

基于改进 PSO 算法的 FESS 的 PI 参数优化

史林军^{1,2}, 唐国庆¹

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 河海大学电气工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 提出了一种改进粒子群优化 (IPSO) 算法用于 FESS 的 PI 控制器的参数优化设计。IPSO 算法通过混沌初始化、迭代中加入混沌扰动和自适应调整惯性权重系数来克服传统 PSO 算法效率低、易陷入局部极值和算法早熟等缺陷。基于 IPSO 算法, 以 ITAE 指标最小为目标函数对 FESS 的 PI 控制器参数进行优化, 并以 FESS 接入四机系统为例, 通过非线性仿真验证了优化结果的有效性, 并通过与其他优化方法比较, 得出 IPSO 具有更好的优化性能的结论。

关键词: 飞轮储能系统; PI 控制器; 粒子群优化算法; 双馈电机; 电力系统

FESS PI parameter optimization by an improved PSO algorithm

SHI Lin-jun^{1,2}, TANG Guo-qing¹

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. College of Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: An improved PSO (IPSO) algorithm is proposed to optimize the parameters of the FESS PI controller. IPSO algorithm overcomes the traditional PSO algorithm defects such as low efficiency, falling into local minimum easily and premature, through chaotic initialization, iteration by adding chaos disturbance and adaptive inertia weight factor. Based on IPSO algorithm, the optimization of PI controller parameters of the FESS is finished when the minimum ITAE index is achieved. And the non-linear simulation results test and verify the effectiveness of optimization by a four-machine system installed with FESS. Finally, the conclusion is drawn that the IPSO is better than others by comparing with CPSO and APSO.

Key words: FESS; PI controller; PSO algorithm; DFIM; power systems

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)10-0052-06

0 引言

随着电力电子、材料等技术的发展, 飞轮储能系统 (FESS) 在电力系统中的应用受到越来越多的关注^[1-8]。特别是基于双馈感应电机 (DFIM) 的 FESS, 通过一定的控制策略, 具有独立的有功和无功功率调节能力, 可提高电力系统稳定性, 成为国内外诸多学者关注的一个新热点^[3,5-6]。应用 FESS 提高电力系统稳定性, 要求 FESS 具有快速调节有功和无功的能力, 因此其控制器的性能就非常关键。PI 控制器因具有容易实现、结构简单、鲁棒性强等特点而在控制领域中得到了广泛应用^[9-10]。但其参数的优化设计却是一个难点, 在实际工程中, 常采用试凑法来整定 PI 控制器参数, 这种方法不仅工作量大、繁琐, 而且参数的优劣与个人的经验强弱相关。迄今为止, 国内外已发表的文献还鲜见关于基于 DFIM 的 FESS 有功和无功的 PI 控制器参数优化设计

的方法。文献[3-5,8]都仅给出了有功和无功解耦控制策略, 并指出其能有效提高电力系统的稳定性, 但都没有给出 PI 控制器参数优化设计的方法。文献[11]研究了新的设计算法用于拖动系统的 FESS, 但其电机是永磁同步电机, 而不是 DFIM。故有必要探讨 FESS 的 PI 控制器参数优化设计的问题。

传统的 PI 控制器参数设计方法有零极点相消原理^[11], 但这种方法设计的控制器有一定的限制, 抗干扰能力较差, 并且当运行过程中受到扰动时, 恢复时间很慢。近年来随着智能算法的深入研究, 利用智能优化算法进行 PI 控制器参数优化设计越来越受重视, 如遗传算法^[12]等。基于遗传算法的 PI 控制器参数优化设计, 需进行编码、解码, 比较繁琐, 且迭代中需要进行复制、交叉和变异操作, 进化速度慢, 易产生早熟等缺点。

