

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200046

同步发电机最优非线性自适应励磁控制器设计

荆立坤¹, 杨宁¹, 刘波¹, 潘凤萍², 杨博³

(1. 华电潍坊发电有限公司, 山东 潍坊 261000; 2. 广东电科院能源技术有限责任公司, 广东 广州 440104;
3. 昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 设计了一款最优非线性自适应励磁控制器(Optimal Nonlinear Adaptive Excitation Controller, ONAEC)用于多机电力系统以提升系统故障恢复能力。首先, 通过一个高增益扰动观测器(High-Gain Perturbation Observer, HGPO)对由发电机的非线性、不确定性、未建模动态等效聚合而来的扰动进行实时快速估计。随后, 该扰动由 ONAEC 进行在线完全补偿并通过改进樽海鞘群算法(Modified Salp Swarm Algorithm, MSSA)获取其最优控制参数。另外 ONAEC 具备结构简单、易于实现等优点, 且仅需测量发电机功角一个状态量便可实现全局一致的控制性能。最后, 进行了两种算例研究, 即标称模型以及参数不确定下的三相短路。其仿真结果表明, 与比例-积分-微分(Proportional-Integral-Derivative, PID)控制和反馈线性化控制(Feedback Linearization Control, FLC)相比, ONAEC 能在各种工况下实现最佳的动态性能, 有利于系统受到较大扰动后快速恢复稳定运行。

关键词: 最优非线性自适应励磁控制器; 高增益扰动观测器; 多机电力系统; 改进樽海鞘群算法

Optimal nonlinear adaptive excitation controller design of a synchronous generator

JING Likun¹, YANG Ning¹, LIU Bo¹, PAN Fengping², YANG Bo³

(1. Huadian Weifang Power Generation Company Limited, Weifang 261000, China; 2. Guangdong Diankeyuan Energy Technology Co., Ltd., Guangzhou 440104, China; 3. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: This paper designs an Optimal Nonlinear Adaptive Excitation Controller (ONAEC) to enhance the stability of multi-machine power systems. First, the nonlinearities, parameter uncertainties, unmodelled dynamics and time-varying external disturbances of the synchronous generator are aggregated into a perturbation, which is estimated by a High-Gain Perturbation Observer (HGPO) in real-time. Then, the estimated perturbation is fully compensated by ONAEC and the optimal control parameters are obtained by Modified Salp Swarm Algorithm (MSSA). In addition, ONAEC has the advantages of simple structure and easy implementation, and it can achieve a globally consistent control performance by measuring only one state, e.g. rotor angle. Finally, two case studies, e.g., the three-phase short-circuit fault with nominal parameter and parameter uncertainties, are undertaken. Simulation results show that compared with Proportional-Integral-Derivative (PID) control and Feedback Linearization Control (FLC), ONAEC can achieve the best dynamic performance under various operational conditions and effectively restore the power system after failure.

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

Key words: optimal nonlinear adaptive excitation controller; high-gain perturbation observer; multi-machine power system; modified salp swarm algorithm

0 引言

随着世界经济与电力负荷的不断增长, 电网结构变得日益复杂, 其自身的稳定运行关系到国家安

全与社会和谐^[1-4]。电力系统的安全稳定要求多台发电机在各种工况下都能保持同步运行, 而励磁系统作为传统火电厂中同步发电机的的重要组成部分, 对于维持机端电压与提高多机电力系统的运行稳定性具有举足轻重的作用^[5-7]。因此, 研究多机电力系统的励磁控制以改善电力系统的稳定性具有重要意

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61963020)

义。

目前,大多数的励磁控制系统主要依赖于传统比例-积分-微分(Proportional-Integral-Derivative, PID)控制,具有结构简单、可靠性高等优点从而获得了工业控制领域的广泛认可^[8-10],但其控制参数的确定主要基于非线性系统在某一运行点处的线性化方程,当环境急剧变化导致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^[11-13]。另外,发电机往往具有较强的非线性,PID控制难以获得最优的控制效果^[14-15],因此需要更加先进的控制策略来解决上述问题。

有学者开发了大量的非线性控制、鲁棒控制等先进的控制理论,弥补了上述缺陷并广泛应用于励磁控制系统获得了令人满意的控制效果。文献[16]提出了一种新的适用于一般结构非线性多输入多输出系统的输出反馈控制,以改善对电力系统扰动的抑制效果。文献[17]提出了一种多变量反馈线性化方法,使得系统受到大干扰的情况下,依然能较好地增强系统阻尼。文献[18]提出了一种基于协同控制理论的非线性励磁控制器,以保证有效地控制机端电压和抑制系统功率振荡。

然而,上述控制器的结构较为复杂且需要对多个参数进行整定,难以在实际工程中获得运用。为此,本文设计了一款最优非线性自适应励磁控制器(Optimal Nonlinear Adaptive Excitation Controller, ONAEC)应用于多机电力系统的励磁控制系统,以改善多机电力系统的稳定性。首先,通过一个高增益扰动观测器(High-Gain Perturbation Observer, HGPO)对系统的非线性、各类建模不确定性进行在线估计。随后,由 ONAEC 对该扰动进行完全补偿。另外,引入改进樽海鞘群算法(Modified Salp Swarm Algorithm, MSSA)来搜索全局最优的 ONAEC 控制参数以提升系统的动态响应性能。值得注意的是, ONAEC 并不依赖于精确的系统模型,仅需测量发电机功角一个状态量。最后,基于 Matlab/Simulink 进行标称模型以及参数不确定下的三相短路两种算例研究,仿真结果验证了 ONAEC 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由以下公式表示^[19]。

