功功率信号作为待辨识系统输入、输出信号, 闭环辨识被控系统模型. 采用滑动数据窗思路, 单个数据窗时长1 min, 相邻数据窗时间间隔0.5 min, 辨识采用自回归各态历经模型(auto regressive exogenous, ARX), 辨识时固定干扰模型.

采用MATLAB线性化工具理论计算被控电力系统降阶模型, 进而估计系统低频振荡主导模式参数, 作为检验辨识效果的参考标准, 如表1所示.

定义幅频响应拟合指标、相频响应误差方差指标, 评价闭环辨识效果. 显然, 辨识准确性越佳, 幅频响应拟合指标越高, 相频响应误差方差指标越低.

$$\text{errMag} = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_\omega} |M_{\text{idén}}(\omega_i) - M_0(\omega_i)|^2}{\sum_{i=1}^{N_\omega} |M_0(\omega_i)|^2} \right] \times 100\%,$$

$$err_{Pha} = \frac{1}{N_\omega} \sum_{i=1}^{N_\omega} \left\{ \Delta P_{iden}(\omega_i) - \frac{\sum_{i=1}^{N_\omega} \Delta P_{iden}(\omega_i)}{N_\omega} \right\}^2,$$

其中: M_{iden} 和 M_0 表示闭环辨识结果、真实系统的幅频响应, P_{iden} 和 P_0 表示闭环辨识结果、真实系统的相频响应, ΔP_{iden} 表示相频响应之差, N_ω 表示频率点个数.

首先, 研究干扰信号对闭环辨识效果的影响. 在仿真系统中分别加入1个、3个和5个干扰信号, 各信号分别作用于不同位置, 系统输入端未加入参考信号. 采集被控系统输入、输出类噪声信号作为分析对象, 闭环辨识系统模型, 结果如图3所示.

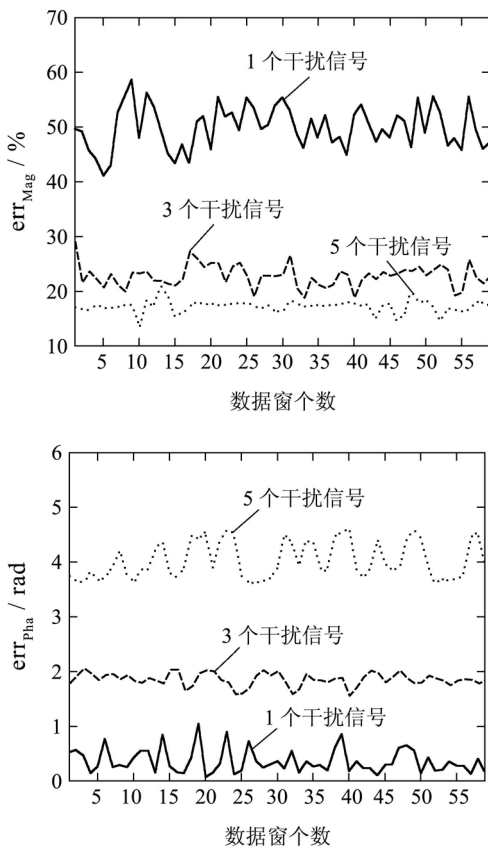


图3 干扰信号个数不同时系统闭环辨识结果
Fig. 3 Closed-loop identification results with different number of disturbance signals

从图3可看出, 随着仿真系统中干扰信号个数的增多, 闭环辨识结果的幅频响应拟合指标下降, 相频响应误差方差指标升高. 这说明, 被控系统模型的类噪声信号闭环辨识准确性随着干扰信号个数的增多而下降.

根据之前的理论研究可知, 为了改善辨识效果, 应加入持续激励参考信号. 因此, 在仿真系统中有3个干扰信号的情况下, 在系统输入端加入参考信号, 采集被控系统输入、输出类噪声信号闭环辨识系统模型, 并将分析结果与无参考信号时的结果进行比较, 如图4所示. 仿真过程中参考信号的加入没有对

系统响应波动幅度造成明显影响.