由 Kennedy 和 Eberhart 等人于 1995 年提出的粒子群优化 (PSO) 算法是一种新型的随机优化智能算

法^[13]。该算法具有计算效率高、收敛速度快、鲁棒性好等特点, 并具有全局寻优能力, 在电力系统中得到了广泛的应用, 包括最优潮流计算与无功优化控制^[14-15]、机组优化组合^[16]、负荷经济分配^[17]、谐波分析与电容器配置^[18]等方面。近年来, 也有将 PSO 算法用于 PI 控制器的设计^[19-20], 而将 PSO 应用于 FESS 的 PI 控制器参数优化设计还未见报道。

本文提出一种改进粒子群优化(IPSO) 算法应用于 FESS 的 PI 控制器参数优化设计。该算法通过混沌初始化、迭代中加入混沌扰动和自适应调整惯性权重系数来克服传统 PSO 算法效率低、易陷入局部极值和算法早熟等缺陷。文中给出了基于 IPSO 算法的 FESS 的 PI 控制器参数优化设计方法, 并以 FESS 接入四机系统为例, 通过非线性仿真分析验证了优化结果的有效性, 并通过与 APSO、CPSO 等优化方法比较, 得出 IPSO 具有更好的优化性能的结论。

1 FESS 及控制系统模型

双馈电机 (DFIM) 不仅可以实现功率的四象限柔性调节, 并且由于转子侧的 PWM 只需交换滑差功率, 其实用性和经济性都比采用全容量 PWM 控制的异步电机要好^[7], 因此本文采用 DFIM 作为 FESS 的发电机/电动机。

1.1 FESS 简化三阶模型

DFIM 的数学模型在文献^[3,5-6,8,21-24]已经有详细的讨论, 本节论述的 DFIM 模型采用电动惯例, 坐标已转换至 DFIM 自身的 d-q 坐标系上, 并采用三阶简化的动态模型表示。

DFIM 的转子运动方程 (电动机惯例, 忽略阻尼转矩) :

$$T_j \frac{ds}{dt} = T_m - T_e \quad (1)$$

式中: T_j 是电机惯性时间常数; s 是转差率, $s=(\omega_0-\omega_r)/\omega_0$, ω_r 是转子角速度, ω_0 是同步转速; T_e 是电磁转矩; 由于飞轮储能没有原动机, 故 $T_m=0$ 。

定子电压方程:

$$\begin{aligned} U_{ds} &= E'_{dd} - x'_{ls} I_{qs} \\ U_{qs} &= E'_{dq} + x'_{ls} I_{ds} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: U_{ds} 、 U_{qs} 分别为 DFIM 定子 d、q 轴电压; I_{ds} 、 I_{qs} 分别为 DFIM 定子 d、q 轴电流; $E'_{dd} = -\frac{x_m}{X_r} \Psi'_{qr}$, $E'_{dq} = \frac{x_m}{X_r} \Psi'_{dr}$ (为了区别于同步发电机的暂态电势), $X_r = x_r + x_m$, x_r 和 x_m 分别是转子漏电抗、励磁电抗,

Ψ'_{dr} 和 Ψ'_{qr} 分别为转子磁链; $x' = x_{ss} - x_m^2/X_r$, $x_{ss} = x_s + x_m$, x_s 为定子漏电抗。

动态方程:

$$\begin{aligned} \frac{dE'_{dd}}{dt} &= -\frac{\omega_0 x_m}{X_r} U_{qr} - \frac{1}{T'_{d0}} E'_{dd} + s\omega_0 E'_{qq} - \frac{(x_{ss} - x')}{T'_{d0}} I_{qs} \\ \frac{dE'_{dq}}{dt} &= \frac{\omega_0 x_m}{X_r} U_{dr} - \frac{1}{T'_{d0}} E'_{dq} - s\omega_0 E'_{dd} + \frac{(x_{ss} - x')}{T'_{d0}} I_{ds} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: U_{dr} 、 U_{qr} 分别为转子 d、q 轴上电压; $T'_{d0} = X_r/\omega_0 r_r$, r_r 为转子电阻。