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

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

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

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

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

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

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

式中: δ_i 和 ω_i 分别为第 i 台发电机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。

2 非线性自适应控制

考虑如下标准非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}[a(\mathbf{x}) + b(\mathbf{x})u + d(t)] \\ \mathbf{y} = \mathbf{x}_1 \end{cases} \quad (8)$$

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; $a(\mathbf{x}): R^n \rightarrow R$ 和 $b(\mathbf{x}): R^n \rightarrow R$ 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} 可由式(9)表示。

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

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。

进一步, 将式(8)扩展为如下形式:

$$\dot{x}_n = a(x) + [b(x) - b(0)]u + d(t) + b_0 u + \Psi(x, u, t) + b_0 u \quad (11)$$

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, 如式(12)所示。

$$\begin{cases} y = x_1 \\ \dot{x}_1 = x_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_n = x_{n+1} + b_0 u \\ \dot{x}_{n+1} = \dot{\Psi}(\cdot) \end{cases} \quad (12)$$

式中, 拓展状态向量可等效为 $x_e = [x_1, x_2, \dots, x_n, x_{n+1}]^T$ 。

对于增广系统式(11)做出以下两条假设。

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

(2) 函数 $\Psi(x, u, t): R^n \times R \times R^+ \mapsto R$ 和 $\dot{\Psi}(x, u, t): R^n \times R \times R^+ \mapsto R$ 在定义域上有界且满足局部 Lipschitz 条件, 即 $|\Psi| \leq \gamma_1, |\dot{\Psi}| \leq \gamma_2$, 其中 γ_1 和 γ_2 为正常数。此外, $\Psi(0, 0, 0) = 0$ 且 $\dot{\Psi}(0, 0, 0) = 0$ 。

本文中, 状态 x 的估计误差定义为 $\tilde{x} = x - \hat{x}$, \hat{x} 为 x 的估计, x^* 定义为 x 的参考值。基于以上假设, 并考虑最苛刻的情况, 即仅有一个状态量 x_1 可测量。针对系统(11), 设计一个 $(n+1)$ 阶 HGPO^[21] 来估计系统的状态与扰动, 如式(13)所示。

$$\dot{\hat{x}}_e = A_0 \hat{x}_e + B_1 u + H(x_1 - \hat{x}_1) \quad (13)$$

式中, $H = [\alpha_1/\varepsilon, \alpha_2/\varepsilon^2, \dots, \alpha_n/\varepsilon^n, \alpha_{n+1}/\varepsilon^{n+1}]^T$, 观测器增益 ε 满足 $0 \leq \varepsilon \leq 1$ 。 $\alpha_i, i=1, 2, \dots, n+1$ 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 $-\lambda_\alpha$, 并满足式(14)。

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

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(10)的非线性自适应控制(Nonlinear Adaptive Control, NAC)可设计为

$$u = b_0^{-1} [x_1^{*(n+1)} - \hat{\Psi}(\cdot) - K(\hat{x} - x^*)] \quad (15)$$

式中: $K = [k_1, k_2, \dots, k_n]$ 为反馈控制增益, 旨在使得矩阵 $A_1 = A - BK$ 满足 Hurwitzian 条件。

综上, 系统(8)的 NAC 总体设计流程如下:

(1) 定义标准非线性系统(8)的扰动, 即式(10);

(2) 定义一个虚拟状态 $x_{n+1} = \Psi(\cdot)$ 来代替扰动 (10);

(3) 原 n 阶系统(8)被拓展为 $(n+1)$ 阶系统(11);

(4) 进一步, 针对增广系统(11), 设计了一个 $(n+1)$ 阶 HGPO 来估计系统的状态 \hat{x} 与扰动 $\hat{\Psi}(\cdot)$;

(5) 最终, NAC 对系统的非线性和各类建模不确定性聚合而来的估计扰动 $\hat{\Psi}(\cdot)$ 进行完全补偿。

3 同步发电机非线性自适应控制设计

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

$$\Psi_i(\cdot) = -\frac{\omega_0}{2H_i} \left[\frac{D_i}{\omega_0} \frac{d\omega_i}{dt} + \frac{I_{qi}}{T_{d0i}} (E_{0i} - E_{qi}) + Q_{ei} \omega_i + \sum_{j=1}^n E'_{qi} E'_{qj} \beta_{ij} + \sum_{j=1}^n E'_{qi} E'_{qj} \alpha_{ij} \omega_j \right] - \frac{\omega_0 I_{qi}}{2H_i T_{d0i}} u_{fdi} - b_{0i} u_{fdi} \quad (16)$$

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 $-\frac{\omega_0 I_{qi}}{2H_i T_{d0i}} u_{fdi}$ 由发电机的励磁效应产生, 最后一项 $b_{0i} u_{fdi}$ 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。因此, 发电机电压已经融到扰动里面进行了间接控制。

进一步讨论极端情况下的故障, 考虑各条线路间传输的有功功率容量有限, 严重故障时励磁电压最大发生 ± 7 p.u. 变化^[22], 可得

$$|E'_{qi} \cdot E'_{qj} \cdot B_{ij}| \leq |P_{ej}|_m \quad (17)$$

$$|E'_{qj}| \leq \frac{1}{T_{d0j}} (u_{fdj} - E_{qj}) \leq \frac{4|E_{qj}|_m}{T_{d0j}} \quad (18)$$

$$|E'_{qi} \cdot E'_{qj} \cdot B_{ij}| \leq \frac{4E'_{qj} \cdot B_{ij} \cdot |E_{qj}|_m}{T_{d0j}} \leq \frac{4|P_{ej}|_m}{T_{d0j}} \quad (19)$$

