

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191404

基于扰动观测器的电力系统鲁棒滑模控制器设计

孙立明¹, 杨博²

(1. 广州水沐清华科技有限公司, 广东 广州 510898; 2. 昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 针对多机电力系统中的励磁系统, 设计一种基于扰动观测器的滑模控制(Perturbation Observer based Sliding-mode Control, POSMC)以提高系统稳定性。首先, 将系统的非线性、参数不确定性、未建模动态和外部时变扰动聚合为一个扰动, 同时由一个滑模状态扰动观测器(Sliding-mode State and Perturbation Observer, SMSPO)对该扰动进行实时快速估计。随后, 通过滑模控制器对该扰动估计进行在线完全补偿以实现全局一致的控制能力。POSMC 具备结构简单、可靠性高、不依赖系统精确模型以及仅需测量发电机功角一个状态量等优点。最后, 基于机械功率阶跃变化、三相短路以及发电机参数不确定性三个算例验证了 POSMC 的有效性和鲁棒性, 其能在各种工况下实现最佳的动态性能, 有利于电力系统发生故障后恢复稳定运行。

关键词: 滑动模态控制; 扰动观测器; 多机电力系统; 系统稳定性

Design of perturbation observer-based sliding-mode controller for power systems

SUN Liming¹, YANG Bo²

(1. Guangzhou Shuimutech Co., Ltd., Guangzhou 510898, China; 2. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: A Perturbation Observer based Sliding-Mode Control (POSMC) is proposed to enhance the stability of multi-machine power systems. First, the nonlinearities, parameter uncertainties, unmodelled dynamics and time-varying external disturbances of the system are aggregated into a perturbation, which is estimated by a Sliding-Mode State and Perturbation Observer (SMSPO) in real-time. Then, the estimated perturbation is fully compensated by the sliding-mode controller to achieve a globally consistent control performance. POSMC has the advantages of simple structure, high reliability and easy implementation, while it does not require an accurate system model and only one state, e.g., rotor angle, measurement is needed. Finally, three case studies, e.g., mechanical power variations, three-phase short-circuit fault and generator parameter uncertainties, are undertaken, which verify the effectiveness and robustness of POSMC, i.e., it can achieve the best dynamic performance under various operation conditions, and can effectively restore the power system after failure.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61963020).

Key words: sliding-mode control; perturbation observer; multi-machine power system; system stability

0 引言

近年来, 电网结构随着用电需求的不断增加变得日益复杂, 只有多台发电机同步运行才能确保电力系统的安全稳定^[1-2]。故障严重时会造成部分机组的功率份额缺失, 并导致系统潮流的大幅变化, 从而威胁系统的安全运行^[3-4]。其中发电机励磁控制是维持机端电压以及提升系统暂态稳定性有效而经济

的策略之一^[5-6]。因此, 迫切需要研究多机电力系统的励磁控制以提高电力系统稳定性^[7-8]。

目前, 大部分励磁控制主要依赖于传统比例-积分-微分(Proportional-integral-derivative, PID)控制, 其具有结构简单、易于实现等优点, 因此得到工程界的广泛认可^[9-10]。但当环境急剧变化造成系统运行点发生大范围的频繁偏移时, 难以实现全局一致的控制性能^[11-12]。而且, 同步发电机往往具有较强的非线性, PID控制难以实现电力系统的最优稳定运行, 因此需要更加先进的控制方法来解决上述问题^[13-14]。

基金项目: 国家自然科学基金资助(61963020)

近年来学术界开发的非线性控制、鲁棒控制等先进控制理论弥补了上述缺陷, 因此广泛应用于励磁系统并且获得了令人满意的控制效果。文献[15]提出一种多机电力系统发电机励磁的自适应鲁棒 Terminal 滑模控制器, 其能够快速抑制功率振荡, 使得电力系统的暂态稳定性得到有效提升。文献[16]针对多机电力系统励磁控制模型, 设计出一种模糊自适应控制器, 有效地改善了系统受到较大扰动时的暂态稳定性。文献[17]利用反步法设计了多机电力系统中的非线性鲁棒自适应励磁控制方案, 发电机的功角稳定性得以大幅提升。

然而, 上述控制器结构较为复杂且需测量大量的系统状态与参数, 难以运用于实际工程中。为此, 本文针对发电机励磁系统设计了一种基于扰动观测器的滑模控制(Perturbation Observer based Sliding-mode Control, POSMC)策略以提高多机电力系统的稳定性。首先, 通过一个滑模状态扰动观测器(Sliding-mode State and Perturbation Observer, SMSPO)对系统的非线性、不确定性、未建模动态和外部时变扰动聚合而成的扰动进行估计。随后, POSMC对估计扰动进行实时快速补偿并确定最佳的控制增益参数。另外, POSMC仅需测量发电机功角而无需精确的系统模型。最后, 本文基于 Matlab/Simulink 搭建相应的系统模型并通过3个算例验证 POSMC 对于发电机励磁系统的控制性能, 仿真结果验证了所提控制器的有效性和鲁棒性。

1 多机电力系统建模

多机电力系统中第 i 台发电机的三阶模型可表示为^[18]

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_0 \\ \dot{\omega}_i = \frac{\omega_0}{2H_i} \left[P_{mi} - \frac{D_i}{\omega_0} (\omega_i - \omega_0) - P_{ei} \right] \\ \dot{E}_{qi} = \frac{1}{T_{d0i}} (u_{tdi} + E_{f0i} - E_{qi}), i=1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

$$E_{qi} = E'_{qi} - (x_{di} - x'_{di}) I_{di} \quad (2)$$

$$P_{ei} = \sum_{j=1}^n E'_{qi} E'_{qj} \beta_{ij}, Q_{ei} = \sum_{j=1}^n E'_{qi} E'_{qj} \alpha_{ij} \quad (3)$$

$$I_{di} = \sum_{j=1}^n E'_{qi} \alpha_{ij}, I_{qi} = \sum_{j=1}^n E'_{qj} \beta_{ij} \quad (4)$$

$$V_{ti} = \sqrt{V_{di}^2 + V_{qi}^2}, V_{qi} = x_{qi} I_{qi}, V_{di} = E'_{qi} - x'_{di} I_{di} \quad (5)$$

$$\alpha_{ij} = B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (6)$$

$$\beta_{ij} = B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) + G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (7)$$