式 (1) 和式 (3) 即为基于 DFIM 的飞轮储能系统的三阶动态模型。

1.2 FESS 有功、无功解耦控制

DFIM 共有 2 个控制量, 即转子电压 U_{dr} 和 U_{qr} , 应用定子磁场定向控制策略^[3,5,8,21,23], 即 q 轴是以并联接接入点电压相量 \dot{U}_s 为参考, 各相量分别向 \dot{U}_s 所在的轴和滞后其 90° 的轴进行投影, 得到 q 轴分量和 d 轴分量, 从而能实现 U_{qr} 控制有功功率、 U_{dr} 控制无功功率的解耦控制。

文献^[5,8,21,23-24]给出了 DFIM 的功率外环和电流内环的双环控制结构。文献^[24]指出了功率外环速度较慢而电流内环速度快, 因此本文为了简化分析忽略电流内环的动态, 则有功和无功的控制策略框图如图 1 所示。

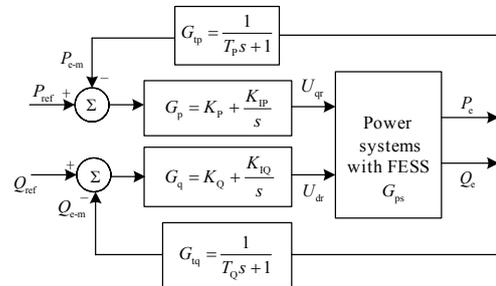


图 1 FESS 有功和无功解耦控制

Fig.1 FESS active power and reactive power decoupled control 图中: P_{ref} 、 P_e 、 P_{e-m} 分别为有功参考值、有功输出值和有功测量值; Q_{ref} 、 Q_e 、 Q_{e-m} 分别为无功参考值、无功输出值和无功测量值; G_{ps} 为含 FESS 的电力系统传递函数; G_p 、 G_q 分别为有功和无功 PI 控制器传递函数; G_{tp} 、 G_{tq} 分别为有功和无功测量环节的传递函数。

FESS 采用定子磁场定向控制策略后, 有功和无功实现了解耦控制, 因此以 FESS 有功控制为例说明基于 IPSO 算法的 PI 控制器优化设计。从图 1 中可看出, 有功控制包括 3 个环节, 其开环传递函数为:

$$G_0 = G_p G_{ps} G_{tp} \quad (4)$$

式中: $G_p = K_p + K_{IP}/s$; K_p 、 K_{IP} 分别为 PI 控制器的比例、

积分系数； $G_p=1/(sT_{ps}+1)$ ， T_p 为测量环节的惯性时间常数； G_{ps} 为含FESS的系统传递函数。

由式(4)及图1可知，FESS有功控制系统的闭环传递函数为：

$$G = \frac{G_p G_{ps}}{1 + G_p G_{ps} G_p} \quad (5)$$

2 改进粒子群优化 (IPSO) 算法

2.1 PSO 算法的基本原理^[13]

PSO优化算法是从鸟群捕食行为中受到启发并用于解决优化问题的。在PSO算法中，每个优化问题的解看成d维搜索空间的一只鸟，称为“粒子”，每个粒子都有一个当前速度 $v_i=(v_{i,1},v_{i,2},\dots,v_{i,d})$ 和当前位置 $x_i=(x_{i,1},x_{i,2},\dots,x_{i,d})$ ，并都有一个相应的适应度函数 f_i 来评价自己。PSO算法先产生一群随机粒子(随机解)，然后通过迭代寻找最优解。在每一次迭代中，每个粒子通过跟踪两个“极值”来更新自己：一个极值是该粒子本身所找到的最优解，称为个体极值，记为 $p_{best,i}=(p_{best,i,1},p_{best,i,2},\dots,p_{best,i,d})$ ；另一个极值是整个群体目前找到的最优解，称为全局极值，记为 $g_{best}=(g_{best,1},g_{best,2},\dots,g_{best,d})$ 。

