

控制与决策

Control and Decision

不确定微分代数系统的目标全息反馈鲁棒自适应控制

覃建波, 李啸骢, 徐俊华, 周建阳

引用本文:

覃建波, 李啸骢, 徐俊华, 等. 不确定微分代数系统的目标全息反馈鲁棒自适应控制[J]. *控制与决策*, 2025, 40(2): 635-644.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2024.0115>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[航天器输入受限的鲁棒自适应姿态跟踪控制](#)

Robust adaptive attitude tracking control of spacecraft with constrained inputs

控制与决策. 2021, 36(9): 2297-2304 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0013>

[基于神经网络的电力系统暂态稳定分布式自适应控制](#)

Neural network-based distributed adaptive control for power system transient stability

控制与决策. 2021, 36(6): 1407-1414 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1168>

[磁悬浮开关磁阻电机的自适应终端滑模控制](#)

Adaptive terminal sliding mode control of bearingless switched reluctance motor

控制与决策. 2021, 36(6): 1449-1456 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1064>

[直线同步电动机磁悬浮系统的自适应模糊滑模控制](#)

Adaptive fuzzy sliding mode control for magnetic suspension system of linear synchronous motor

控制与决策. 2021, 36(3): 693-698 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0774>

[基于鲁棒优化的云医疗资源配置问题](#)

Robust optimization based medical resource allocation problem in cloud healthcare system

控制与决策. 2021, 36(2): 469-474 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0455>

不确定微分代数系统的目标全息反馈鲁棒自适应控制

覃建波¹, 李啸骢^{1†}, 徐俊华², 周建阳¹

(1. 南宁学院 智能制造学院, 南宁 530200; 2. 广西大学 电气工程学院, 南宁 530004)

摘要: 针对含不确定因素的多输入多输出非线性微分代数系统, 提出一种目标全息反馈鲁棒自适应控制方法 (robust adaptive control with objective holographic feedbacks, RACOHF). 该方法考虑到了系统模型参数的不确定性和外部扰动, 同时将外部输入扰动视为模型不确定性参数的变化, 在目标全息反馈控制方法的基础上, 通过设计模型不确定性部分的自适应调节律, 实现多目标的自适应跟踪控制. 将该方法应用于中间再热式汽轮发电机组蒸汽调节阀和励磁的协调控制, 结果表明, 在系统部分参数不确定和存在外部扰动的情况下, 所提出方法能确保发电机机端电压和有功功率等目标量在期望的工作点上运行而不发生静态偏移. 与目标全息反馈非线性控制 (nonlinear control with objective holographic feedbacks, NCOHF) 相比, 所提出的方法 (RACOHF) 能更好地协调系统的动、静态性能.

关键词: 非线性微分代数系统; 目标全息反馈; 模型参数不确定性; 鲁棒自适应控制; 中间再热式汽轮发电机组; 蒸汽调节阀和励磁协调控制

中图分类号: TM761

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2024.0115

引用格式: 覃建波, 李啸骢, 徐俊华, 等. 不确定微分代数系统的目标全息反馈鲁棒自适应控制[J]. 控制与决策, 2025, 40(2): 635-644.

Robust adaptive control with objective holographic feedbacks for uncertain differential algebraic system

QIN Jian-bo¹, LI Xiao-cong^{1†}, XU Jun-hua², ZHOU Jian-yang¹

(1. Intelligent Manufacturing College, Nanning University, Nanning 530200, China; 2. College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: A robust adaptive control method with objective holographic feedbacks (RACOHF) is proposed for a multi-input multi-output uncertain nonlinear differential algebraic system. The uncertainty of the system model and the external disturbances are considered by the RACOHF, and the external input disturbances are regarded as changes in uncertain parts of the system model. Then, based on the objective holographic feedbacks control, the adaptive tracking control of multi-objectives is realized through the adaptive adjustment of the uncertain parts of the model. Finally, the RACOHF is applied to the coordinated control of steam valve and excitation of reheat-type turbo-generator sets. Simulation results show that the RACOHF can ensure the control objectives such as generator terminal voltage and active power run at the expected working point without static offset under the condition of uncertain system parameters and external disturbances. Compared with nonlinear control with objective holographic feedbacks (NCOHF), the RACOHF can give better consideration to the dynamic and static performance of the system.

Keywords: nonlinear differential algebraic system; objective holographic feedbacks; model parameter uncertainty; robust adaptive control; reheat-type turbo-generator set; coordinated control of steam valve and excitation

0 引言

在实际工程应用中, 许多工程物理系统模型往往采用非线性微分代数系统 NDAS (nonlinear differential algebraic system) 模型来描述^[1-2]. 针对 NDAS 的控制问题, 国内外学者已做了大量的研

究. 刘艳红等^[3-4]提出了非线性微分代数系统的耗散 Hamilton 实现, 该方法需要构造复杂的 Hamilton 函数, 且没有考虑到系统参数的不确定性问题. 反馈线性化^[5-6]作为一种有效的非线性控制设计方法已应用于 NDAS 的控制研究. 早期通过将非线性系统完

收稿日期: 2024-01-26; 录用日期: 2024-06-02.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51267001); 广西自然科学基金项目(2024GXNSFAA010163); 广西高校中青年
教师(科研)基础能力提升项目(2023KY1867).

责任编辑: 柴利.

[†]通讯作者. E-mail: lhtlht@gxu.edu.cn.

全精确线性化,再在所获得的等效线性系统的基础上,应用线性控制理论实现非线性控制设计,设计概念清晰,但要寻找使系统完全精确线性化的函数比较困难.文献[7-8]针对NDAS系统模型,提出了多指标非线性控制方法,该方法不再追求系统的完全精确线性化,而是采用部分精确线性化方法,实现了多指标的约束控制,但该方法涉及到复杂的零动态系统的分析,且要求输出函数(目标量)与输入同维.

对于不确定性微分代数系统模型,通常采用非线性鲁棒控制^[9-11]、自适应控制及其相结合的方法,如自适应反步法^[12-13]、自适应鲁棒控制^[14-15]等.应用这些方法设计控制器时推导较为繁琐,且设计出的控制器也比较复杂.另外,由于反馈线性化设计概念清晰,设计流程明确,文献[16]将多指标非线性设计与鲁棒控制理论相结合,提出了一种新的多指标非线性鲁棒控制方法,并用于汽轮发电机组励磁和汽阀的协调控制,取得了较好的控制效果,但未能消除系统的静态偏差.文献[17-18]在反馈线性化的基础上结合自适应控制方法,用以解决电力系统中模型参数不确定问题,但没有考虑到系统的外部扰动.文献[19]针对包含参数不确定和存在外部扰动的NDAS系统,提出了一种新的多指标非线性鲁棒自适应控制方法,该方法能有效抑制系统的外部扰动并消除系统静态偏差,较好地协调了系统的动静态性能.然而,上述方法并没有改善多指标非线性控制方法存在的问题.文献[20-22]针对多输入多输出NDAS系统提出了多目标全息反馈非线性控制方法,并应用于电力系统的控制,该方法避免了多指标方法存在的问题,但没有考虑到系统中存在的不确定因素.

综上,本文提出针对不确定微分代数系统的目标全息反馈鲁棒自适应控制方法.首先,针对包含参数不确定性和存在外部扰动的NDAS系统,结合目标全息反馈非线性控制方法^[23]和鲁棒控制理论,设计出有界扰动下的目标全息反馈非线性控制律;然后,通过设计自适应控制律修正系统不确定参数,最终实现不确定微分代数系统的目标全息反馈鲁棒自适应控制;同时,本文将该方法运用到大型汽轮发电机组的综合控制中,在系统存在多个不确定参数和外部扰动的情况下,有效地解决了汽轮发电机组控制中的动、静态性能的综合协调问题.