式中: δ_i 和 ω_i 分别为发电机 i 的功角和转子角速度; ω_0 为同步角速度; E_{qi} 、 E'_{qi} 分别为 q 轴转子端电压和 q 轴暂态阻抗后的电压; P_{mi} 为机械功率; P_{ei} 为电磁功率; V_{ti} 为机端电压; V_{di} 和 V_{qi} 分别为 d 轴和 q 轴的机端电压; x_{di} 和 x'_{di} 分别为发电机的同步电抗和暂态电抗; H_i 为发电机惯性常数; T_{d0i} 为 d 轴暂态时间常数; I_{di} 、 I_{qi} 分别为 d 轴和 q 轴定子电流; B_{ij} 为 i 节点和 j 节点之间的等效电纳; G_{ij} 为 i 节点和 j 节点之间的等效电导; u_{tdi} 为励磁电压; E_{f0i} 为额定励磁电压。

2 基于扰动观测器的滑模控制设计

考虑如下标准非线性系统^[19]。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}[a(\mathbf{x}) + b(\mathbf{x})u + d(t)] \\ y = x_1 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in R^n$ 为系统状态矢量; $u \in R$ 为系统输入, $y \in R$ 为系统输出; $a(\mathbf{x}): R^n \rightarrow R$ $b(\mathbf{x}): R^n \rightarrow R$ 代表未知光滑函数; $d(t): R^+ \rightarrow R$ 代表外部时变扰动。其中 $n \times n$ 矩阵 \mathbf{A} 和 $n \times 1$ 矩阵 \mathbf{B} 可表示为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & L \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}_{n \times n}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}_{n \times 1} \quad (9)$$

系统(8)的扰动可定义为^[20]

$$\Psi(\mathbf{x}, u, t) = a(\mathbf{x}) + [b(\mathbf{x}) - b_0]u + d(t) \quad (10)$$

式中, b_0 为定常数控制增益。

定义一个虚拟状态 $x_{n+1} = \Psi(\cdot)$ 来表示扰动, 因此原 n 阶系统(8)拓展为 $n+1$ 阶系统如下。

$$\dot{\mathbf{x}}_e = \mathbf{A}_0 \mathbf{x}_e + \mathbf{B}_1 u + \mathbf{B}_2 \Psi(\cdot) \quad (11)$$

式中: $\mathbf{x}_e = [x_1, x_2, \dots, x_n, x_{n+1}]^T$; $\mathbf{B}_1 = [0, 0, \dots, 0, b_0, 0]^T \in R^{n+1}$; $\mathbf{B}_2 = [0, 0, \dots, 0, 1]^T \in R^{n+1}$; 矩阵 \mathbf{A}_0 可表示为

$$\mathbf{A}_0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & L \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}_{(n+1) \times (n+1)} \quad (12)$$

对于增广系统(11)作出以下3条假设。

(1) 控制增益 b_0 满足该约束: $|b(\mathbf{x})/b_0 - 1| \leq \theta < 1$, 其中 θ 为一正常数。

(2) 函数 $\Psi(\mathbf{x}, u, t): R^n \times R \times R^+ \rightarrow R$ 和 $\varphi(\mathbf{x}, u, t): R^n \times R \times R^+ \rightarrow R$ 在定义域上满足局部 Lipschitz 条件, 即 $|\Psi(\mathbf{x}, u, t)| \leq \gamma_1$, $|\varphi(\mathbf{x}, u, t)| \leq \gamma_2$, 其中 γ_1 和 γ_2 为正常数, 并满足 $\Psi(0, 0, 0) = 0$ 和 $\varphi(0, 0, 0) = 0$ 。

(3) 函数 y_d 及其 n 阶导数连续且有界。

文中状态 \mathbf{x} 的估计误差定义为 $\mathcal{X} = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}$, $\hat{\mathbf{x}}$ 为 \mathbf{x} 的估计。基于以上假设, 并考虑最苛刻的情况, 仅有一个状态量 x_1 可测量。针对系统式(11), 设计一个 $(n+1)$ 阶 SMSPO^[21-22] 来估计系统的状态与扰动, 即

$$\begin{cases} \dot{\mathcal{X}}_1 = \hat{x}_2 + \alpha_1 \mathcal{X}_1 + k_1 \text{sat}(\mathcal{X}_1) \\ \mathbf{M} \\ \dot{\mathcal{X}}_n = \hat{\psi}(\cdot) + \alpha_n \mathcal{X}_n + k_n \text{sat}(\mathcal{X}_n) + b_0 u \\ \dot{\mathcal{X}}_i(\cdot) = \alpha_{n+1} \mathcal{X}_i + k_{n+1} \text{sat}(\mathcal{X}_i) \end{cases} \quad (13)$$

式中, $\alpha_i, i=1, 2, \dots, n+1$ 为 Luenberger 观测器增益。旨在使多项式 $s^{n+1} + \alpha_1 s^n + \alpha_2 s^{n-1} + \dots + \alpha_n + 1 = (s + \lambda_\alpha)^{n+1} = 0$ 的极点落于复平面的左半平面上的 $-\lambda_\alpha$, 并满足:

$$\alpha_i = C_{n+1}^i \lambda_\alpha^i, \quad i=1, 2, \dots, n+1 \quad (14)$$

式中, $C_{n+1}^i = \frac{(n+1)!}{i!(n+1-i)!}$ 。此外, 正常数 k_i 为滑动平面增益, 满足:

$$k_1 \geq |\mathcal{X}_2|^{\max} \quad (15)$$

同时选取滑动平面增益 $k_i/k_1 (i=2, 3, \dots, n+1)$ 使得多项式 $p^n + (k_2/k_1)p^{n-1} + \dots + (k_n/k_1)p + (k_{n+1}/k_1) = (p + \lambda_k)^n = 0$ 的极点落在复平面的左半平面上的 $-\lambda_k$ 。可得

$$\frac{k_{i+1}}{k_1} = C_n^i \lambda_k^i, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (16)$$