PSO 算法在第(k+1)步迭代计算时，每个粒子根据式(6)和式(7)来更新自己的速度和位置：

$$v_{i,j}(k+1) = \omega v_{i,j}(k) + c_1 r(p_{best,i,j}(k) - x_{i,j}(k)) + c_2 r(g_{best,j} - x_{i,j}(k)) \quad (6)$$

$$x_{i,j}(k+1) = x_{i,j}(k) + v_{i,j}(k+1) \quad (7)$$

式中： ω 为惯性权重系数； c_1 、 c_2 为非负常数(通常取值在(0,2]之间)； r 为(0,1)之间的随机数， $j=1,2,\dots,d$ ， $i=1,2,\dots,m$ ， m 为粒子个数。

经过一定次数的迭代计算就可能找到优化问题的全局最优解。

2.2 IPSO 算法

上述传统PSO算法在寻优搜索过程中存在以下几点不足：(1)初始化过程是随机的，个体的质量不能保证，解群中可能有部分粒子远离最优解，从而影响求解的效率；(2)利用式(6)和式(7)更新自己的速度和位置，本质上是利用本身信息、个体极值信息和全局极值信息来指导粒子下一步迭代的位置，这实质上是一个正反馈过程。当粒子的本身信息和个体极值信息占优势时，该算法容易陷入局部最优解；(3)当某些粒子的个体极值 $p_{best,i}$ 接近全局极值 g_{best} 时，其速度更新由式(6)中的第一项

决定，这时 ω 的大小对寻优影响非常大。如果 g_{best} 是局部最优解，若 ω 比1小很多，随着迭代进行，粒子速度趋于0，使得算法过早收敛到局部最优解；反之，如果 g_{best} 是全局最优解附近，而 ω 较大，可能造成在全局最优解附近不断徘徊，降低了效率。

针对上述传统PSO算法的不足，本文提出一种改进PSO算法以提高算法效率、避免陷入局部极值和算法早熟的缺陷。基本思路是：(1)利用混沌运动的随机性、遍历性和规律性，产生大量初始群体，根据适应度函数值择优选出初始群体，以提高初始值的质量，将有助于提高求解效率；(2)在第(k+1)步迭代中，对每个粒子产生混沌扰动，使解能跳出局部极值区间，以避免陷入局部最优解；(3)自适应调整惯性权重系数。在局部最优解附近，惯性权重系数取得较大，以利于跳出局部最优解空间，避免早熟，而在最优解附近，惯性权重系数取得较小，使粒子可以在最优解附近做精细搜索，快速得到全局最优解，提高效率。

混沌是自然界广泛存在的一种非线性现象，它看似杂乱，却内含规律，具有随机性、遍历性等特点，能在一定范围内按自身规律不重复地遍历所有状态，因此利用混沌的这些特性进行优化搜索无疑比其他随机搜索更具优越性^[25-27]。目前对混沌尚无严格的定义，一般将由确定性方程得到的具有随机性的运行状态称为混沌，如Logistic混沌系统^[25]，其迭代公式为：

$$u(k+1) = \mu u(k)(1-u(k)) \quad (8)$$

式中： $k=0,1,2,\dots$ ； μ 为控制参量， $\mu \in (0,4]$ 。当 $\mu=4$ ， $0 \leq u(k) \leq 1$ 时，Logistic完全处于混沌状态。本文改进PSO算法中的混沌初始化和混沌扰动采用式(8)所示的混沌系统。