式中: $|P_{ej}|_m$ 为线路 $i-j$ 上流过的最大有功功率; $|E_{qj}|_m$ 为 q 轴转子端电压 E_{qj} 的峰值; 若忽略电导 G_{ij} 的影响, 可得不等式(20)。

$$|\alpha_{ij}| \leq |B_{ij}|, |\beta_{ij}| \leq |B_{ij}| (|\delta_i| + |\delta_j|) \quad (20)$$

因此, 通过式(20)一式(23)可得

$$\begin{aligned}
 |\Psi_i(\cdot)| &\leq \frac{2\omega_0}{H_i} \sum_{j=1}^n |P_{eij}| m \left(\frac{1}{T_{d0i}} + \frac{1}{T_{d0j}} \right) (|\delta_i| + |\delta_j|) + \\
 &\frac{2\omega_0}{H_i} \sum_{j=1}^n |P_{eij}| m (|\omega_j| + |\omega_j|) + \frac{D_i |\dot{\omega}_i|}{2H_i} + \left| \left(-\frac{\omega_0 I_{qi}}{2H_i T_{d0i}} - b_{0i} \right) \right| |u_{fdi}| \leq \\
 &\frac{2\omega_0}{H_i} \sum_{j=1}^n |P_{eij}| m \left(\frac{1}{T_{d0i}} + \frac{1}{T_{d0j}} \right) (|\delta_i| + |\delta_j|) + \\
 &\frac{2\omega_0}{H_i} \sum_{j=1}^n |P_{eij}| m (|\omega_j| + |\omega_j|) + \frac{D_i |\dot{\omega}_i|}{2H_i} + \theta_i |b_{0i}| |u_{fdi}|
 \end{aligned} \quad (21)$$

式中：下标 m 表示变量的最大值； $\Psi_i(\cdot)$ 为一个连续的时变函数，且导数在定义域内有界。此外，不等式(21)可证，多机电力系统的 NAC 满足假设(1)和(2)中的边界条件。

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

$$\dot{z}_{ie} = \mathbf{A}_{i1} z_{ie} + \mathbf{B}_{i1} u_{fdi} + \mathbf{B}_{i2} \dot{\Psi}_i(\cdot) \quad (22)$$

其中

$$\mathbf{A}_{i1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_{i1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_{i0} \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_{i2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

对于增广系统(22)，设计一个四阶 HGPO 来估计系统的状态与扰动：

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}}_{i1} = \hat{z}_{i2} + \frac{\alpha_{i1}}{\varepsilon} (z_{i1} - \hat{z}_{i1}) \\ \dot{\hat{z}}_{i2} = \hat{z}_{i3} + \frac{\alpha_{i2}}{\varepsilon^2} (z_{i1} - \hat{z}_{i1}) \\ \dot{\hat{z}}_{i3} = \dot{\Psi}_i(\cdot) + \frac{\alpha_{i3}}{\varepsilon^3} (z_{i1} - \hat{z}_{i1}) + b_{i0} u_{fdi} \\ \dot{\hat{\Psi}}_i(\cdot) = \frac{\alpha_{i4}}{\varepsilon^4} (z_{i1} - \hat{z}_{i1}) \end{cases} \quad (24)$$

式中， $k_{ij}, \alpha_{ij} (j=1, 2, 3, 4)$ 为观测器增益且均为正常数。可见，同步发电机的扰动仅需测量功角一个状态量即可实时在线估计，无需任何其他状态量和参数的测量。

最终，多机电力系统的 NAC 可设计为

$$\begin{aligned}
 u_{fdi} &= \frac{1}{b_{0i}} [\dot{\omega}_i^* - \rho_{i1} (\hat{\delta}_i - \delta_i^*) - \rho_{i2} (\hat{\omega}_i - \omega_i^*) - \\
 &\rho_{i3} (\hat{\omega}_i - \omega_i^*) - \hat{\Psi}_i(\cdot)] \quad i=1, 2, \dots, n
 \end{aligned} \quad (25)$$

式中， $\rho_{i1}, \rho_{i2}, \rho_{i3}$ 为控制器增益且均为正常数。由此可见，基于 NAC 的励磁输出通过在线补偿扰动估计值，可将同步发电机的非线性与各类建模不确定进行实时全局补偿。同时，采用基于功角，转速与其导数的状态反馈控制来调节闭环系统的动态

性能。所提控制框架无需同步发电机系统精确模型，具有极强的鲁棒性。

4 基于改进樽海鞘群算法的控制参数优化

为进一步提升 ONAEC 的控制性能，引入 MSSA 算法来获取其最优控制参数。MSSA 算法为樽海鞘群算法(Salp Swarm Algorithm, SSA)的改进算法，其加入了文化基因算法以显著提升 SSA 的全局搜索能力，具备收敛速度快、稳定性好、寻优质量高等优点，MSSA 的更多细节可见文献[23]。

另外，MSSA 的优化框架如图 1 所示，其优化过程主要包括基于种群的独立寻优和基于群落的信息交流，如下所述。

1) 基于种群的独立寻优

樽海鞘链中由两种角色所构成，即领导者和追随者，种群的领导者处于链的首位以指引樽海鞘链向食物源的方向移动，而跟随者执行跟随移动方向的命令；对于第 m 条樽海鞘链，其领导者的位置更新遵循式(26)的规律^[24]。

$$x_{m1}^j = \begin{cases} F_m^j + c_1 [c_2 (ub^j - lb^j) + lb^j], c_3 \geq 0.5 \\ F_m^j - c_1 [c_2 (ub^j - lb^j) + lb^j], c_3 < 0.5 \end{cases} \quad (26)$$