式中, $C_n^i = \frac{(n)!}{i!(n-i)!}$ 。

定义一个估计滑动平面:

$$\hat{S} = \sum_{i=1}^n \rho_i [\hat{x}_i - y_d^{(i-1)}] \quad (17)$$

接着通过估计扰动 $\hat{\psi}(\cdot)$ 来完全补偿系统的非线性和各类建模不确定性, 针对系统式(10)的 POSMC 可设计为

$$u = b_0^{-1} \left[y_d^{(n)} - \sum_{i=1}^{n-1} \rho_i (\hat{x}_{i+1} - y_d^{(i)}) - \zeta \hat{S} - \varphi \text{sat}(\hat{S}, \varepsilon_c) - \hat{\psi}(\cdot) \right] \quad (18)$$

式中, ζ 和 φ 为控制增益。

3 多机电力系统的滑模控制设计

选取系统输出 $y_i = \delta_i$, 控制输入 $u_i = u_{idi}$, 估计误差 $z_{i1} = \delta_i - \delta_i^*, i=1, 2, \dots, n+1$, 其中 δ_i^* 为发电机 i 的额定功角, 对跟踪误差 z_{i1} 进行求导直到控制输入 u_{idi} 显性出现, 可得扰动 $\Psi_i(\cdot)$ 。

$$\Psi_i(\cdot) = -\frac{\omega_0}{2H_i} \left[\frac{D_i}{\omega_0} \frac{d\omega_i}{dt} + \frac{I_{qi}}{T_{d0i}} (E_{r0i} - E_{qi}) + Q_{ci} \omega_i + \sum_{j=1}^n E'_{qi} E'_{qj} \beta_{ij} + \sum_{j=1}^n E'_{qi} E'_{qj} \alpha_{ij} \omega_j \right] - \frac{\omega_0 I_{qi}}{2H_i T_{d0i}} u_{idi} - b_{0i} u_{idi} \quad (19)$$

式中: 中括号里的第一项 $\frac{D_i}{\omega_0} \frac{d\omega_i}{dt}$ 代表发电机的功率调节, 其余四项代表各机组间的功率传输; 中间项 $-\frac{\omega_0 I_{qi}}{2H_i T_{d0i}} u_{idi}$ 由发电机的励磁效应产生; 最后一项 $b_{0i} u_{idi}$ 用于补偿系统的非线性以及各类建模不确定性, 从而实现控制全局一致性。

定义状态 $z_{i4} = \varphi(\cdot)$, 同时定义一个扩展状态向量 $\mathbf{z}_{ie} = [z_{i1}, z_{i2}, z_{i3}, z_{i4}]^T$, 因此四阶增广系统可表示为

$$\dot{\mathcal{X}}_{ie} = \mathbf{A}_{i1} \mathbf{z}_{ie} + \mathbf{B}_{i1} u_{idi} + \mathbf{B}_{i2} \varphi(\cdot) \quad (20)$$

其中

$$\mathbf{A}_{i1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_{i1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_{i0} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_{i2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

对于增广系统式(20), 设计一个四阶 SMSPO 来估计系统的状态与扰动。

$$\begin{cases} \dot{\mathcal{X}}_{i1} = \hat{z}_{i2} + \alpha_{i1} \mathcal{X}_{i1} + k_{i1} \text{sat}(\mathcal{X}_{i1}, \varepsilon_{oi}) \\ \dot{\mathcal{X}}_{i2} = \hat{z}_{i3} + \alpha_{i2} \mathcal{X}_{i2} + k_{i2} \text{sat}(\mathcal{X}_{i2}, \varepsilon_{oi}) \\ \dot{\mathcal{X}}_{i3} = \hat{\psi}_i(\cdot) + \alpha_{i3} \mathcal{X}_{i3} + k_{i3} \text{sat}(\mathcal{X}_{i3}, \varepsilon_{oi}) + b_{0i} u_{idi} \\ \dot{\mathcal{X}}_{i4}(\cdot) = \alpha_{i4} \mathcal{X}_{i4} + k_{i4} \text{sat}(\mathcal{X}_{i4}, \varepsilon_{oi}) \end{cases} \quad (22)$$

式中, $k_{ij}, \alpha_{ij} (j=1, 2, 3, 4)$ 为观测器增益, 且均为正常数。

因此, 增广系统(20)的估计滑动平面可定义为

$$\hat{S}_i = \rho_{i1} (\hat{\delta}_i - \delta_i^*) + \rho_{i2} (\hat{\omega}_i - \omega_i^*) + \rho_{i3} (\hat{\mathcal{X}}_i - \mathcal{X}_i^*) \quad (23)$$

式中: $\rho_{i1}, \rho_{i2}, \rho_{i3}$ 为滑动平面增益且均为正常数; ω_i^* 为发电机 i 的额定转子角速度。此外, 估计滑动表面式(23)用于准确地跟踪功角 δ_i 的参考值。

最终, 多机电力系统的 POSMC 可设计为

$$u_{idi} = \frac{1}{b_{0i}} [\hat{\omega}_i^* - \rho_{i1}(\hat{\omega}_i - \omega_i^*) - \rho_{i2}(\hat{\alpha}_i^* - \alpha_i^*) - \zeta_i \hat{S}_i - \varphi_i \text{sat}(\hat{S}_i, \varepsilon_{ci}) - \hat{\Psi}_i(\cdot)] \quad i = 1, 2, L, n \quad (24)$$