利用式(8)产生扰动向量 $u_i=(u_{i,1},u_{i,2},\dots,u_{i,d})$ ，并载波到扰动范围 $[-\beta_j, \beta_j]$ ($j=1,2,\dots,d$)内，得到扰动量 $\Delta x=(\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_d)$ ，其中：

$$\Delta x_j = -\beta_j + 2\beta_j u_{i,j} \quad (j=1,2,\dots,d) \quad (9)$$

则位置更新的式(7)修改为：

$$x'_{i,j}(k+1) = x_{i,j}(k) + v_{i,j}(k+1) + \Delta x \quad (10)$$

自适应权重系数定义如下^[19]：

$$\omega_{i,j}(k+1) = \begin{cases} \omega_{\min} + \alpha(\omega_{\max} - \omega_{\min}); & f_i(k) < f_{\text{avg}}(k) \\ \omega_{\max}; & f_i(k) \geq f_{\text{avg}}(k) \end{cases} \quad (11)$$

式中： $\alpha=(f_i(k)-f_{\min}(k))/(f_{\text{avg}}(k)-f_{\min}(k))$ ； ω_{\min} 、 ω_{\max} 分

别为惯性权重系数的最小和最大值; $f_{\min}(k)$ 、 $f_{\text{avg}}(k)$ 分别为第 k 步的整个群体适应值的最小值和平均值; $f_i(k)$ 为第 i 个粒子的第 k 步适应值。

3 基于 IPSO 的 FESS 的 PI 参数优化

3.1 优化的目标函数

ITAE (Integral of time multiplied by the absolute value of error) 准则指的是时间乘以误差绝对值的积分, 主要是限制过渡过程后期出现的误差, 故按 ITAE 准则设计的参数一般具有超调量小、过渡平稳、反应快速等特点。故本文采用输出有功功率偏差的 ITAE 指标作为 IPSO 算法的适应度函数, 其表达式为:

$$J_{\text{ITAE}} = \int_0^{t_s} t |e(t)| dt \quad (12)$$

式中: t_s 为动态响应调节时间; $e(t)$ 为系统动态响应过渡过程中 FESS 输出有功功率与给定有功参考量间的误差值。

因此, FESS 的 PI 控制器参数优化问题的目标函数可表达为:

$$\begin{aligned} & \min(J_{\text{ITAE}}) \\ \text{s.t.} & \quad c_p \leq K_p \leq d_p \\ & \quad c_{ip} \leq K_{ip} \leq d_{ip} \end{aligned} \quad (13)$$

式中: c_p 、 c_{ip} 、 d_p 、 d_{ip} 分别为 PI 控制器参数 K_p 和 K_{ip} 的下限和上限值。

可见, FESS 的 PI 控制器参数优化问题是一个带不等式约束条件的最优化问题。

3.2 IPSO 算法的优化步骤

基于 IPSO 的 FESS 有功 PI 控制器参数的优化的主要步骤如下:

1) 混沌初始化。PI 控制器只有两个参数需要优化, 即 K_p 和 K_{ip} , 是一个 2 维的优化问题。首先产生一个 2 维、每维数值在 0~1 之间的随机向量 $u_0=(u_{01}, u_{02})$, 然后根据式 (8) 得到 N 个随机向量 u_i ($i=1, 2, \dots, N$)。将得到的 u_i 的 2 分量分别载波到 K_p 和 K_{ip} 的取值范围, 得到 N 个初始位置, 即: $x_i=(x_{i1}, x_{i2})$ ($i=1, 2, \dots, N$)。

利用式 (11) 计算 N 个初始群体的适应度函数, 然后从 N 个初始群体中选择性能较好的 M 个作为初始群体 (保证了初始群体的质量), 并随机产生 M 个初始速度。

2) 混沌扰动。先按式 (6) 更新自己的速度, 按式 (7) 得到没有混沌扰动的新位置 $x_{i,j}(k+1)$, 然后由式 (12) 计算得到适应值 J 。