式中： j 为第 j 维搜索空间； x_{m1}^j 为第 m 条樽海鞘链领导者； F_m^j 为食物源； lb^j 和 ub^j 分别为第 j 维搜索空间的下与上界； $c_1 = 2e^{-\frac{4k}{k_{\max}}}$ ，其中 k 为当前迭代次数， k_{\max} 为最大迭代次数。 c_2, c_3 为随机数，且置于区间[0,1]内。

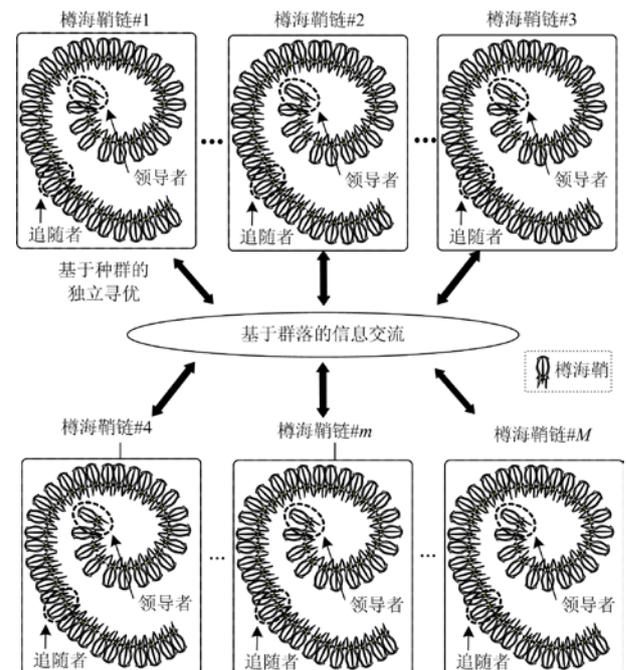


图 1 MSSA 优化框架

Fig. 1 Optimization framework of MSSA

另外, 跟随者的位置更新如式(27)所示。

$$x_{mi}^j = \frac{1}{2}(x_{mi}^j + x_{m,i-1}^j), i = 2, 3, \dots, n \quad (27)$$

式中: x_{mi}^j 为第 m 条樽海鞘链中的第 i 个樽海鞘; n 为每条樽海鞘链中樽海鞘的数目。另外, 式(27)表明追随者只受其紧邻的一个樽海鞘的影响来更新自己的位置, 因此领导者对追随者的影响逐级递减使得追随者能够保持自身的多样性, 从而降低了 MSSA 陷入局部最优解的概率。

2) 基于群落的信息交流:

群落中所有樽海鞘将通过信息交流, 并重组以产生新的樽海鞘链来改善 MSSA 的全局搜索能力。其中, 第 m 个樽海鞘链的更新规则描述为

$$Y^m = [x_{mi}^j, f_{mi}^j | x_{mi}^j = X(m + M(i - 1)), \\ f_{mi} = F(m + M(i - 1)), i = 1, 2, \dots, n], m = 1, 2, \dots, M \quad (28)$$

式中: x_{mi}^j 为第 m 个樽海鞘链中第 i 个樽海鞘的位置矢量; f_{mi}^j 为第 m 个樽海鞘链中第 i 个樽海鞘的适应度函数; X 、 F 分别为所有樽海鞘由大到小进行排序对应的位置矢量和适应度函数; M 为总的樽海鞘链数目。

本文将 NAC 应用于多机电力系统的励磁控制系统, 在标称模型和参数不确定下的三相短路两种算例下, 通过 MSSA 获取最优控制器参数以实现 ONAEC 设计。在此, 选取发电机功角和转子角速度为优化目标, 其模型为

$$\text{Minimize } F(x) = \sum_{\text{两种算例}} \int_0^T (|\delta_i - \delta_i^*| + |\omega_i - \omega_i^*| + \\ \beta |u_{tdi}|) dt \quad i = 1, 2, \dots, n \\ \text{s.t.} \begin{cases} -7 \text{ p.u.} \leq u_{tdi} \leq 7 \text{ p.u.} \\ 0 \leq \alpha_i \leq 2 \\ 0 \leq \lambda_{\alpha i} \leq 50 \\ 100 \leq b_{i0} \leq 3000 \end{cases} \quad (29)$$

式中, 权重系数 $\beta = 0.2$; α_i 、 $\lambda_{\alpha i}$ 、 b_{i0} 为观测器的根, 其值过大会加速误差收敛速度但是同时加大观测误差幅值, 相反, 其值过小就会降级误差收敛速度但是同时减小观测误差幅值, 为了使二者达到一

个合理的平衡, 本文研究的四阶扰动观测器的取值范围基于以往扰动观测器设计的经验所获取^[19]。另外, u_{tdi} 的引入旨在确保控制误差和控制成本整体最小化。仿真时间 T 设定为 10 s, 每条樽海鞘链中樽海鞘的数目设定为 10, 总的樽海鞘链数目选定为 3 条。