1 微分代数系统的目标全息反馈鲁棒自适应控制设计方法

1.1 目标全息反馈鲁棒控制器设计

考虑如下部分参数不确定且存在外部输入干扰的MIMO仿射非线性微分代数系统:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, w, \theta) + g_1(x, w, \theta)u + g_2(x, w, \theta)d, \\ 0 = \rho(x, w), \\ y = h(x, w). \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x \in R^n$ 、 $w \in R^\alpha$ 和 $u \in R^q$ 分别为状态向量、约束变量和控制量; θ 为系统的不确定参数集; $d \in R^p$ 为外部输入扰动向量; $f(x, w, \theta) \in R^{n \times 1}$ 、 $g_1(x, w, \theta) \in R^{n \times q}$ 和 $g_2(x, w, \theta) \in R^{n \times p}$ 均为光滑向量场; $\rho(x, w) \in R^{\alpha \times 1}$ 为系统的代数约束方程; $y \in R^m$ 为输出函数.

根据系统(1)选择恰当的输出函数 y 可构造出如下的多目标方程:

$$I = [I_1, I_2, \dots, I_m]. \quad (2)$$

其中: $I_i = y_i - y_{ir}$, $i = 1, 2, \dots, m$, y_{ir} 为参考输出量 y_i 中的元素.系统(1)的控制问题可描述为:设计控制器保证系统的稳定性,并满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} |I_i| = 0$.

为了方便研究,给出以下定义及假设.

定义1 对于控制系统(1),假设存在任意连续可微的光滑向量场 $h(x, w)$,则 $h(x, w)$ 对光滑向量场 $f(x, w, \theta)$ 的 M 导数可标记为

$$M_f h = E(h) \cdot f. \quad (3)$$

其中

$$E(h) = \frac{\partial h(x, w)}{\partial x} - \frac{\partial h(x, w)}{\partial w} \left[\frac{\partial \rho(x, w)}{\partial w} \right]^{-1} \frac{\rho(x, w)}{\partial x}.$$

定义2 当且仅当 $M_f^i h(x, w)$ 对 $g_1(x, w)$ 的 M 导数满足以下条件时,系统(1)中输出函数 $h(x, w)$ 与输入 u 的相对关系度为 r :

$$\begin{cases} M_{g_1} M_f^i h(x, w) = 0, & i = 1, 2, \dots, r-2; \\ M_{g_1} M_f^i h(x, w) \neq 0, & i = r-1. \end{cases} \quad (4)$$

假设1 系统(1)的外部扰动均有界扰动,即满足如下约束条件:

$$\int_0^{+\infty} d^T(t)d(t)dt \leq \delta < +\infty, \quad (5)$$

其中 δ 为已知常数.

假设2 系统(1)的不确定参数满足参数线性化条件^[19],即

$$f_i(x, w, \theta) = \sum_{k=1}^L \varphi_k(x, w)\theta_k + \bar{\varphi}_i(x, w). \quad (6)$$

其中: L 为不确定参数个数, $\varphi_k(x, w)$ 和 $\bar{\varphi}_i(x, w)$ 为不含不确定参数项.若存在不确定参数 α, β 为 $\alpha \times \beta$ 或 $\frac{\alpha}{\beta}$ 等形式,可取 $\alpha \times \beta$ 或 $\frac{\alpha}{\beta}$ 为 θ_i 即可满足不确定参数线性化条件.

根据目标全息反馈控制设计方法^[23],在多目标方程(2)的 m 个目标函数中选择 q 个与系统相对关系

度为1的目标函数来构造Brunovsky标准型. 结合系统(1)和(2)构造如下Brunovsky标准型:

$$\dot{I}(t) = AI(t) + B_1v(t) + B_2\tilde{d}(t). \quad (7)$$

其中: $I(t) \in R^m$ 为状态量; $\tilde{d} \in R^q$ 为干扰量; $v(t) \in R^q$ 为控制量; $v(t) = [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_q]^T$;

$$A = \begin{bmatrix} A_{s_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & A_{s_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & A_{s_q} \end{bmatrix},$$

$$A_{s_i} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & & 0 \\ & 0 & \ddots & \\ & & \ddots & 1 \\ 0 & & & 0 \end{bmatrix}_{s_i \times s_i};$$

$$B_1 = B_2 = \begin{bmatrix} B_{s_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & B_{s_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & B_{s_q} \end{bmatrix},$$

$$B_{s_i} = [0 \ \dots \ 0 \ 1]^T,$$

$$s_1 + s_2 + \dots + s_q = m.$$

令 $\beta_i = s_1 + s_2 + \dots + s_i$ ($i \geq 1$), 将 g_1 和 g_2 分别表达为 $g_1 = [g_{11}, g_{12}, \dots, g_{1q}]$ 和 $g_2 = [g_{21}, g_{22}, \dots, g_{2q}]$, 则式(7)中 $v(t)$ 和 $\tilde{d}(t)$ 分别为

$$\begin{cases} v_1 = M_f h_{\beta_1}(x, w, \tilde{\theta}) + M_{g_{11}} h_{\beta_1}(x, w, \tilde{\theta})u_1 - \dot{y}_{\beta_1 r}, \\ v_2 = M_f h_{\beta_2}(x, w, \tilde{\theta}) + M_{g_{12}} h_{\beta_2}(x, w, \tilde{\theta})u_2 - \dot{y}_{\beta_2 r}, \\ \vdots \\ v_q = M_f h_{\beta_q}(x, w, \tilde{\theta}) + M_{g_{1q}} h_{\beta_q}(x, w, \tilde{\theta})u_q - \dot{y}_{\beta_q r}; \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \tilde{d}_1 = \\ M_{g_{21}} h_{\beta_1}(x, w, \tilde{\theta})d_1 + \dots + M_{g_{2p}} h_{\beta_1}(x, w, \tilde{\theta})d_p, \\ \tilde{d}_2 = \\ M_{g_{21}} h_{\beta_2}(x, w, \tilde{\theta})d_1 + \dots + M_{g_{2p}} h_{\beta_2}(x, w, \tilde{\theta})d_p, \\ \vdots \\ \tilde{d}_q = \\ M_{g_{21}} h_{\beta_q}(x, w, \tilde{\theta})d_1 + \dots + M_{g_{2p}} h_{\beta_q}(x, w, \tilde{\theta})d_p. \end{cases} \quad (9)$$

其中 $\tilde{\theta}$ 为系统不确定参数 θ 的估计值.