增加混沌扰动: 新产生一个 0~1 之间的二维随机向量 u_0 , 按式 (8) 产生 M 个混沌扰动向量 $u_i=(u_{i1}, u_{i2})$ ($i=1, 2, \dots, M$), 由式 (9) 可得到扰动量 $\Delta x=(\Delta x_1, \Delta x_2)$, 再由式 (10) 可得到增加了扰动量后的新位置 $x'_{i,j}(k+1)$, 通过式 (12) 计算得到增加混沌扰动后的适应值 J' 。

比较 J' 和 J , 若 $J' < J$, 则 $x_{i,j}(k+1) = x'_{i,j}(k+1)$ 。

3) 自适应惯性权重系数的计算。按式 (11) 计算得到惯性权重系数。

4) 更新每个粒子的个体极值 p_{best} 和全局极值 g_{best} 。

5) 迭代次数达到设定值或达到精度要求, 则输出 g_{best} , 否则转第 2) 步。

4 算例分析

以 FESS 接入四机系统^[28]为例, 分析基于 IPSO 算法的 FESS 有功 PI 控制器参数设计的效果。FESS 安装在四机系统的节点 7, 如图 2 所示。

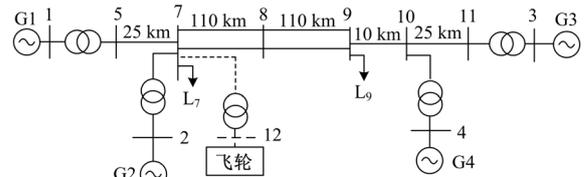


图 2 含 FESS 的四机系统

Fig.2 Sample of four-machine power system with FESS

FESS 参数取自文献[3], 初始状态为: $P_e = 0$, $Q_e = 0$ 。

IPSO 参数设置为: 种群规模为 20, 最大迭代次数为 50, $c_1=c_2=2$, $\omega_{\text{max}}=0.9$, $\omega_{\text{min}}=0.1$ 。

应用 IPSO 优化 FESS 的有功 PI 控制器参数 K_p 和 K_{ip} , 共 20 次, 得到:

$$\min(J_{\text{ITAE}}) = 0.1875; K_{p_opt} = 0.06; K_{ip_opt} = 0.01。$$

为了验证所优化的 PI 控制器参数性能, 对如图 2 所示的例子进行非线性仿真计算, 设定有功指令

$$P_{\text{ref}}^* \text{ 为: } P_{\text{ref}}^* = \begin{cases} 0 & t \in [0, 0.3) \\ 0.2 & t \in [0.3, 1.3) \\ 0 & t \in [1.3, 2] \end{cases}$$

式中: P_{ref}^* 是有功参考值 (标么值); t 是仿真时间, 单位是 s, 仿真时长为 2 s。

仿真结果如图 3 所示。图中虚线表示有功指令曲线, 点划线表示采用零极点消去法设计的 PI 参数响应曲线, 实线是经过 IPSO 算法优化的 PI 参数响应曲线。从图 3 中可以看出经过优化后的 PI 控制器

在有功阶跃指令下的响应曲线几乎没有超调，调节时间很短，具有良好的性能，说明采用 IPSO 的 FESS 有功 PI 控制器参数优化设计是合理和有效的。

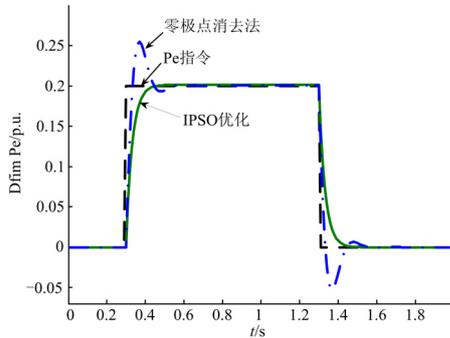


图 3 非线性仿真分析

Fig.3 Analysis of non-linear simulation

为了比较 IPSO 算法的性能，本文将 IPSO 算法与自适应粒子群（APSO）算法和混沌粒子群（CPSO）算法作比较。每种算法各运算 20 次，统计其平均迭代次数，如表 1 所示。