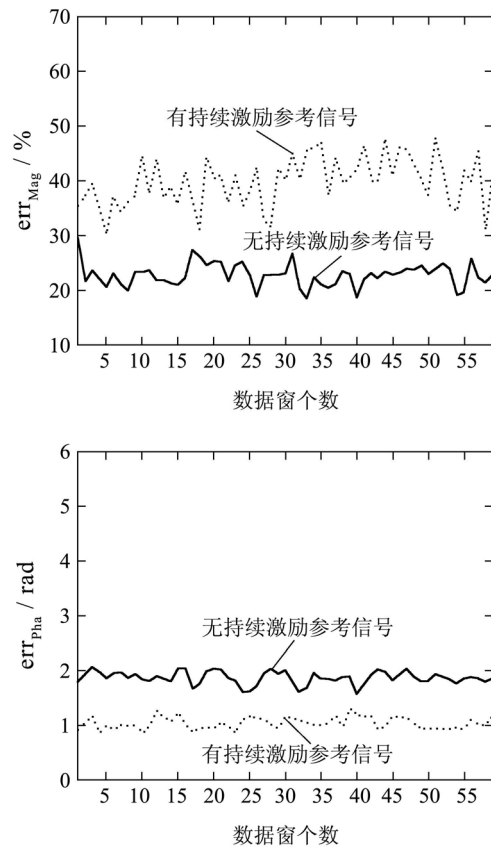
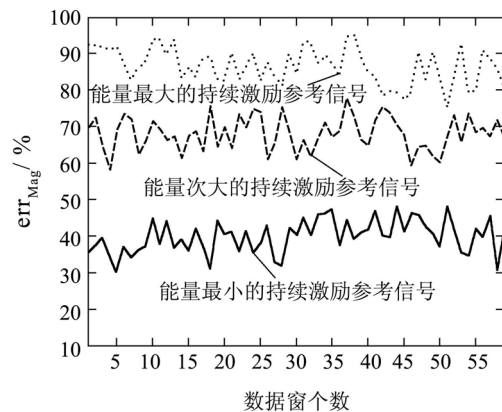


图4 无\有参考信号时系统闭环辨识结果
Fig. 4 Closed-loop identification results with\without reference signal

从图4中可看出, 仿真系统中存在多个干扰信号情况下, 持续激励参考信号的加入, 使闭环辨识结果的幅频响应拟合指标升高, 相频响应误差方差指标下降. 这说明, 持续激励的参考信号有助于改善被控系统模型类噪声信号闭环辨识的准确性.

接下来, 分析参考信号能量对辨识效果的影响. 在仿真系统中存在3个干扰信号的情况下, 逐步提高参考信号的能量, 采集被控系统输入、输出类噪声信号闭环辨识系统模型, 结果如图5所示. 仿真过程中, 这些参考信号的加入未对系统响应波动幅度造成明显影响.



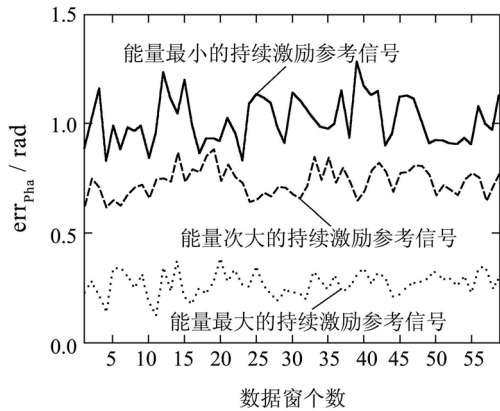


图 5 逐步提高参考信号能量时系统闭环辨识结果
Fig. 5 Closed-loop identification results with increasing energy reference signals

从图5中可看出, 仿真系统中存在多个干扰信号情况下, 随着参考信号能量的增大, 闭环辨识结果的幅频响应拟合指标升高, 相频响应误差方差指标下降. 这说明, 适当提高持续激励参考信号的能量, 有助于改善被控系统模型类噪声信号闭环辨识的准确性.

进一步估计被控电力系统低频振荡主导模式参数, 如表1所示, 并绘制其Bode图, 与理论计算模型进行比较, 如图6所示.