由式(1)、(2)和(7)可知, 目标全息反馈法通过选择恰当的目标函数可将非线性系统(1)的控制问题转化为线性系统(7)的控制问题. 由假设(1)可知系统(7)也应满足有界扰动条件, 因此系统(7)的鲁棒控制问题可解释为求有界干扰下的最优控制问题. 根据鲁棒控制理论, 系统鲁棒控制问题有解的条件是存在一个正定矩阵 P 满足下述Riccati方程^[15-16]:

$$PA + A^T P - PB_1 B_1^T P + PB_2 B_2^T P + Q = 0. \quad (10)$$

此时系统(7)取得最优的控制策略为

$$v(t) = -B_1^T P I(t) = -K I(t). \quad (11)$$

根据式(8)和(11)可得 x 空间的非线性控制律为

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_q \end{bmatrix} = \tilde{B}^{-1} \begin{bmatrix} v_1 + \dot{y}_{\beta_1 r} - M_f h_{\beta_1} \\ v_2 + \dot{y}_{\beta_2 r} - M_f h_{\beta_2} \\ \vdots \\ v_q + \dot{y}_{\beta_q r} - M_f h_{\beta_q} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\tilde{B} = \begin{bmatrix} M_{g_{11}} h_{\beta_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & M_{g_{12}} h_{\beta_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & M_{g_{1q}} h_{\beta_q} \end{bmatrix}.$$

1.2 自适应控制器设计

对于系统(1), 若将系统的输入扰动对系统的影响视为系统不确定参数的变化, 即扰动部分 $g_2(x, w, \theta)d$ 对系统的影响等效于不确定参数从 θ 变化为 θ_{new} , 则 $f(x, w, \theta) + g_1(x, w, \theta)u + g_2(x, w, \theta)d \Rightarrow f(x, w, \theta_{new}) + g_1(x, w, \theta_{new})u$. 仍然用 θ 表示变化后的不确定参数, 则扰动作用下实际的系统可表示为

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, w, \theta) + g_1(x, w, \theta)u, \\ 0 = \rho(x, w), \\ y = h(x, w). \end{cases} \quad (13)$$

结合系统(13)和目标方程(2)构造如下的Brunovsky标准型:

$$\dot{I}(t) = AI(t) + B_1 v^*(t). \quad (14)$$

根据式(8), 系统的实际输入为

$$\begin{cases} v_1^* = M_f h_{\beta_1}(x, w, \theta) + M_{g_{11}} h_{\beta_1}(x, w, \theta)u_1 - \dot{y}_{\beta_1 r}, \\ v_2^* = M_f h_{\beta_2}(x, w, \theta) + M_{g_{12}} h_{\beta_2}(x, w, \theta)u_2 - \dot{y}_{\beta_2 r}, \\ \vdots \\ v_q^* = M_f h_{\beta_q}(x, w, \theta) + M_{g_{1q}} h_{\beta_q}(x, w, \theta)u_q - \dot{y}_{\beta_q r}. \end{cases} \quad (15)$$

由式(8)和(15)有

$$v^* = v + \begin{bmatrix} M_f h_{\beta_1}(x, w, \theta) - M_f h_{\beta_1}(x, w, \tilde{\theta}) \\ M_f h_{\beta_2}(x, w, \theta) - M_f h_{\beta_2}(x, w, \tilde{\theta}) \\ \vdots \\ M_f h_{\beta_q}(x, w, \theta) - M_f h_{\beta_q}(x, w, \tilde{\theta}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \{M_{g_{11}} h_{\beta_1}(x, w, \theta) - M_{g_{11}} h_{\beta_1}(x, w, \tilde{\theta})\} u_1 \\ \{M_{g_{12}} h_{\beta_2}(x, w, \theta) - M_{g_{12}} h_{\beta_2}(x, w, \tilde{\theta})\} u_2 \\ \vdots \\ \{M_{g_{1q}} h_{\beta_q}(x, w, \theta) - M_{g_{1q}} h_{\beta_q}(x, w, \tilde{\theta})\} u_q \end{bmatrix}. \quad (16)$$

在目标全息反馈控制器的设计中,输出函数 $y(x, w)$ 一般选取为状态变量和约束变量的线性组合,根据定义1和假设1可知, $M_f h$ 和 $M_{g_i} h$ 也满足参数线性化条件,有

$$\begin{cases} M_f h(x, w, \theta) = E(h)(\varphi(x, w)\theta + \tilde{\varphi}(x, w)), \\ M_{g_{i_i}} h(x, w, \theta) = E(h)(\eta_i(x, w)\theta + \tilde{\eta}_i(x, w)), \end{cases}$$

则式(16)可写为

$$v^* = v + W(x, w, u)(\theta - \tilde{\theta}). \quad (17)$$

其中

$$W(x, w, u) = \begin{bmatrix} E(h_{\beta_1})\varphi(x, w) + E(h_{\beta_1})\eta_1(x, w)u_1 \\ E(h_{\beta_2})\varphi(x, w) + E(h_{\beta_2})\eta_2(x, w)u_2 \\ \vdots \\ E(h_{\beta_q})\varphi(x, w) + E(h_{\beta_q})\eta_q(x, w)u_q \end{bmatrix}.$$

对于系统(14),选择Lyapunov函数为

$$V(I, \tilde{\theta}) = I^T P I + (\theta - \tilde{\theta})^T \lambda (\theta - \tilde{\theta}). \quad (18)$$

其中: P 为正定矩阵; λ 为自适应学习速率正定矩阵, $\lambda = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_L\}$.根据式(14)和(18),结合(10)和(11)并整理有

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= I^T P (AI + B_1 v^*) + (AI + B_1 v^*)^T P I - \\ &\quad \dot{\tilde{\theta}}^T \lambda (\theta - \tilde{\theta}) - (\theta - \tilde{\theta})^T \lambda \dot{\tilde{\theta}} = \\ &\quad - I^T \left(Q + \frac{1}{\beta} P B_2 B_2^T P + P B_1 B_1^T P \right) I + \\ &\quad 2(\theta - \tilde{\theta})^T W^T B_1^T P I - 2(\theta - \tilde{\theta})^T \lambda \dot{\tilde{\theta}}. \end{aligned} \quad (19)$$

选择如下自适应控制律:

$$\dot{\tilde{\theta}} = \lambda^{-1} W^T(x, w, u) B_1^T P I, \quad (20)$$

将式(20)代入(19),则有

$$\frac{dV}{dt} = -I^T \left(Q + \frac{1}{\beta} P B_2 B_2^T P + P B_1 B_1^T P \right) I < 0. \quad (21)$$

根据Lyapunov稳定性定理可知,选择如式(20)所示的自适应控制律时,系统一致渐近稳定.由式(11)、(12)和(20)可得系统的目标全息反馈鲁棒

自适应控制律(robust adaptive control with objective holographic feedbacks, RACOHF)为

$$\begin{cases} u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_q \end{bmatrix} = \tilde{B}^{-1} \begin{bmatrix} v_1 + \dot{y}_{\beta_1 r} - M_f h_{\beta_1}(x, w, \tilde{\theta}) \\ v_2 + \dot{y}_{\beta_2 r} - M_f h_{\beta_2}(x, w, \tilde{\theta}) \\ \vdots \\ v_q + \dot{y}_{\beta_q r} - M_f h_{\beta_q}(x, w, \tilde{\theta}) \end{bmatrix}, \\ v = [v_1, v_2, \dots, v_q]^T = -B_1^T P I, \\ \dot{\tilde{\theta}} = \lambda^{-1} W^T(x, w, u) B_1^T P I. \end{cases} \quad (22)$$

2 汽轮发电机组的RACOHF控制律设计

2.1 中间再热式汽轮发电机组的微分代数模型

中间再热式汽轮发电机组的控制系统^[24]如图1所示.