式中, ζ_i 和 φ_i 为控制增益, 使得滑动平面式(23)具有良好的收敛性。

发电机励磁系统的 POSMC 整体框架如图 1 所示, 值得注意的是, POSMC 不依赖精确的系统模型, 且仅需测量功角 δ_i 一个状态量。

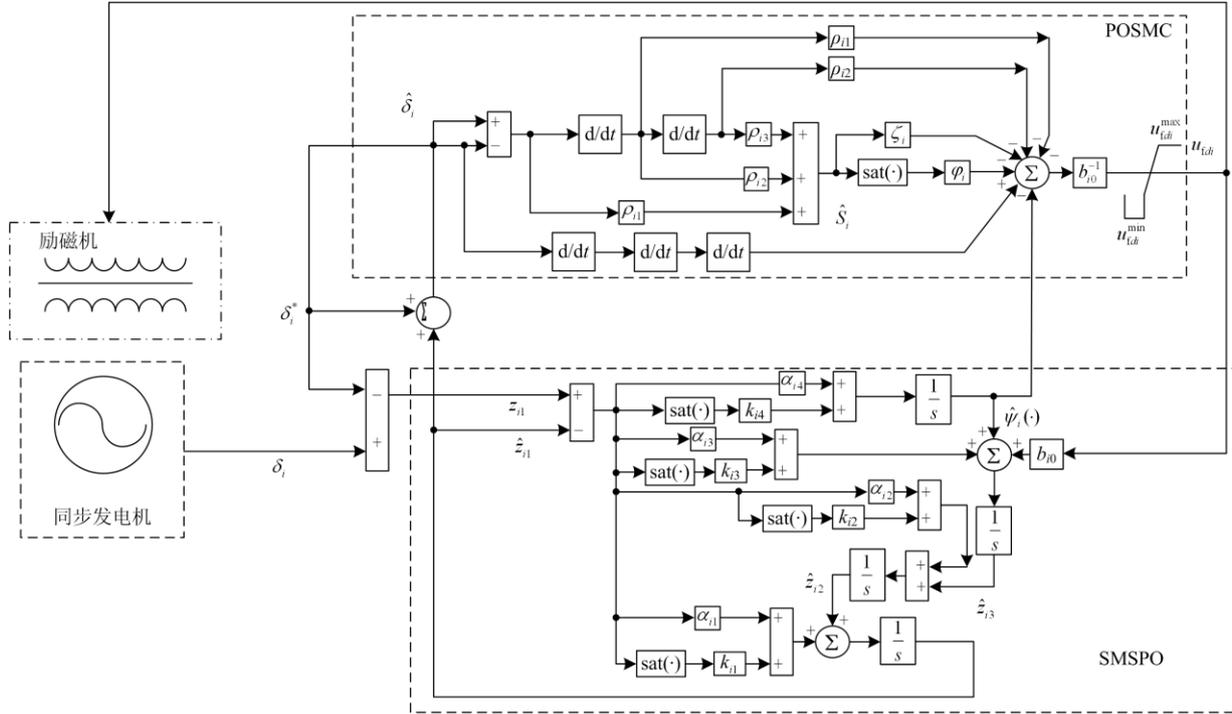


图 1 发电机励磁系统的 POSMC 整体框架

Fig. 1 Overall POSMC structure for excitation controller

4 算例分析

为验证 POSMC 应用于励磁系统的有效性, 本节将该控制器与传统 PID 控制^[9]、非线性自适应控制 (Nonlinear Adaptive Control, NAC)^[23]、反馈线性化控制 (Feedback Linearization Control, FLC)^[24] 在图 2 所示的三机电力系统上进行控制性能比较。详细的系统参数可见文献[18]及表 1。各系统变量转化为标幺值进行计算, 其中基准值选取 $P_{base}=1.0 \text{ p.u.}$, $V_{base}=1.0 \text{ p.u.}$ 。此外, 为保证发电机的稳定运行, 励磁电压满足约束条件: $|u_{tdi}| \leq 7 \text{ p.u.}$ 。

4.1 机械功率阶跃变化

为测试 POSMC 的动态响应特性, 机械功率 P_{m3} 在 0.5 s 时发生 0.2 p.u. 的阶跃增长, 并在 0.7 s 时重回额定值。各控制器的动态响应如图 3 所示, 可见 POSMC 能够以最快的速率抑制该振荡, 同时在其控制下明显地抑制了故障引起的振荡。此外, 采用饱和函数减小了滑模控制中存在的抖振现象, 使得控

制输入 u_{td3} 更加平稳。值得注意的是, POSMC 机端电压 V_{t3} 的振荡幅度虽大于其他控制器, 但拥有最快的收敛速度。另外, PID 控制的参数主要来源于非线性系统在某一运行点处的线性化方程, 当运行点短时间内频繁发生变化时其控制性能自然会有所下降。

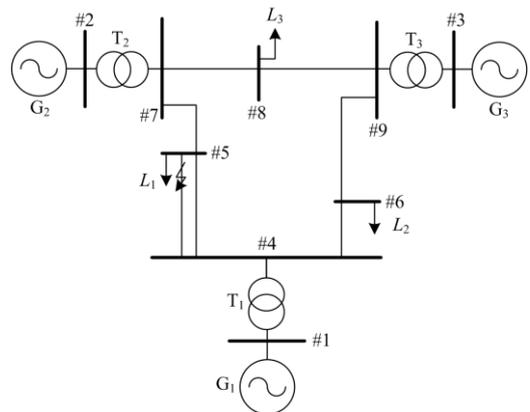
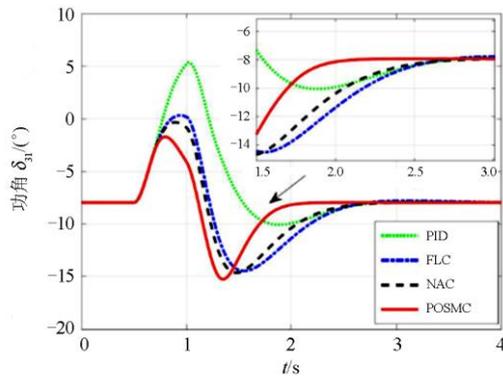


图 2 三机电力系统结构示意图

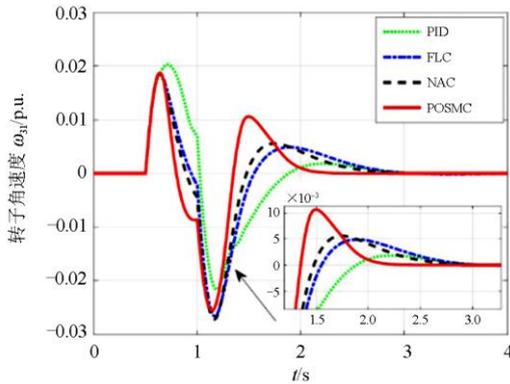
Fig. 2 Configuration of the three-machine power system