此外, 收敛条件为

$$|F_j - F_{j-1}| \leq \xi \quad (30)$$

式中: 收敛依据 $\xi = 10^{-3}$; F_j 和 F_{j-1} 分别代表第 j 次迭代和第 $(j-1)$ 次迭代的适应度函数值。

至此, 发电机励磁系统的 ONAEC 整体框架如图 2 所示。需要说明的是, 参照文献[19], 基于扰动观测器的自适应控制器具有参数众多以及控制全局一致性的特点。考虑到本文所研究的多机电力系统在实际运行中经济性及调参便捷性等因素(往往参与的所有机组均隶属于同一发电公司), 所有发电机的控制器均选取同一参数进行统一优化。

5 算例分析

为验证 ONAEC 的有效性, 本节将该控制器与传统 PID 控制^[8]、反馈线性化控制(Feedback Linearization Control, FLC)^[25]在图 3 所示的新英格兰电力系统进行控制性能比较, 且各算例下每台发电机均采用相同的 ONAEC。其中, 新英格兰电力系统由 39 条母线和 10 台发电机所构成, 与新英格兰电力系统相连的纽约电网由第 1 台发电机表示。另外, 详细的系统参数如表 1 及文献[26]所示。在此, 各系统变量转化为标幺值进行计算, 其中基准值取 $P_{\text{base}} = 100 \text{ MW} = 1.0 \text{ p.u.}$, $V_{\text{base}} = 1.0 \text{ p.u.}$ 。

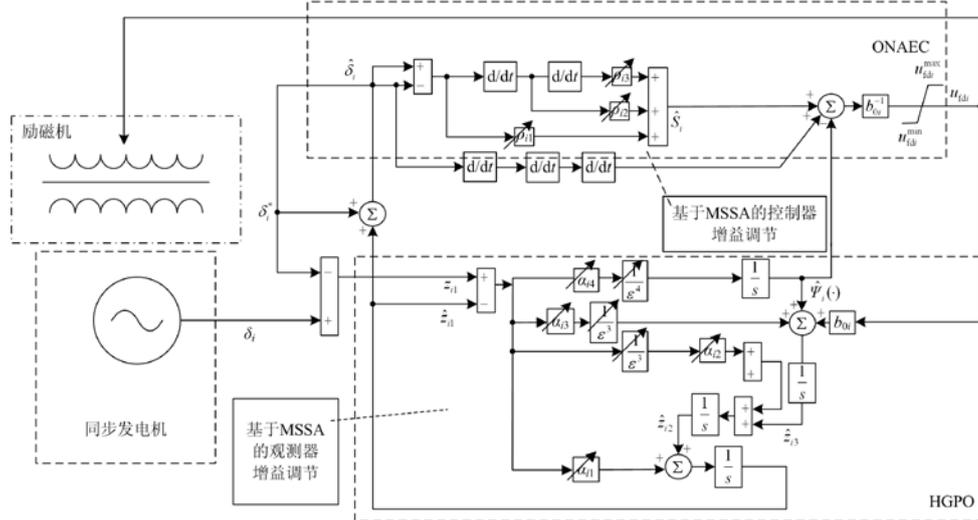


图 2 发电机励磁系统的 ONAEC 整体框架

Fig. 2 Overall ONAEC structure for excitation controller

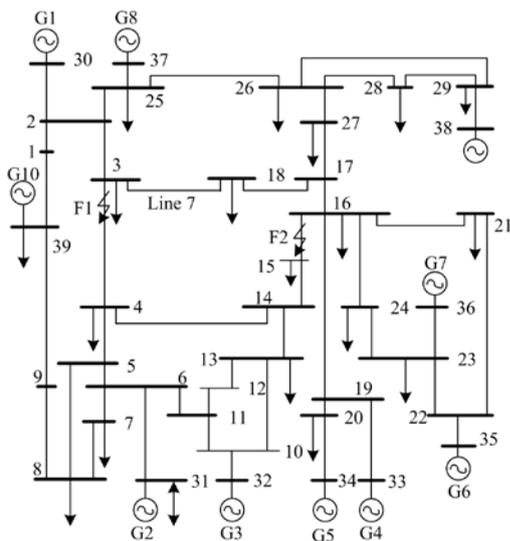


图 3 新英格兰电力系统结构示意图

Fig. 3 Configuration of New England power system

表 1 ONAEC 参数

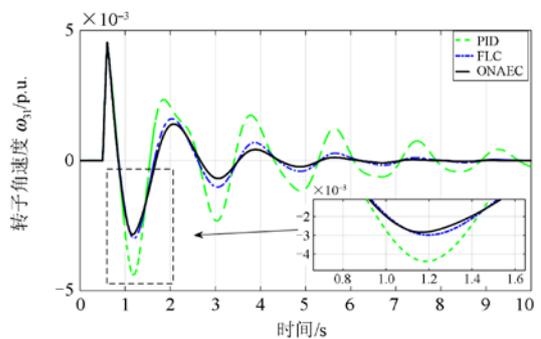
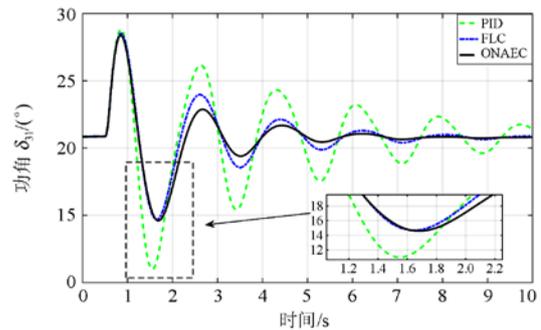
Table 1 Parameters of ONAEC

控制器参数				
$\alpha_{i1}=40$	$\alpha_{i2}=600$	$\alpha_{i3}=4\ 000$	$\alpha_{i4}=10\ 000$	$\varepsilon=0.1$
观测器参数				
$\rho_{i1}=10$	$\rho_{i2}=40$	$\rho_{i3}=160$	$b_{0i}=2\ 500$	