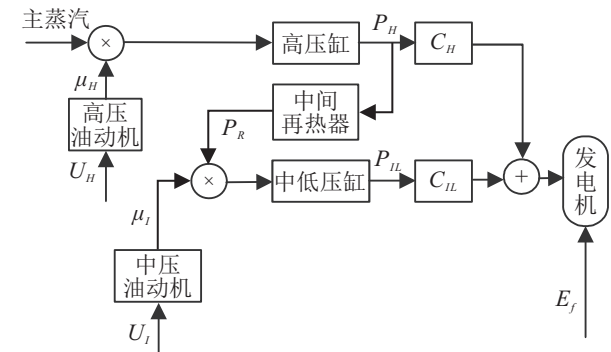


图1 中间再热汽轮发电机组控制系统

考虑到系统的输入扰动和部分参数的不确定性,

图1所示的控制系统数学模型可表示为

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta} & \dot{\omega} & \dot{E}'_q & \dot{P}_H & \dot{\mu}_H & \dot{P}_R & \dot{P}_{IL} & \dot{\mu}_I \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} (\omega - 1)\omega_0 \\ -\frac{1}{T_J}(C_H P_H + C_{IL} P_{IL} - P_e) - \frac{D}{T_J}(\omega - 1) \\ -\frac{1}{T'_{d0}} E_q + \frac{K_1}{T'_{d0}} E_f + d_1 \\ \frac{1}{T_H}(\mu_H - P_H) \\ -\frac{1}{T_{H9}} \mu_H + \frac{K_2}{T_{H9}} U_H + d_2 \\ \frac{1}{T_R}(P_H - P_R) \\ \frac{1}{T_{IL}}(P_R \mu_I - P_{IL}) \\ -\frac{1}{T_{I9}} \mu_I + \frac{K_3}{T_{I9}} U_I + d_3 \end{bmatrix}. \quad (23)$$

其中:状态变量 δ 、 ω 、 E'_q 、 P_H 、 μ_H 、 P_R 、 P_{IL} 和 μ_I 分别表示发电机功角、发电机转子角速度、发电机暂态电势、汽轮机高压缸输入机械功率、高压缸汽阀开度、中间再热器输出功率、汽轮机中低压缸输入机械

功率和中压缸的汽阀开度;控制量 E_f 、 U_H 和 U_I 分别表示发电机励磁电压、高压缸的汽阀开度控制信号和中压缸的汽阀开度控制信号; C_H 为高压缸的功率分配系数; C_{IL} 为中低压缸的等效功率分配系数; D 为发电机阻尼系数; T'_{d0} 为励磁绕组时间常数; T_J 为汽轮发电机组转子的惯性时间常数; T_H 为高压缸的时间常数; T_{Hg} 为高压油动机时间常数; T_R 为中间再热器时间常数; T_{IL} 为中低压缸的等效时间常数; T_{Ig} 为中压油动机时间常数; K_1 、 K_2 和 K_3 表示控制器实际输入和理想输入之间的误差,理想情况下其值均为 1; d_1 为发电机励磁扰动, d_2 和 d_3 为调速器外部扭矩扰动。

考虑单机无穷大电力系统,有如下系统的代数约束方程:

$$\begin{cases} P_e = \frac{E'_q U}{x'_{d\Sigma}} \sin \delta + \frac{U^2(x'_d - x_q)}{2x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} \sin 2\delta, \\ E_q = \frac{x_{d\Sigma} E'_q}{x'_{d\Sigma}} - \frac{x_d - x'_d}{x'_d} U \cos \delta, \\ V_t = \sqrt{V_{tq}^2 + V_{td}^2}, \\ V_{tq} = \frac{x_e E'_q}{x'_{d\Sigma}} + \frac{x'_d}{x'_{d\Sigma}} U \cos \delta, \\ V_{td} = \frac{x_q}{x_{q\Sigma}} U \sin \delta. \end{cases} \quad (24)$$

其中: U 为无穷大母线电压, V_t 为机端电压; x_d 为发电机直轴电抗, x'_d 为发电机直轴暂态电抗, x_q 为发电机交轴电抗, x_e 为变压器和输电线路的总等效电抗,且 $x_{d\Sigma} = x_d + x_e$, $x'_{d\Sigma} = x'_d + x_e$, $x_{q\Sigma} = x_q + x_e$ 。

根据式(23)和(24),令 $u = [E_f, U_H, U_I]^T$, $d = [d_1, d_2, d_3]^T$, $w = [P_e, E_q, V_t, V_{tq}, V_{td}]^T$, $x = [\delta, \omega, E', P_H, \mu_H, P_R, P_{IL}, \mu_I]^T$, 可得如式(1)所示的微分代数系统。

2.2 RACOHF 控制律设计

根据目标全息反馈鲁棒自适应控制设计方法,首先要确定汽轮发电机组的多目标方程。发电机在运行过程中主要关心 3 个输出量,分别是发电机机端电压 V_t 、输出有功功率 P_e 和转速 ω 。发电机励磁控制 E_f 的主要任务是保证发电机具有良好的电压调节和改善发电机的运行稳定性。高压缸汽阀开度控制 U_H 的主要任务是保证发电机的有功输出;中压缸汽阀开度控制 U_I 的主要任务是确保再热器的有功输出和中压缸汽阀开度适应电磁功率的变化,同时确保中压缸汽阀在稳态时全开。根据以上分析选取输出向量为 $y = [\omega, V_t, P_e, \mu_H, \mu_I]$, 由输出向量及其期望跟踪的目标可确定汽轮发电机组的多目标方程组为

$$I_1 = \omega - 1, I_2 = V_t - V_0, I_3 = P_e - P_0,$$

$$I_4 = \mu_H - P_e, I_5 = \mu_I - P_e/P_R, \quad (25)$$

其中 P_0 和 V_0 分别是发电机的有功功率和机端电压的期望值。

根据汽轮发电机组的数学模型知,输出向量中发电机机端电压 V_t 、 μ_H 和 μ_I 与系统(23)具有一阶关系度,因此可选择与 V_t 、 μ_H 和 μ_I 有关的目标方程(对应 I_2 、 I_4 和 I_5)来构造如式(7)所示的标准型。另外, V_t 、 μ_H 和 μ_I 的导数只与不确定参数 T'_{d0} 、 T_{Hg} 和 T_{Ig} 相关,与系统中其他不确定参数无关,即不确定参数 D 、 T_J 、 T_H 、 T_R 和 T_{IL} 并不影响所构造线性系统的稳定性能,故对于系统(23)选择不确定参数为 $\theta = [1/T'_{d0}, K_1/T'_{d0}, 1/T_{Hg}, K_2/T_{Hg}, 1/T_{Ig}, K_3/T_{Ig}]$ 。分别对目标方程 I_2 、 I_4 和 I_5 求导,结合式(23)和(24)后整理可得

$$\begin{aligned} \dot{I}_2 = & C_{p11}(x, w, \tilde{\theta}) + C_{p12}(x, w, \tilde{\theta})E_f + C_{p13}(x, w, \tilde{\theta})d_1, \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_4 = & C_{p21}(x, w, \tilde{\theta}) + C_{p22}(x, w, \tilde{\theta})U_H + C_{p23}(x, w, \tilde{\theta})d_2, \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_5 = & C_{p31}(x, w, \tilde{\theta}) + C_{p32}(x, w, \tilde{\theta})U_I + C_{p33}(x, w, \tilde{\theta})d_3. \end{aligned} \quad (28)$$