表 1 POSMC 参数
Table 1 Parameters of POSMC

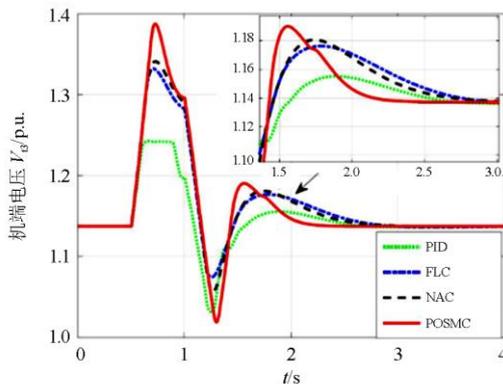
控制器参数			
$b_{0i}=-8$	$\rho_{i1}=64$	$\rho_{i2}=16$	$\rho_{i3}=1$
$\zeta_i=10$	$\varphi_i=10$	$\varepsilon_{ci}=0.1$	
观测器参数			
$\alpha_{i1}=1.2 \times 10^3$	$\alpha_{i2}=5.4 \times 10^5$	$\alpha_{i3}=1.08 \times 10^8$	$\varepsilon_{oi}=0.1$
$k_{i1}=10$	$k_{i2}=6 \times 10^3$	$k_{i3}=1.2 \times 10^6$	
$\alpha_{i4}=8.1 \times 10^9$	$k_{i4}=8 \times 10^7$		



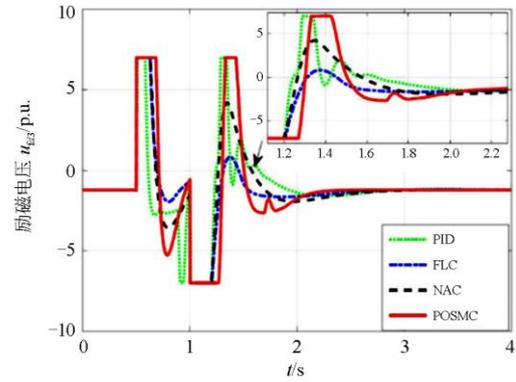
(a) 功角 δ_{31}



(b) 转子角速度 ω_{31}



(c) 机端电压 V_{13}



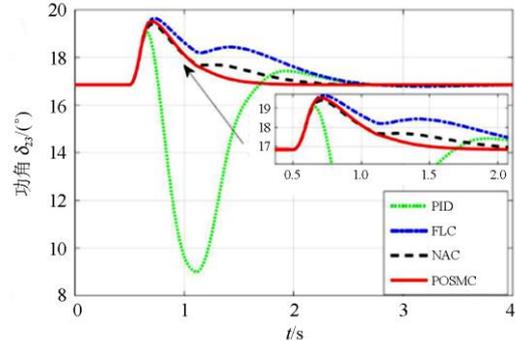
(d) 励磁电压 u_{fd3}

图 3 阶跃机械功率下的系统响应

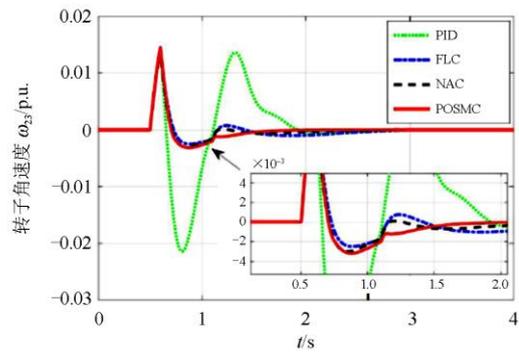
Fig. 3 System responses obtained under the mechanical power variations

4.2 三相短路

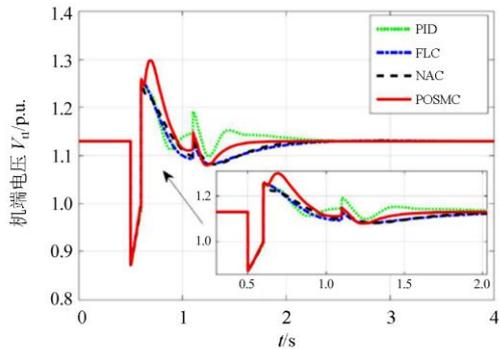
为验证系统故障情况下 POSMC 的有效性，取如下系统故障： $t=0.5$ s 时，4 号母线与 5 号母线之间的输电线发生三相短路，短路点如图 2 所示， $t=0.6$ s 时线路跳闸， $t=1.1$ s 时自动重合闸装置启动。其仿真结果如图 4 所示，可发现 POSMC 能够以最快的速率最有效地恢复因故障引起的电力系统振荡。另外，故障期间 SMSPO₁ 的状态和扰动估计误差如图 5 所示，可见 SMSPO 对于跟踪扰动估计具有较快的速率和良好的准确性。