表 1 平均迭代次数

Tab.1 Average number of iteration	
优化方法	平均迭代次数
IPSO	8.4
APSO	10.8
CPSO	12.1

优化过程中，三种算法的适应值的收敛曲线如图 4 所示。

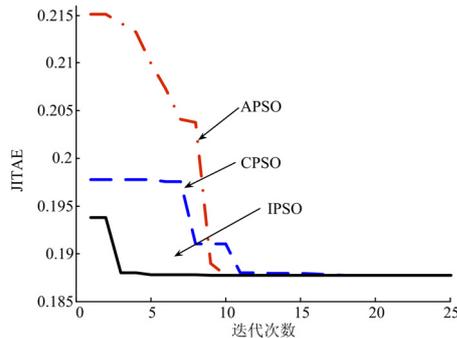


图 4 迭代收敛曲线

Fig.4 Curve of convergence

从表1和图4中可以看出：

(1) 由于IPSO和CPSO都采用混沌初始化，故这两种方法都具有较好的初始解。而APSO初始群体随机分布，其初始解较差。

(2) 迭代次数IPSO最少，其次APSO，最后是CPSO。由于IPSO和APSO都能自适应调整惯性权重

系数，故能加快收敛，而CPSO惯性权重系数固定，在最优解附近徘徊较多，故迭代次数较多。

可见，IPSO算法的优化性能比其他两种方法要好。

5 结论

本文针对传统 PSO 算法的缺陷，提出了一种改进粒子群（IPSO）优化算法，该方法首先通过混沌初始化提高初始群体的质量，然后在迭代过程中通过混沌扰动和自适应调整惯性权重系数来避免陷入局部极值和早熟等问题，有效提高算法效率和实用性，并将 IPSO 应用于 FESS 的有功 PI 控制器优化设计中。以 FESS 接入四机系统的 FESS 有功 PI 控制器参数优化设计为例，通过非线性仿真表明由 IPSO 算法设计的参数具有良好的过渡过程性能，表明 IPSO 算法有效性。并与 CPSO、APSO 算法相比，结果显示，IPSO 具有收敛速度更快的特点。

基于 IPSO 算法优化 FESS 的 PI 控制器参数的鲁棒性研究是作者下一步的工作。

参考文献

- [1] Ribeiro P F, Johnson B K, Crow M L, et al. Energy storage systems for advanced power applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2001, 89 (12):1744-1756.
- [2] 蒋书运,卫海岗,沈祖培.飞轮储能技术研究的发展现状[J].太阳能学报, 2000, 21 (4):427-433. JIANG Shu-yun, WEI Hai-gang, SHEN Zu-pei. The situation of the flywheel energy storage research[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2000, 21(4):427-433.
- [3] Akagi H, Sato H, Control and performance of a doubly-fed induction machine intended for a flywheel energy storage system [J]. IEEE Trans Power Elect, 2002,17(1): 109-116.
- [4] Wang M H, Chen H C. Transient stability control of multi-machine power systems using flywheel energy injection[J]. IEE Proceedings on Generation Transmission and Distribution, 2005,152(5):589-596.
- [5] 李刚,程时杰,等.利用柔性功率调节器提高电力系统稳定性[J].中国电机工程学报, 2007, 26(1): 1-6. LI Gang, CHENG Shi-jie, et al. Power system stability enhancement by the flexible power conditioner[J]. Proceedings of the CSEE, 2007,26(1):1-6.
- [6] Koyanagi K, Fujimitu M, Komatsu T. Analytical studies on power system dynamic stability enhancement by doubly-fed adjustable speed machine[C]. //Power System Technology, Proceedings PowerCon 2000 International Conference. Perth(Australia): 2000.
- [7] 文劲宇,程时杰,李刚,等.一种增强电力系统稳定性的多功能柔性功率调节器[J].中国电机工程学报(增