其中

$$\begin{cases} C_{p11}(x, w, \tilde{\theta}) = \frac{V_{tq}x_e((x_d - x'_d)U \cos \delta - x_{d\Sigma}E'_d)}{V_t(x'_{d\Sigma})^2} \tilde{\theta}_1 + \left(\frac{V_{td}x_q \cos \delta}{x_{q\Sigma}} - \frac{V_{tq}x'_d \sin \delta}{x'_{d\Sigma}} \right) U(\omega - 1)\omega_0, \\ C_{p12}(x, w, \tilde{\theta}) = \frac{V_{tq}x_e}{V_t x'_{d\Sigma}} \tilde{\theta}_2, \\ C_{p13}(x, w, \tilde{\theta}) = \frac{V_{tq}x_e}{V_t x'_{d\Sigma}}; \\ C_{p21}(x, w, \tilde{\theta}) = -\mu_H \tilde{\theta}_3 - \dot{P}_e, \\ C_{p22}(x, w, \tilde{\theta}) = \tilde{\theta}_4, \\ C_{p23}(x, w, \tilde{\theta}) = 1; \\ C_{p31}(x, w, \tilde{\theta}) = -\mu_I \tilde{\theta}_5 - (P_e/P_R)', \\ C_{p32}(x, w, \tilde{\theta}) = \tilde{\theta}_6, \\ C_{p33}(x, w, \tilde{\theta}) = 1. \end{cases}$$

结合多目标方程(25),根据式(26)~(28)主动构造如下的 Brunovsky 标准型:

$$\dot{I} = AI + B_1v + B_2\tilde{d}. \quad (29)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B_1 = B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{d} = \begin{bmatrix} C_{p13}(x, w, \tilde{\theta})d_1 \\ C_{p23}(x, w, \tilde{\theta})d_2 \\ C_{p33}(x, w, \tilde{\theta})d_3 \end{bmatrix},$$

$$v = [v_1 \ v_2 \ v_3]^T = \begin{bmatrix} C_{p11}(x, w, \tilde{\theta}) \\ C_{p21}(x, w, \tilde{\theta}) \\ C_{p31}(x, w, \tilde{\theta}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{p12}(x, w, \tilde{\theta})E_f \\ C_{p22}(x, w, \tilde{\theta})U_H \\ C_{p32}(x, w, \tilde{\theta})U_I \end{bmatrix}. \quad (30)$$

由式(11)可知,此时线性系统(29)的鲁棒控制律为

$$v(t) = -B_1^T PI(t) = \begin{bmatrix} -k_{11}I_1 - k_{12}I_2 \\ -k_{21}I_3 - k_{22}I_4 \\ -k_{31}I_5 \end{bmatrix}. \quad (31)$$

将式(31)代入(30)可得到原非线性系统的非线性控制律为

$$u = \begin{bmatrix} E_f \\ U_H \\ U_I \end{bmatrix} = \tilde{B}^{-1} \begin{bmatrix} v_1 - C_{p11}(x, w, \tilde{\theta}) \\ v_2 - C_{p21}(x, w, \tilde{\theta}) \\ v_3 - C_{p31}(x, w, \tilde{\theta}) \end{bmatrix}. \quad (32)$$

其中

$$\tilde{B} = \begin{bmatrix} C_{p12}(x, w, \tilde{\theta}) & 0 & 0 \\ 0 & C_{p22}(x, w, \tilde{\theta}) & 0 \\ 0 & 0 & C_{p32}(x, w, \tilde{\theta}) \end{bmatrix}.$$

由于系统的参数不准确,同时还考虑将外部干扰部分视为系统不确定参数的变化,利用多目标方程(25)可构造出如式(14)的线性系统,此时线性系统的实际输入为

$$v^* = \begin{bmatrix} C_{p11}(x, w, \theta) \\ C_{p21}(x, w, \theta) \\ C_{p31}(x, w, \theta) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{p12}(x, w, \theta)E_f \\ C_{p22}(x, w, \theta)U_H \\ C_{p32}(x, w, \theta)U_I \end{bmatrix}. \quad (33)$$

根据式(26)和(28)知,系统不确定参数满足参数线性化条件.结合式(30)和(33)可得

$$v^* = v + W(x, w, u)(\theta - \tilde{\theta}). \quad (34)$$

其中

$$W(x, w, u) = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\mu_H & u_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_I & u_3 \end{bmatrix},$$

$$W_{11} = -\frac{V_{tq}x_e(x_{d\Sigma}E'_d - (x_d - x'_d)U \cos \delta)}{V_t(x'_{d\Sigma})^2},$$

$$W_{12} = \frac{V_{tq}x_e}{V_t x'_{d\Sigma}} u_1.$$

根据上式计算所得的,由式(20)、(31)和(32)得到中间再热式汽轮发电机组的目标全息反馈鲁棒自适应控制律RACOHF为

$$\begin{cases} u = \begin{bmatrix} E_f \\ U_H \\ U_I \end{bmatrix} = \tilde{B}^{-1} \begin{bmatrix} v_1 - C_{p11}(x, w, \tilde{\theta}) \\ v_2 - C_{p21}(x, w, \tilde{\theta}) \\ v_3 - C_{p31}(x, w, \tilde{\theta}) \end{bmatrix}, \\ v(t) = -B_1^T PI = \begin{bmatrix} -k_{11}I_1 - k_{12}I_2 \\ -k_{21}I_3 - k_{22}I_4 \\ -k_{31}I_5 \end{bmatrix}, \\ \dot{\tilde{\theta}} = \lambda^{-1}W^T(x, w, u)B_1^T PI. \end{cases} \quad (35)$$

3 仿真分析

为了验证本文设计的目标全息反馈鲁棒自适应控制律的有效性,将设计得到的控制律应用于单机无穷大电力系统中再热式汽轮发电机组的汽阀和励磁的协调控制,同时将该方法与文献[25]所述的方法进行比较.为了便于阅读,将文献[25]的方法称为NCOHF.根据文献[25],系统模型有关参数为: $x_d = 2.12$ pu, $x_q = 2.12$ pu, $x'_d = 0.26$ pu, $x_e = 0.24$ pu, $D = 2$ pu, $T_J = 4.06$ s, $T_R = 10$ s, $T_H = 0.2$ s, $T_{IL} = 0.2$ s, $C_H = 0.3$, $C_{IL} = 0.7$.系统不确定参数的估计值为: $T'_{d0} = 5.8$ s, $T_{Hg} = 0.2$ s, $T_{Ig} = 0.2$ s, $K_1 = K_2 = K_3 = 1$.因此,有

$$\tilde{\theta} = [0.1724, 0.1724, 5, 5, 5, 5]^T.$$

工作点: $P_0 = 0.6$ pu, $V_0 = 1.02926$ pu, $\delta_0 = 50^\circ$.

假设系统不确定参数的实际值为 $T'_{d0} = 6.5$ s, $T_{Hg} = 0.3$ s, $T_{Ig} = 0.4$ s, $K_1 = K_2 = K_3 = 1.05$,则有

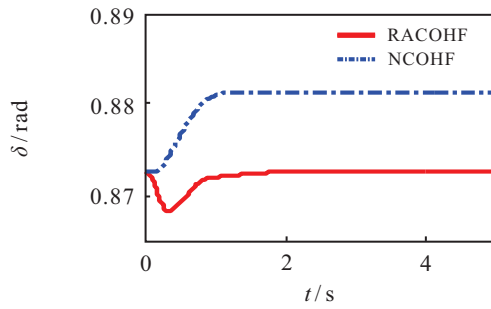
$$\theta = [0.1538, 0.1615, 3.3333, 3.5, 2.5, 2.625]^T.$$

对于NCOHF和RACOHF控制器,选控制器参数 $k_{11} = -20$, $k_{12} = 30$, $k_{21} = 8$, $k_{22} = 15$, $k_{31} = 10$.对于RACOHF控制器,依据经验并适当调整,取其自适应学习速率为 $\lambda = [0.4, 300, 0.2, 500, 0.2, 500]^T$.