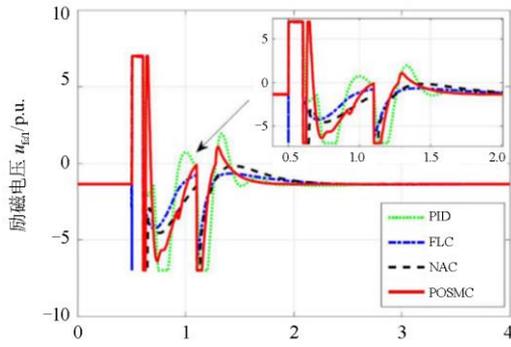
(a) 功角 δ_{23}



(b) 转子角速度 ω_{23}



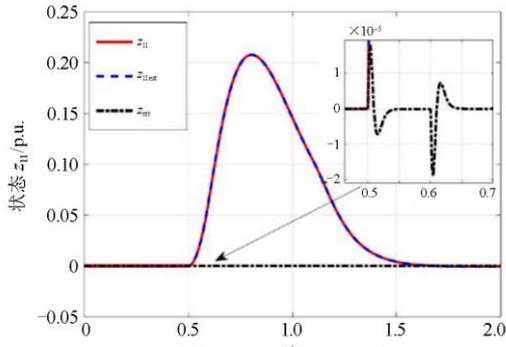
(c) 机端电压 V_{t1}



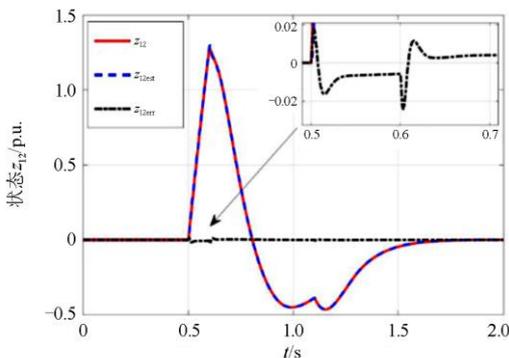
(d) 励磁电压 u_{fd}

图 4 三相短路下的系统响应

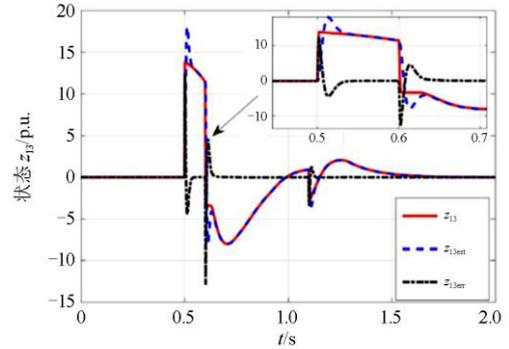
Fig. 4 System response obtained under three-phase short-circuit fault



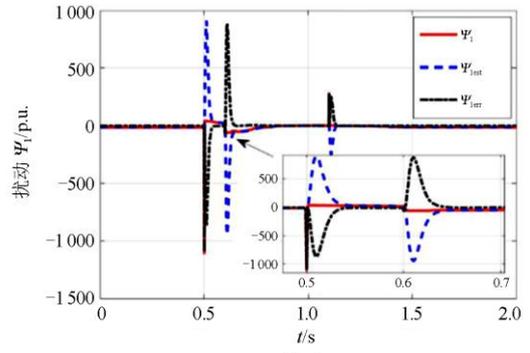
(a) 状态 z_{11}



(b) 状态 z_{12}



(c) 状态 z_{13}



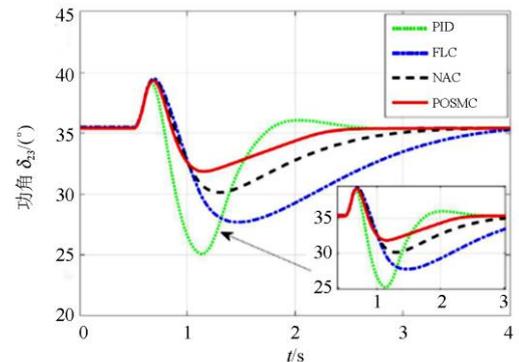
(d) 扰动 Ψ_1

图 5 三相短路下 SMSPO1 的跟踪误差

Fig. 5 Estimation errors of SMSPO1 obtained under the three-phase short-circuit fault

4.3 发电机参数不确定性

为测试各控制器在发电机参数不确定下的鲁棒性, 对 d 轴同步阻抗 x_{di} 和 d 轴暂态时间常数 T_{d0i} , 在标称值附近发生 10% 的测量误差进行研究。图 6 给出了发电机遭受 10% 测量误差时发生三相短路故障的系统响应曲线, 可见随着运行点发生较大范围偏移, PID 控制相较于其他三种控制器而言, 其控制性能最差, 而 FLC 需精确的系统模型, 因此发生测量误差时其控制性能也发生不可避免地下降。相比之下, NAC 和 POSMC 不依赖精确的系统模型, 可获得一致性的控制性能, 对于参数不确定性具有



(a) 功角 δ_{23}

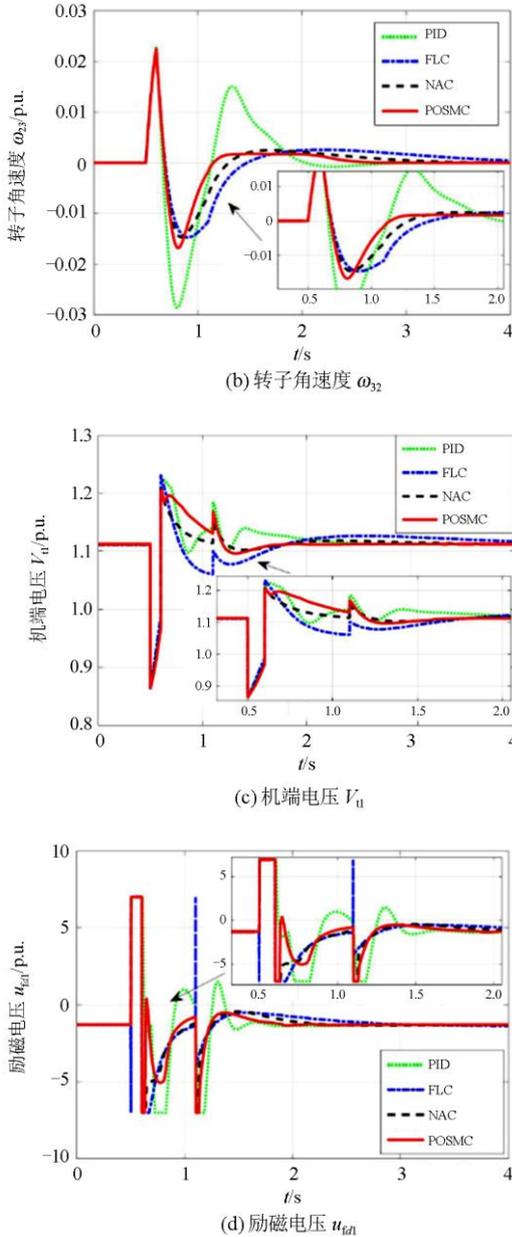


图 6 参数不确定下发生短路的系统响应

Fig. 6 System responses obtained under the short-circuit fault with parameter uncertainties

更强的鲁棒性。而且，POSMC相比NAC而言，可以更有效地恢复参数不确定性下受到较大扰动的电力系统，因此，POSMC在四种控制器中故障抑制能力最佳。

进一步地，研究d轴和q轴同步阻抗 x_{d3} 和 x_{q3} 在标称值附近分别发生±20%的测量误差时发电机的鲁棒性。相应的系统响应如图7所示，可见POSMC在参数不确定性下具有最小的 $|V_{t1}|$ 、 $|V_{t3}|$ 变化量，鲁棒性能最佳。