表 1 闭环辨识模型的低频振荡主导模式
Table 1 Dominant low frequency oscillation modes of closed-loop identification model

	闭环辨识	理论计算	误差/%
模式1频率/Hz	1.174618	1.163930	0.918268
模式1阻尼比	0.109619	0.100376	9.208263
模式2频率/Hz	0.648041	0.653445	0.827002
模式2阻尼比	0.0489100	0.053702	8.924001

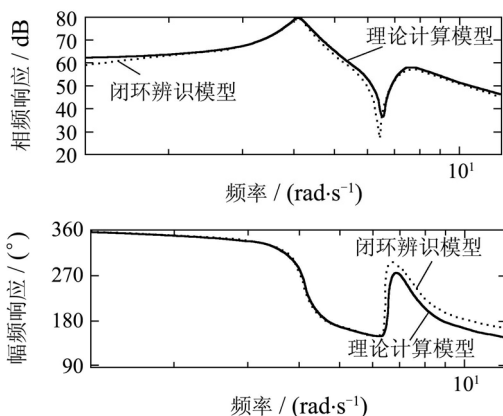


图 6 闭环辨识结果Bode图

Fig. 6 Bode figure of closed-loop identification result

从表1和图6可看出, 闭环辨识结果与理论计算模型基本吻合, 较好地体现了系统低频振荡主导模式

特性, 说明这种类噪声信号分析方法可以基本准确地辨识得到被控电力系统模型.

8 结论(Conclusions)

针对电力系统广域阻尼控制器的被控系统模型辨识问题, 本文首次提出对多干扰信号情况下的电力系统类噪声信号闭环辨识进行理论性研究. 分别从闭环可辨识性、辨识一致性和收敛性等角度进行分析, 得出以下结论: 要实现基于类噪声信号的电力系统闭环可辨识, 被控系统输入端应加入持续激励的参考信号, 同时反馈通道控制器采用高阶复杂形式; 考虑到多干扰信号的存在导致辨识偏差必然存在以及辨识偏差及方差均随干扰信号个数的增多而变大等情况, 应采取适当提高参考信号能量、辨识时固定干扰模型等措施来改善辨识效果. 最后, 在仿真系统中对上述理论研究结果进行了有效验证.

参考文献(References):

- [1] KAMWA I, GRONDIN R, DICKINSON J, et al. A minimal realization approach to reduced-order modelling and modal analysis for power system response signals[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1993, 3(8): 1020 – 1029.
- [2] TRUDNOWSKI D J, SMITH J R, SHORT T A, et al. An application of Prony method in PSS design for multi-machine systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1991, 6(1): 118 – 126.
- [3] HASANOVIC A, FELIACHI A, HASANOVIC A. Practical robust PSS design through identification of low-order transfer functions[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2004, 19(3): 1492 – 1500.
- [4] PIERRE J W, TRUDNOWSKI D J, DONNELLY M K. Initial results in electromechanical mode identification from ambient data[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1997, 12(3): 1245 – 1251.
- [5] 吴超, 陆超, 韩英铎. 计及模型定阶的电力系统低频振荡模式噪声信号辨识[J]. *电力系统自动化*, 2009, 33(21): 1 – 5. (WU Chao, LU Chao, HAN Yingduo. Power system oscillation modes estimation based on ambient signals considering model order selection[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(21): 1 – 5.)
- [6] HAUER J F, MITTELSTADT W A, MARTIN K E, et al. Use of the WECC WAMS in wide-area probing tests for validation of system performance and modeling[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2009, 24(1): 250 – 257.
- [7] 吴超, 陆超, 韩英铎, 等. 两种低频振荡模式分析方法适用性的比较研究[J]. *电力自动化设备*, 2010, 30(3): 30 – 34. (WU Chao, LU Chao, HAN Yingduo, et al. Comparison of applicability in low frequency oscillation mode identification between Prony and ARMA[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2010, 30(3): 30 – 34.)
- [8] TRUDNOWSKI D. Estimating electromechanical mode shape from synchrophasor measurements[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2008, 23(3): 1188 – 1195.
- [9] 吴超, 陆超, 韩英铎, 等. 基于类噪声信号和ARMA-P方法的电力系统振荡模式辨识[J]. *电力系统自动化*, 2010, 34(6): 1 – 6. (WU Chao, LU Chao, HAN Yingduo, et al. Identification of mode shape based on ambient signals and ARMA-P method[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, 34(6): 1 – 6.)
- [10] GEVERS M, LJUNG L, DEN HOF P V. Asymptotic variance expressions for closed-loop identification[J]. *Automatica*, 2001, 37(5): 781 – 786.
- [11] FORSSELL U, LJUNG L. Closed-loop identification revisited[J]. *Automatica*, 1999, 35(7): 1215 – 1241.