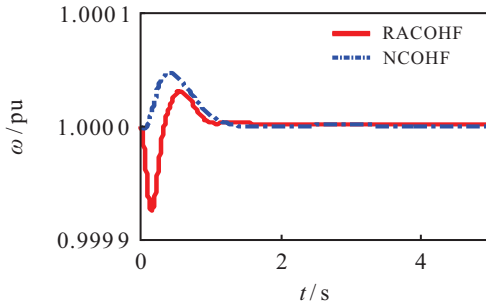
3.1 静态跟踪及抗干扰性能

3.1.1 静态跟踪性能

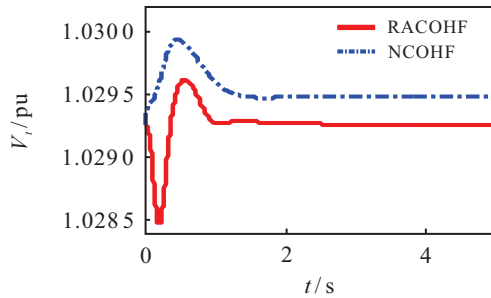
仿真中系统的实际参数按照 θ 设置,控制器参数按照不确定参数的估计值 $\tilde{\theta}$ 设置,后续的仿真均按此进行设置.在未考虑任何外部扰动的情况下,系统有关响应曲线如图2所示.



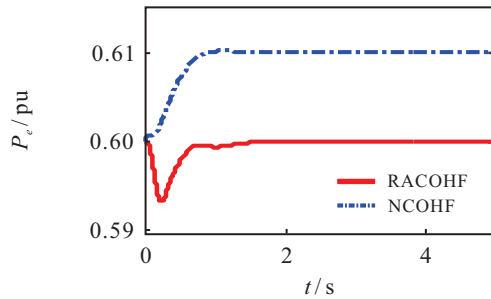
(a) 发电机功角曲线



(b) 发电机角速度曲线



(c) 发电机机端电压曲线



(d) 发电机有功功率曲线

图2 两种控制器作用下的稳态跟踪性能

由图2可知,NCOHF没有考虑到系统的参数不确定性,其控制平衡点与系统工作点存在稳态偏差,而RACOHF能够将系统指标 δ 、 ω 、 P_e 和 V_t 控制在期望工作点而不存在静态偏移,表明RACOHF具有较好的静态跟踪性能。

3.1.2 抗干扰性能

系统存在如图3所示的外部输入扰动,在控制器的作用下系统有关状态量的响应曲线如图4所示.由图4可知,由于NCOHF控制律未能消除系统参数不确定性和外部扰动对系统的影响,导致系统的功角、机端电压和有功输出在稳态时存在较大的静态偏移,

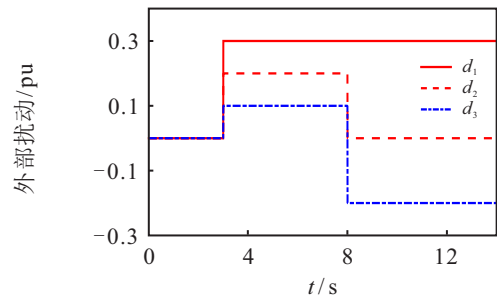
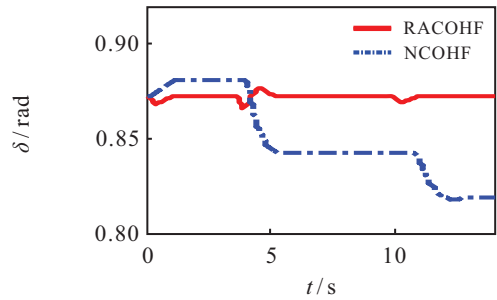
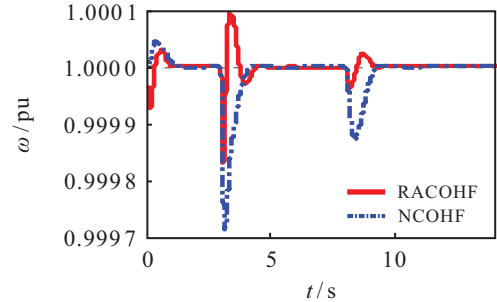


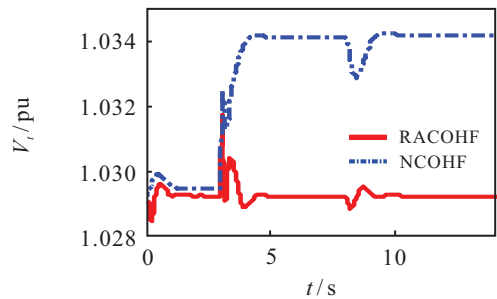
图3 系统外部扰动



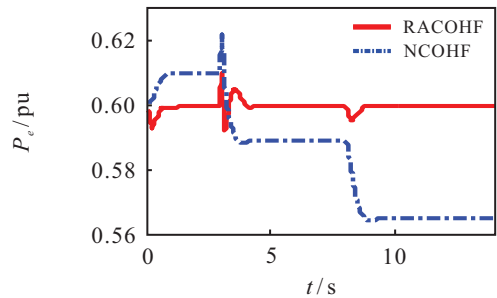
(a) 发电机功角曲线



(b) 发电机角速度曲线



(c) 发电机机端电压曲线



(d) 发电机有功功率曲线

图4 外部扰动时的系统响应曲线

间接说明NCOHF控制方法对系统模型的精确性和外部扰动有较高的要求.而RACOHF控制律通过自适应律调节系统的不确定参数,能根据外部扰动的大

小来调节不确定参数,使系统的功角、机端电压和有功输出稳态时能准确维持在工作点上而没有产生静态偏移,有效地消除了系统参数不确定性和外部扰动对系统的影响,表明RACOHF具有较好的鲁棒性能。