5.1 标称模型下的三相短路

为验证系统故障情况下 ONAEC 的有效性, 取如下故障: $t=0.5\text{ s}$ 时, 节点(母线)3 和 4 之间输电线路在 F1 点处发生三相短路, 如图 3 所示。 $t=0.6\text{ s}$ 时线路跳闸, $t=1.1\text{ s}$ 时自动重合闸装置启动。另外, 系统参数为额定值, 并未发生测量误差, 其取值见

参考文献[26]。相应的系统响应如图 4 所示, 可见 ONAEC 能够以最快的速率且最有效地恢复受到较大扰动的电力系统。特别地, PID、FLC 和 ONEAC 将机端电压 V_{t1} 恢复至稳定值所消耗的时间分别约为 2.48 s、2.45 s 以及 2.39 s。另外, PID、FLC 和 ONEAC 的有功功率 P_5 在第一个波峰的峰值分别为 58.84 MW、56.97 MW 和 57.89 MW。



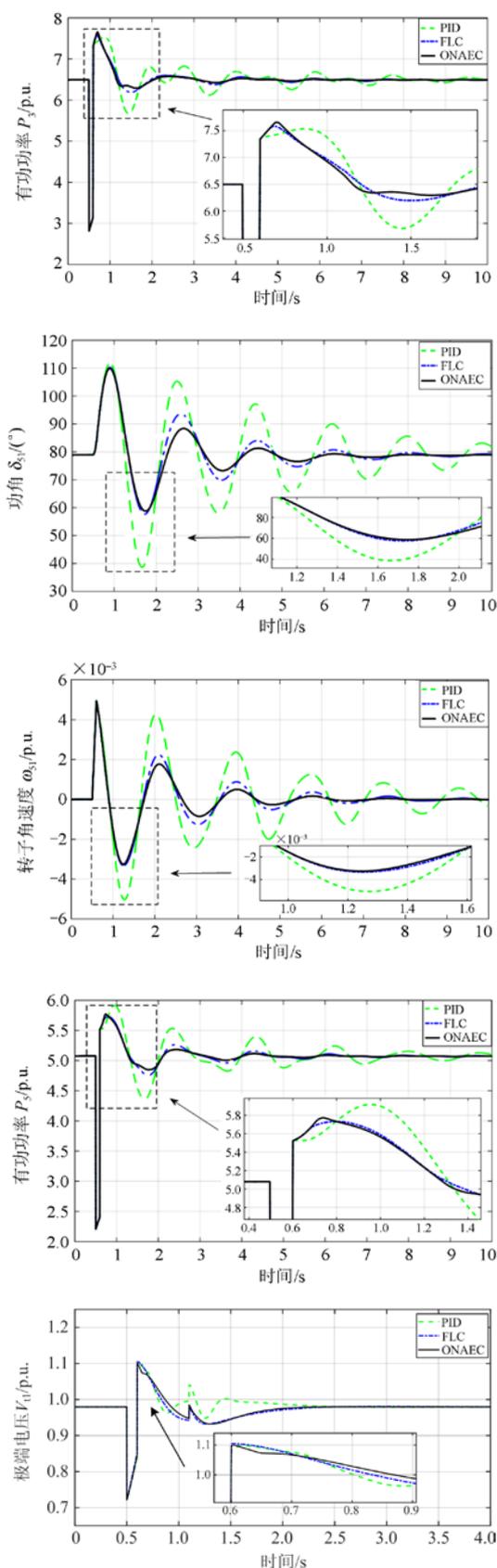
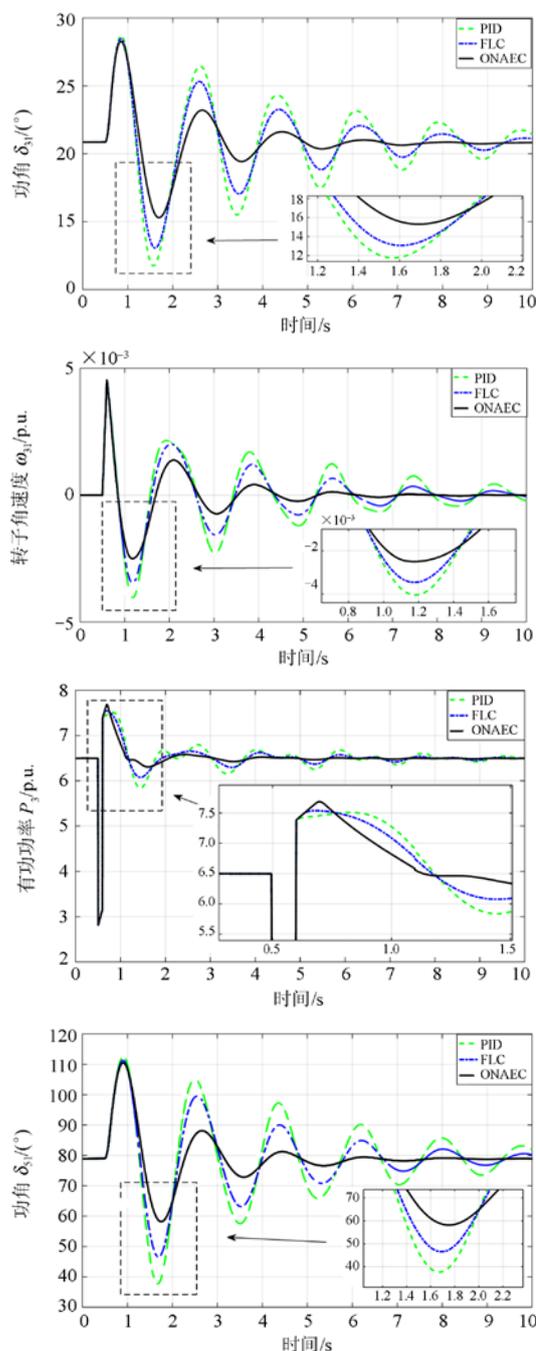