- [12] GEVERS M, BAZANELLA A S, MISKOVIC L. Identifiability and informative experiments in open and closed-loop identification[M] // *Lecture Notes in Control and Information Sciences: Modeling, Estimation and Control*. Heidelberg: Springer Verlag, 2007.
- [13] LJUNG L. *System Identification-Theory for the User*[M]. 2nd Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [14] 方崇智, 萧德云. 过程辨识[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988. (FANG Chongzhi, XIAO Deyun. *Process Identification*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988.)
- [15] 陈辉祥. 基于辨识的广域多直流阻尼协调自适应控制研究[D]. 北京: 清华大学, 2006. (CHEN Huixiang. *Studies on wide-area multi-DC damping coordinated adaptive control based on identifications*[D]. Beijing: Tsinghua University, 2006.)
- [16] 李兴源, 邵震霞, 汤广福. 多馈入高压直流输电系统的分散协调控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(16): 8-12. (LI Xingyuan, SHAO Zhenxia, TANG Guangfu. Study on decentralized coordinated control for multi-infeed hvdc transmission systems[J]. *Journal of Chinese Electrical Engineering Science*, 2005, 25(16): 8-12.)

作者简介:

吴超 (1982—), 女, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统分析与稳定控制, E-mail: wuchao@szu.edu.cn;

陆超 (1977—), 男, 副教授, 研究方向为电力系统分析与稳定控制, E-mail: luchao@tsinghua.edu.cn;

韩英铎 (1938—), 男, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 研究方向为电力系统分析与控制、电力电子与柔性输电技术, E-mail: hanyd@mail.tsinghua.edu.cn;

吴小辰 (1971—), 男, 工程师, 研究方向为电力系统稳定分析及控制, E-mail: wuxc@csg.cn;

柳勇军 (1978—), 男, 工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析和控制, E-mail: liuyj@csg.cn.

下期要目

- II型模糊集合与系统研究进展 潘永平, 孙宗海, 黄道平
- 分布参数系统的时空ARX建模及预测控制 华晨, 李柠, 李少远
- 基于联合滤波算法的复杂时变系统在线自适应逆控制 于霞, 刘建昌, 李鸿儒
- 广义幂集空间中证据冲突的原因分析 胡丽芳, 关欣, 邓勇, 何友
- 基于改进“当前”统计模型的非线性机动目标跟踪算法 黄伟平, 徐毓, 王杰
- 无线传感器网络分布式量化卡尔曼滤波 陈军勇, 邬依林, 祁恬
- 基于线性规划和遗传-粒子群算法的烧结配料多目标综合优化方法
..... 李勇, 吴敏, 曹卫华, 王春生, 赖旭芝
- 改进的频域辨识方法及其在直升机建模中的应用 刘鹏, 武哲
- T形交叉口信号配时的周期线性微分自动机建模与分析 陈阳舟, 李宏峰, 倪金
- 面向控制性能的一类非线性关联系统输出反馈动态面控制 余修端, 孙秀霞, 林岩, 董文瀚
- 非参数不确定时滞系统的重复控制 金奎, 孙明轩
- 环境干扰下分形生长的定方位控制 张丽, 刘树堂
- 活套关联系统建模及滚动时域控制 张晓东, 姚小兰, 伍清河
- 基于速度信息观测的无轴承永磁同步电机悬浮解耦控制 丁强, 王晓琳
- 时变时滞随机非线性系统的自适应神经网络跟踪控制 余昭旭, 杜红彬