3.2 暂态稳定性能

为了考查发电机在控制律作用下的暂态稳定性能,对3种情况进行仿真。仿真过程中系统的外部输入扰动 $d = [0.5, 0.2, 0.2]^T$ 始终存在。

3.2.1 三相短路故障

系统在0.5s时,发电机出口变压器高压侧发生三相对称短路,经0.15s后故障切除并重合闸成功,系统有关量的动态响应曲线如图5所示。

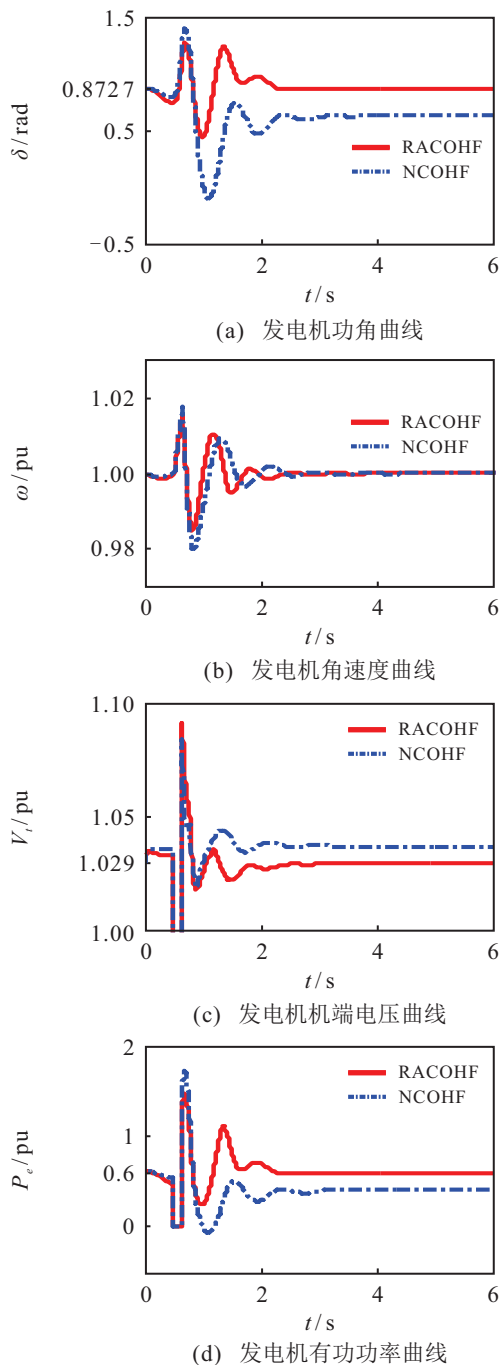


图5 三相短路时系统响应曲线

由图5可知,由于存在参数不确定性和外部扰动,系统发生三相短路故障且恢复正常工作后,虽然NCOHF能使系统迅速稳定,但却存在一定的静态偏移,而RACOHF能使系统在故障恢复后迅速稳定到工作点且没有产生静态偏移。以上结果同时表明NCOHF和RACOHF均能保证发电机具有良好的动态稳定性能,但RACOHF能通过系统不确定参数的自适应调节抵消掉系统不确定性和外部扰动对系统的影响,使系统回到工作点处稳定运行。

3.2.2 机械功率扰动

系统在0.5s时机械功率输入阶跃调高10%,系统有关状态量的响应曲线如图6所示。

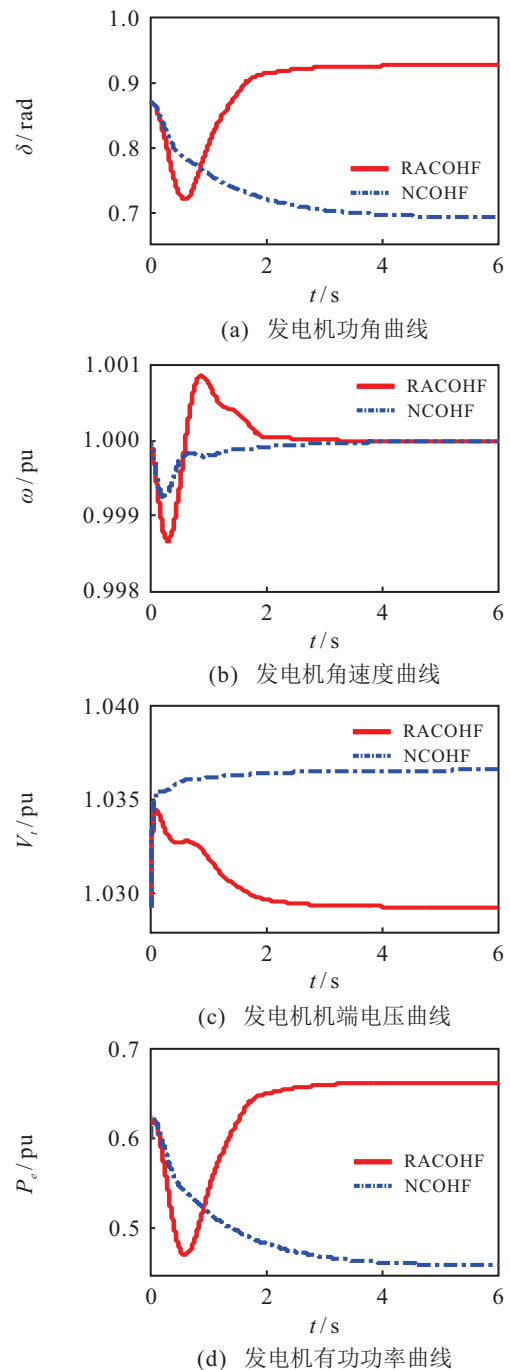


图6 原动机输入扰动时系统响应曲线

由图6(d)可知: RACOHF 仍能在扰动存在的情况下实现发电机有功功率的精确跟踪. 另外, 从图6(a)、6(c)可以看出, RACOHF 能保证功率调节时发电机机端电压最终恢复到工作点而不会产生静态偏移, 且随着有功输出的增加发电机的功角被拉大, 这符合发电机的功率调节特性; NCOHF 则受到扰动的影响, 在调高机械功率后有功输出反而下降, 未能实现有功功率的精确跟踪, 导致发电机功角也下降, 机端电压产生静态偏移.

3.2.3 机端电压调节扰动

在0.5s时, 发电机机端电压给定值阶跃调高10%, 系统有关状态量的响应曲线如图7所示.

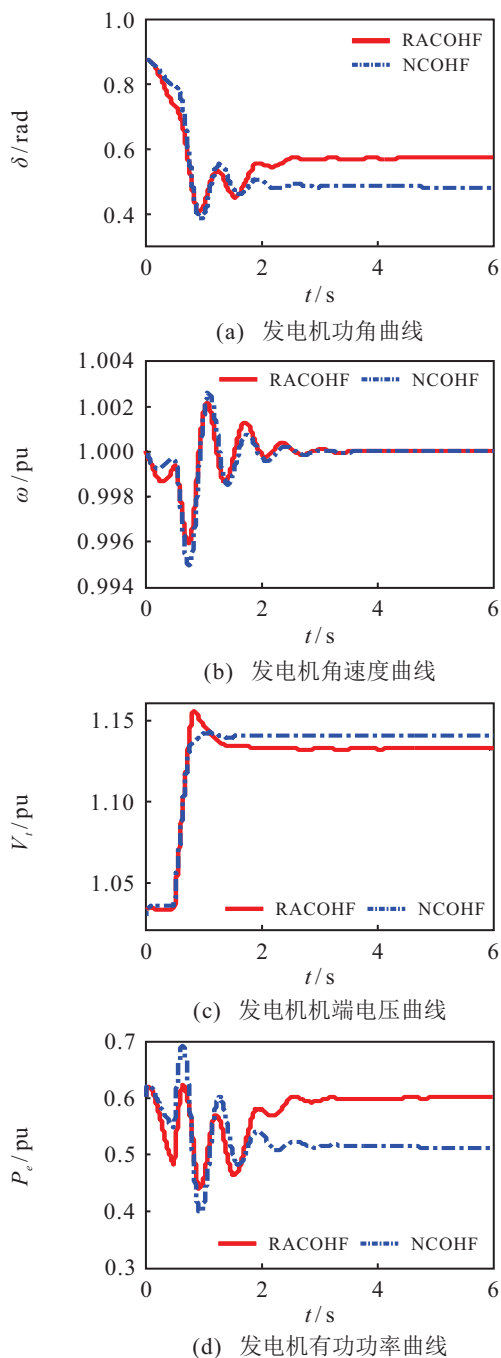


图7 调压扰动时系统响应曲线

从图7可知: 当电压调高时, 励磁电压要相应升高, 这时需减小功角以维持有功功率输出不变, 但由于扰动的存在, NCOHF 未能准确地跟踪机端电压的变化, 不仅机端电压产生静态偏移, 有功输出也未能回到工作点; RACOHF 却可以消除扰动对系统的影响, 使发电机机端电压能准确跟踪给定值, 且维持有功输出不变. 因此, 所提出的 RACOHF 具有更好的电压调节特性.