图4 标称值下发生三相短路下的系统响应

Fig. 4 System response obtained under the three-phase short-circuit fault with nominal parameter

5.2 参数不确定性下的三相短路

为研究各控制器在发电机参数不确定下的鲁棒性, 对各台发电机的 d 轴同步阻抗 x_{di} 在标称值附近发生 20% 的测量误差进行测试。图 5 给出了发电机遭受测量误差时发生三相短路故障的系统响应曲线, 短路点 F2 如图 3 所示。可以看出, 在参数测量误差下, PID 控制的控制性能急剧下降, 无法保证系统的最优运行。另外, 依赖于系统精确模型的



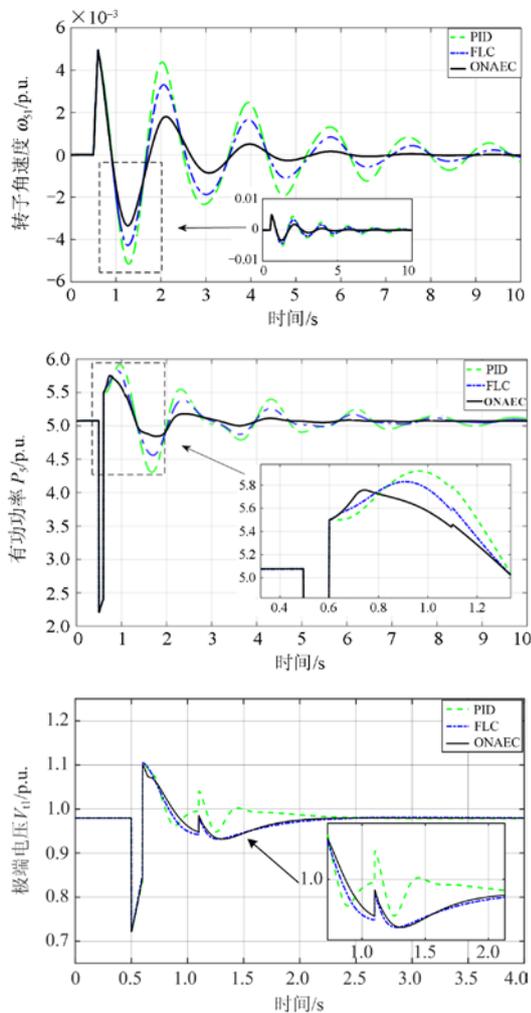


图5 参数不确定下发生三相短路的系统响应

Fig. 5 System response obtained under the three-phase short-circuit fault with parameter uncertainties

FLC的控制性能也不可避免地有所下降,相比之下, ONAEC 不依赖精确的系统模型,可获得令人满意的控制性能,在参数不确定性下鲁棒性能最佳。特别地, PID、FLC 和 ONEAC 将机端电压 V_{t1} 恢复至稳定值所消耗的时间分别约为 2.51 s, 2.47 s 以及 2.41 s。另外, PID、FLC 和 ONEAC 的有功功率 P_5 在第一个波峰的峰值分别为 59.16 MW, 58.13 MW 和 57.36 MW。显然, ONAEC 能最有效地恢复参数不确定性下受到较大扰动的电力系统。

6 结论

本文针对同步发电机设计了一款新型最优非线性自适应励磁控制以提高电力系统故障后的恢复能力,其贡献可概括为以下三个方面:

1) 首先,基于高增益扰动观测器对发电机的非

线性、不确定性、未建模动态聚合而来的扰动进行在线估计,并由 ONAEC 对该扰动进行实时完全补偿。此外,引入 MSSA 来获取控制器最优控制参数。

2) ONAEC 不依赖于精确的系统模型,仅需测量发电机功角一个状态量,具有结构简单、易于实现等优点。

3) 基于标称模型和参数不确定下的三相短路两个仿真算例表明: ONAEC 能够在不同的运行状况下实现全局一致的控制性能,且具有较高的鲁棒性。

参考文献

- [1] HOU K, SHAO G, WANG H, et al. Research on practical power system stability analysis algorithm based on modified SVM[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(2): 119-125. DOI: 10.1186/s41601-018-0086-0.
- [2] ANGHEL M, MILANO F, PAPACHRISTODOULOU A. Algorithmic construction of Lyapunov functions for power system stability analysis[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2013, 60(9): 2533-2546.
- [3] 饶宇飞, 张鹏辉, 李程昊, 等. 励磁涌流对高压直流输电系统换相失败的影响机理及评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 54-61.
RAO Yufei, ZHANG Penghui, LI Chenghao, et al. Mechanism and evaluating method for HVDC commutation failure caused by inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 54-61.
- [4] 周年光, 王钦, 姚伟, 等. 发电机励磁辅环控制参数对电力系统阻尼的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 12-22.
ZHOU Nianguang, WANG Qin, YAO Wei, et al. Influence analysis of generator excitation auxiliary control parameters on power system damping[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 12-22.
- [5] 夏永洪, 张聪, 温子健, 等. 混合励磁水轮同步发电机结构与原理[J]. 微电机, 2019, 52(7): 13-16, 22.
XIA Yonghong, ZHANG Cong, WEN Zijian, et al. Structure and principle of hybrid excitation hydroelectric synchronous generator[J]. Micromotors, 2019, 52(7): 13-16, 22.
- [6] 陈登义, 孔繁镍, 王希平. 发电机的浸入与不变自适应反步鲁棒励磁控制器[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(3): 30-34.
CHEN Dengyi, KONG Fannie, WANG Xiping. Immersion and invariant adaptive backstepping robust control of generator excitation system[J]. Electric Machines & Control