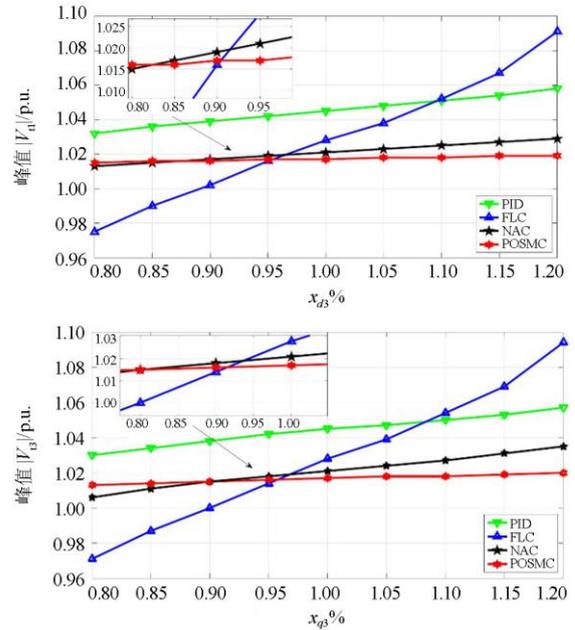


图 7 参数不确定性下的系统鲁棒性

Fig. 7 System robustness under parameter uncertainties

4.4 综合性能对比

采用误差绝对值积分(Integral of Absolute Error, IAE)指标^[25]评估各控制器的跟踪性能和鲁棒性，不同算例下各控制器的IAE指标如表2所示，其定义为 $IAE_x = \int_0^T |x - x^*| dt$ ，其中 x^* 为变量 x 的参考值，

表 2 基于不同算例的各控制器 IAE(p.u.)

Table 2 IAE indices(in p.u.) of several control schemes calculated in different cases

仿真算例	控制器				
	PID	FLC	NAC	POSMC	
机械功率变化	$IAE_{\delta 31}$	7.61	4.99	4.63	3.58
	$IAE_{\omega 31}$	$1.85e^{-2}$	$1.32e^{-2}$	$1.27e^{-2}$	$1.05e^{-2}$
	$IAE_{\delta 21}$	7.28	4.76	4.38	3.11
	$IAE_{\omega 21}$	$1.77e^{-2}$	$1.26e^{-2}$	$1.19e^{-2}$	$9.87e^{-3}$
	$IAE_{V_{t3}}$	0.58	0.81	0.78	0.87
三相短路	$IAE_{\delta 23}$	3.98	2.19	1.93	1.29
	$IAE_{\omega 23}$	$2.11e^{-2}$	$7.43e^{-3}$	$6.18e^{-3}$	$5.55e^{-3}$
	$IAE_{\delta 21}$	3.14	1.88	1.42	0.87
	$IAE_{\omega 21}$	$1.97e^{-2}$	$6.88e^{-3}$	$5.35e^{-3}$	$4.46e^{-3}$
	$IAE_{V_{t1}}$	0.33	0.39	0.37	0.44
参数不确定性	$IAE_{\delta 23}$	6.02	8.11	4.72	3.97
	$IAE_{\omega 23}$	$3.62e^{-2}$	$1.31e^{-2}$	$9.53e^{-3}$	$8.71e^{-3}$
	$IAE_{\delta 21}$	5.88	7.69	4.33	3.54
	$IAE_{\omega 21}$	$3.12e^{-2}$	$1.09e^{-2}$	$7.42e^{-2}$	$6.19e^{-3}$
	$IAE_{V_{t1}}$	0.34	0.42	0.33	0.40

仿真时间 T 设定为 4 s。由表 2 可知, POSMC 在绝大多数算例下具有最低的 IAE 指标。特别地, 在机械功率阶跃变化下, POSMC 的 $IAE_{\delta_{21}}$ 分别仅为 PID 控制的 42.72%, FLC 的 65.34% 以及 NAC 的 71%。

最后, 研究三种算例下各控制器所需的总控制成本, 即 $\int_0^T (|u_{fd1}| + |u_{fd2}| + |u_{fd3}|) dt$ 。总控制成本反映了在每种算例下各控制器的整体控制输出(励磁电压), 其值越低表明需要的总控制电压越低, 反之亦然。三种算例下四种控制器所需的总控制成本如图 8 所示。显然, POSMC 在所有算例下所需的总控制成本均低于 PID 控制, 且在发电机参数不确定性的情况下, 其总控制成本在所有控制器中最低。但机械功率阶跃变化和三相短路故障下, POSMC 的总控制成本略高于 FLC 和 NAC。这是因为 POSMC 为更快速地恢复受扰系统采用了更多的控制增益。

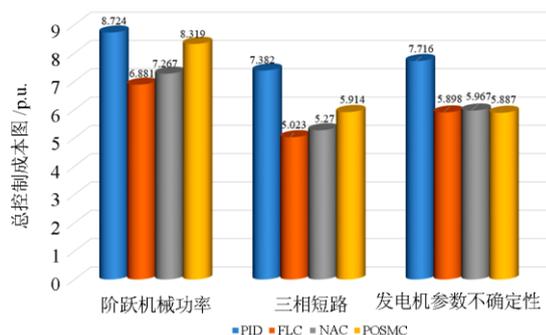


图 8 各控制器在不同工况下的总控制成本

Fig. 8 Overall control costs of several controllers required in different cases

5 结论

本文设计了一种基于扰动观测器的滑模控制策略, 以提高多机电力系统的稳定性, 其主要贡献点总结如下。

(1) 首先通过 SMSPO 对发电机的非线性、不确定性、未建模动态所聚合的扰动进行实时在线估计, 接着通过滑模控制器对该扰动估计进行实时完全补偿。

(2) POSMC 无需系统精确模型, 且仅需测量发电机功角一个状态量。

(3) 基于机械功率阶跃变化、三相短路以及发电机参数不确定性三个仿真算例表明, POSMC 具备控制全局一致性和最强鲁棒性的优点。

参考文献

[1] QI J, SUN K, WANG J, et al. Dynamic state estimation for multi-machine power system by unscented Kalman