4 结论

针对存在参数不确定性和外部扰动的非线性微分代数系统, 本文提出了目标全息反馈鲁棒自适应控制方法. 该方法保留了目标全息反馈非线性设计方法的优点, 同时结合了自适应控制理论, 通过自适应方法来调整不确定参数以抵消参数不确定性和外部扰动对系统造成的不利影响, 有效地解决了不确定微分代数系统的控制问题.

针对中间再热式汽轮发电机组的协调控制问题, 采用本文所提出的方法设计了汽阀和励磁协调控制律, 仿真结果表明了所设计控制律的鲁棒性和自适应性, 具有良好的动静态调节能力. 本文所提出的目标全息反馈鲁棒自适应控制方法对不确定性微分代数系统具有很好的控制效果.

参考文献(References)

- [1] Di Franco P, Scarcioffi G, Astolfi A. Stability of nonlinear differential-algebraic systems via additive identity[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2020, 7(4): 929-941.
- [2] Li G Y, Feng Y. Structural analysis for differential algebraic systems[J]. Control Theory & Applications, 2017, 34(8): 1019-1027.
- [3] 刘艳红, 李春文. 电力系统微分代数模型耗散 Hamilton 实现[J]. 控制与决策, 2007, 22(4): 403-407. (Liu Y H, Li C W. Dissipative Hamiltonian realization of power systems with nonlinear differential algebraic system model[J]. Control and Decision, 2007, 22(4): 403-407.)
- [4] 丁青青, 刘艳红, 汤洪海. 发电机和静止无功补偿器鲁棒非线性协调控制[J]. 控制与决策, 2013, 28(7): 1099-1102. (Ding Q Q, Liu Y H, Tang H H. Coordinated robust nonlinear control of synchronous generator and static var compensator[J]. Control and Decision, 2013, 28(7): 1099-1102.)
- [5] 王杰, 陈陈. 电力系统中微分代数模型的非线性控制[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 15-18. (Wang J, Chen C. Nonlinear control of differential algebraic model in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 15-18.)
- [6] Chen Y H. Feedback linearization of nonlinear differential-algebraic control systems[J]. International

- Journal of Robust and Nonlinear Control, 2022, 32(3): 1879-1903.
- [7] 李啸骢, 邓裕文, 游晓枫, 等. 单输入单输出微分代数系统的多指标非线性控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 47-52.
(Li X C, Deng Y W, You X F, et al. Multi-index nonlinear control design for SISO differential algebraic system[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 47-52.)
- [8] 李啸骢, 谢醉冰, 梁志坚, 等. 基于微分代数系统的 STATCOM与发电机励磁的多指标非线性协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 123-129.
(Li X C, Xie Z B, Liang Z J, et al. Multi-index nonlinear coordinated control of STATCOM and generator excitation differential algebraic system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 123-129.)
- [9] Lei B J, Fei S M. A brand new nonlinear robust control design of SSSC for transient stability and damping improvement of multi-machine power systems via pseudo-generalized Hamiltonian theory[J]. Control Engineering Practice, 2014, 29: 147-157.
- [10] Ding Q Q, Liu Y H, Li J Y. Energy-based robust nonlinear control of multiple static var compensators in power system[C]. Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation. Beijing, 2012: 1993-1998.
- [11] Taha A F, Bazrafshan M, Nugroho S A, et al. Robust control for renewable-integrated power networks considering input bound constraints and worst case uncertainty measure[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2019, 6(3): 1210-1222.
- [12] 刘加朋, 于金鹏, 林崇. 一类不确定非线性系统的事件驱动命令滤波反步控制[J]. 控制与决策, 2022, 37(10): 2733-2737.
(Liu J P, Yu J P, Lin C. Event-triggered and command-filter-based backstepping control for a class of uncertainty nonlinear systems[J]. Control and Decision, 2022, 37(10): 2733-2737.)
- [13] Roy T K, Mahmud M A, Oo A M T. Robust adaptive backstepping excitation controller design for higher-order models of synchronous generators in multimachine power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1): 40-51.
- [14] Li Y X, Wei S Y. Adaptive asymptotic tracking of uncertain nonlinear systems with input saturation[J]. Control and Decision, 2023, 38(8): 2326-2334.
- [15] Zhang X Z, Lu Z Y, Yuan X F, et al. L2-gain adaptive robust control for hybrid energy storage system in electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(6): 7319-7332.
- [16] Li X C, Chen M Y, Liang Z J, et al. Excitation and steam-valving coordinated robust controller design for multi-machine power systems based on the multi-index nonlinear robust control approach[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2016, 11(4): 425-434.
- [17] 王杰, 陈陈, 吴华, 等. 多机电力系统参数自适应控制的设计理论与方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 5-9.
(Wang J, Chen C, Wu H, et al. Theory and method for parametric adaptive control design of multi-machine power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 5-9.)
- [18] 桂小阳, 梅生伟, 刘锋, 等. 水轮机调速系统的非线性自适应控制[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(8): 66-71.
(Gui X Y, Mei S W, Liu F, et al. Adaptive nonlinear control for hydraulic turbine governor[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(8): 66-71.)
- [19] 李啸骢, 苏浩. 不确定微分代数系统的多指标非线性鲁棒自适应控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(3): 909-919.
(Li X C, Su H. Multi-index nonlinear robust adaptive control approach for uncertain differential algebraic system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(3): 909-919.)
- [20] 李啸骢, 陈登义, 刘松. 多输入多输出微分代数系统的多目标反馈非线性控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1465-1474.
(Li X C, Chen D Y, Liu S. Nonlinear control with multi-objective feedback for the multiple input multiple output differential algebraic system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1465-1474.)
- [21] Cong L M, Li X C, Zhang A C. Multiobject holographic feedback control of differential algebraic system with application to power system[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015, 2015: 415281.
- [22] Li X C, Yuan H, Chen M Y, et al. Nonlinear decentralized coordinated control of STATCOM and generator excitation for multi-machine power systems[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2350-2356.
- [23] 刘辉, 李啸骢, 韦化. 基于目标全息反馈的发电机非线性综合控制设计[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(4): 21-25.
(Liu H, Li X C, Wei H. Nonlinear integrated control design for generator unit based on NCOHF[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(4): 21-25.)
- [24] Lu Q, Sun Y Z. Nonlinear control of power systems[M]. Beijing: Science Press, 1993: 144-148.
- [25] 刘辉, 汪旄, 韦化, 等. 发电机组目标全息反馈大范围稳定控制设计[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(31): 21-26.
(Liu H, Wang N, Wei H, et al. Global asymptotic stable coordinated control with objective holographic feedbacks for the turbo-generator set[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(31): 21-26.)

作者简介

覃建波(1983—), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为电力系统非线性控制, E-mail: jianbo8324@163.com;

李啸骢(1959—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为电力系统动态仿真及计算机实时控制、电力系统非线性控制, E-mail: lhtlht@gxu.edu.cn;

徐俊华(1985—), 男, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为电力系统分数阶建模与控制, E-mail: minghuxjh@126.com;

周建阳(1986—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为微型散热器相变强化传热, E-mail: 369398611@qq.com.