- Application, 2018, 45(3): 30-34.
- [7] 张虹, 郝贻娜, 刘旭, 等. 同步发电机励磁系统控制性能评估研究[J]. 计算机仿真, 2016, 33(11): 390-394, 425.
ZHANG Hong, HAO Yina, LIU Xu, et al. Research on control performance evaluation of synchronous generator excitation system[J]. Computer Simulation, 2016, 33(11): 390-394, 425.
- [8] GRIGSBY L L. Power system stability and control[M]. CRC Press, 2012.
- [9] 揭海宝, 康积涛, 李平. 基于变论域模糊 PID 控制的同步发电机励磁研究[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(6): 101-104.
JIE Haibao, KANG Jitao, LI Ping. Fuzzy PID controller based on variable universe for excitation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(6): 101-104.
- [10] 王镇道, 张乐, 彭子舜. 基于 PSO 优化算法的模糊 PID 励磁控制器设计[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2017, 44(8): 106-111, 136.
WANG Zhendao, ZHANG Le, PENG Zishun. Design of fuzzy PID excitation control based on PSO optimization algorithm[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2017, 44(8): 106-111, 136.
- [11] 贺徽, 周建中, 谭建华, 等. 基于 Mamdani 模糊 PID 的同步发电机励磁控制[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(2): 34-37.
HE Hui, ZHOU Jianzhong, TAN Jianhua, et al. Research and application of a fuzzy PID controller for excitation control systems in synchronous generators using mamdani model[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2010, 38(2): 34-37.
- [12] 李宗泽, 史成军. 基于二维云模型同步发电机 PID 励磁系统仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 19-24.
LI Zongze, SHI Chengjun. Simulation research on PID excitation system of synchronous generator based on two-dimensional cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 19-24.
- [13] ANG L I. PID control simulation of synchronous generator excitation system[J]. Electronic Design Engineering, 2011, 2: 19.
- [14] 陈金, 张孝, 王平, 等. 基于差分进化 PID 控制的同步发电机励磁系统研究[J]. 电气自动化, 2018, 40(2): 7-9.
CHEN Jin, ZHANG Xiao, WANG Ping, et al. Research on the excitation system of the synchronous generator based on differential evolution PID control[J]. Electrical Automation, 2018, 40(2): 7-9.
- [15] 刘甲林, 傅磊. 基于模糊 PID 双模控制的同步发电机励磁控制器仿真研究[J]. 电机与控制应用, 2015, 42(1): 18-21.
LIU Jialin, FU Lei. Simulation research of synchronous generator excitation controller based on fuzzy-PID dual-mode control[J]. Electric Machines & Control Application, 2015, 42(1): 18-21.
- [16] 阮阳, 袁荣湘. 非线性输出反馈控制的理论改进及其在电力系统励磁控制中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(13): 33-39.
RUAN Yang, YUAN Rongxiang. An improvement of nonlinear output feedback control theory and its application to excitation control for power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(13): 33-39.
- [17] 毛承雄, 何金平, 王丹, 等. 全控器件励磁系统的多变量反馈线性化控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 53-60, 10.
MAO Chengxiong, HE Jinping, WANG Dan, et al. Multivariable feedback linearization scheme for new excitation systems based on full controlled devices[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 53-60, 10.
- [18] 李福荣. 同步发电机非线性协同励磁控制器设计[J]. 电气传动, 2019, 49(3): 87-91.
LI Furong. Nonlinear excitation controller design for synchronous generator based on synergetic control[J]. Electric Drive, 2019, 49(3): 87-91.
- [19] 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.
- [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] CHEN J, JIANG L, YAO W, et al. Perturbation estimation based nonlinear adaptive control of a full-rated converter wind turbine for fault ride-through capability enhancement[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(6): 2733-2743.
- [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] YANG B, ZHONG L E, ZHANG X S, et al. Novel bio-inspired memetic salp swarm algorithm and application to MPPT for PV systems considering partial shading condition[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 215: 1203-1222.
- [24] 张达敏, 陈忠云, 辛梓芸, 等. 基于疯狂自适应的樽海鞘群算法[J]. 控制与决策, 2020, 35(9): 2112-2120.
ZHANG Damin, CHEN Zhongyun, XIN Ziyun, et al. Salp swarm algorithm based on craziness and adaptive[J]. Control and Decision, 2020, 35(9): 2112-2120.
- [25] DE TUGLIE E, IANNONE S M, TORELLI F. Feedback-linearization and feedback-feedforward decentralized control for multimachine power system[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(3): 382-391.
- [26] ATHAY T, PODMORE R, VIRMANI S, et al. A practical method for the direct analysis of transient stability[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(2): 573-584.

收稿日期: 2020-01-10; 修回日期: 2020-05-09

作者简介:

荆立坤(1980—), 男, 本科, 学士学位, 从事热力系统控制工作; E-mail: jing_kun2002@126.com

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

(编辑 周金梅)