- filter with enhanced numerical stability[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 9(2): 1184-1196.
- [2] FIROUZI M, GHAREHPETIAN G B, SALAMI Y. Active and reactive power control of wind farm for enhancement transient stability of multi-machine power system using UIPC[J]. IET Renewable Power Generation, 2017, 11(8): 1246-1252.
- [3] FARAH A, GUESMI T, ABDALLAH H H, et al. A novel chaotic teaching-learning-based optimization algorithm for multi-machine power system stabilizers design problem[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 77: 197-209.
- [4] LIU X J, HAN Y Z. Decentralized multi-machine power system excitation control using continuous higher-order sliding mode technique[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 82: 76-86.
- [5] NI Z, TANG Y F, SUI X C, et al. An adaptive neuro-control approach for multi-machine power systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 75: 108-116.
- [6] HANNAN M A, ISLAM N N, MOHAMED A, et al. Artificial intelligent based damping controller optimization for the multi-machine power system: a review[J]. IEEE Access, 2018, 6: 39574-39594.
- [7] SAFARI A, SHAHSAVARI H, SALEHI J. A mathematical model of SOFC power plant for dynamic simulation of multi-machine power systems[J]. Energy, 2018, 149: 397-413.
- [8] DASU B, SIVAKUMAR M, SRINIVASARAO R. Interconnected multi-machine power system stabilizer design using whale optimization algorithm[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(2): 1-11. DOI: 10.1186/s41601-019-0116-6.
- [9] MORSHED M J, SARDOUEINASAB Z, FEKIH A. A coordinated control for voltage and transient stability of multi-machine power grids relying on wind energy[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 109: 95-109.
- [10] DIB F, BOUMHIDI I. Hybrid algorithm DE-TLBO for optimal H_{∞} and PID control for multi-machine power system[J]. International Journal of System Assurance Engineering and Management, 2017, 8(2): 925-936.
- [11] YANG B, ZHANG X S, YU T, et al. Grouped grey wolf optimizer for maximum power point tracking of doubly-fed induction generator based wind turbine[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 133: 427-443.
- [12] FANTINO R, SOLSONA J, BUSADA C. Nonlinear observer-based control for PMSG wind turbine[J].

- Energy, 2016, 113: 248-257.
- [13] WANG Y, MENG J H, ZHANG X Y, et al. Control of PMSG-based wind turbines for system inertial response and power oscillation damping[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(2): 565-574.
- [14] 方云熠, 曾喆昭, 刘晴, 等. 永磁直驱风力发电系统最大功率跟踪非线性抗扰控制[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 145-151.
- FANG Yunyi, ZENG Zhezha, LIU Qing, et al. Maximum power point tracking with nonlinear disturbance rejection control for DPMSG wind power generation system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 145-151.
- [15] 邹德虎, 王宝华. 多机电力系统自适应鲁棒 Terminal 滑模励磁控制[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(12): 79-82.
- ZOU Dehu, WANG Baohua. Adaptive and robust excitation control with terminal sliding mode for multi-machine power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(12): 79-82.
- [16] 吴忠强, 姚源, 窦春霞. 多机电力系统模糊自适应控制[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(10): 5-10.
- WU Zhongqiang, YAO Yuan, DOU Chunxia. Fuzzy adaptive control for multi-machine power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(10): 5-10.
- [17] 兰洲, 甘德强, 倪以信, 等. 电力系统非线性鲁棒自适应分散励磁控制设计[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(17): 1-5.
- LAN Zhou, GAN Deqiang, NI Yixin, et al. Decentralized nonlinear robust adaptive excitation control design for power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(17): 1-5.
- [18] YANG B, JIANG L, YAO W, et al. Perturbation estimation based coordinated adaptive passive control for multi-machine power systems[J]. Control Engineering Practice, 2015: 44: 172-192.
- [19] ALSUMIRI M, LI L, JIANG L, et al. Residue Theorem based soft sliding mode control for wind power generation systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 247-258. DOI: 10.1186/s41601-018-0097-x.
- [20] YANG B, JIANG L, ZHANG C K, et al. Perturbation observer-based adaptive passive control for nonlinear systems with uncertainties and disturbances[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2018, 40(4): 1223-1236.
- [21] JIANG L, WU Q H. Nonlinear adaptive control via sliding-mode state and perturbation observer[J]. IEEE Proceedings-Control Theory and Applications, 2002, 149(4): 269-277.
- [22] WANG Y Y, XIAO G G, HILL D J. Robust decentralized nonlinear controller design for multi-machine power systems[J]. Automatica, 1997, 33(9): 1725-1733.
- [23] 茅靖峰, 吴博文, 吴爱华, 等. 风力发电系统最大功率跟踪自适应鲁棒控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22): 80-86.
- MAO Jingfeng, WU Bowen, WU Aihua, et al. Adaptive robust MPPT control for wind power generation system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 80-86.
- [24] 王利兵, 毛承雄, 陆继明, 等. 基于反馈线性化原理的直驱风力发电机组控制系统设计[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 1-6, 20.
- WANG Libing, MAO Chengxiong, LU Jiming, et al. Feedback-linearization control of direct-driven permanent magnet synchronous generator wind turbines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 1-6, 20.
- [25] 杨博, 钟林恩, 朱德娜, 等. 部分遮蔽下改进樽海鞘群算法的光伏系统最大功率跟踪[J]. 控制理论与应用, 2019, 36(3): 339-352.
- YANG Bo, ZHONG Lin'en, ZHU Dena, et al. Modified salp swarm algorithm based maximum power point tracking of power-voltage system under partial shading condition[J]. Control Theory & Applications, 2019, 36(3): 339-352.

收稿日期: 2019-11-09; 修回日期: 2019-12-19

作者简介:

孙立明(1977—), 男, 硕士, 研究方向为电力系统、工业制造过程的先进控制系统与装置, 电力系统生产过程数据的智能分析; E-mail: 2410924502@qq.com

杨博(1988—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为新能源与储能系统优化与控制, 人工智能在智能电网中的应用。E-mail: yangbo_ac@outlook.com

(编辑 许威)