- 刊), 2005, 25(S): 6-11.
WEN Jin-yu, CHENG Shi-jie, LI Gang, et al. A multi-functional flexible power conditioner for power system stabilities enhancement[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(S): 6-11.
- [8] 杨浩, 文劲宇, 等. 多功能柔性功率调节器运行特性的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 19-24.
YANG Hao, WEN Jin-yu, et al. Investigation on operation characteristics of multi-functional flexible power conditioner[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 19-24.
- [9] Astrom K J, Hagglund T. PID controllers: theory, design, and tuning[M]. New York(USA): Instrument Society of American, 1995.
- [10] 马建伟, 李银侠. 满意 PID 控制设计理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [11] Salman Talebi, Behrooz N, Hamid A T. A novel algorithm for designing the PID controllers of high-speed flywheels for traction applications[C]. //Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC. 2007. 574-579.
- [12] Lansberry J E, Wozniak L. Adaptive hydro-generator governor tuning with a genetic algorithm[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1994, 9(1): 179-183.
- [13] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization[C]. //Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks. Perth(Ustralia): 1995. 1942-1948.
- [14] Hirotaka Yoshida, Kenichi Kawata. A particle swarm optimization for reactive power and voltage control considering voltage security assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(4): 1232-1239.
- [15] Abido M A. Optimal power flow using particle swarm optimization[J]. Int J Elect power energy syst, 2002, 24(7): 563-571.
- [16] 胡家声, 郭创新, 曹一家. 一种适合于电力系统机组组合问题的混合粒子群优化算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 25-29.
HU Jia-sheng, GUO Chuang-xin, CAO Yi-jia. A hybrid particle swarm optimization method for unit commitment problem[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 25-29.
- [17] 侯云鹤, 鲁丽娟, 熊信良, 等. 改进粒子群算法及其在电力系统经济负荷分配中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 95-100.
HOU Yun-he, LU Li-juan, XIONG Xin-yin, et al. Enhanced particle swarm optimization algorithm and its application on economic dispatch of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 95-100.
- [18] YU Xin-mei, XIONG Xin-yin, WU Yao-wu. A PSO-based approach to optimal capacitor placement with harmonic distortion consideration[J]. Electric Power Systems Research, 2004, 71(1): 27-33.
- [19] 周孝法, 陈陈, 等. 基于改进 PSO 算法的 HVDC PI 控制器优化设计[J]. 高电压技术, 2009, 35(2): 408-414.
ZHOU Xiao-fa, CHEN Chen, et al. Optimal design for HVDC PI controller based on improved PSO algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(2): 408-414.
- [20] 方红庆, 沈祖谥. 基于改进粒子群算法的水轮发电机组 PID 调速器参数优化[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 120-124.
FANG Hong-qing, SHEN Zu-yi. Optimal hydraulic turbo-generators PID governor tuning with an improved particle swarm optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 120-124.
- [21] Janaka B, Ekanayake, Lee Holdsworth, et al. Dynamic modeling of doubly fed induction generator wind turbines[J]. IEEE Trans Power Syst, 2003, 18(2): 803-809.
- [22] Ekanayake J B, Holdsworth L, Jenkins N. Comparison of 5th order and 3rd order machine models for doubly fed induction generator (DFIG) wind Turbines[J]. Electric Power System Research, 2003, 67: 207-215.
- [23] 高景德, 王祥珩, 李发海. 交流电机及其系统的分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- [24] 迟永宁. 大型风电场接入电网的稳定性问题研究(博士学位论文)[D]. 北京: 中国电力科学院, 2006.
CHI Yong-ning. Studies on the stability issues about large scale wind farm grid integration, Doctoral Dissertation[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2006.
- [25] 王东升, 曹磊. 混沌、分形及其应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1995.
- [26] 李兵, 蒋尉孙. 混沌优化方法及其应用[J]. 控制理论与应用, 1997, 14(4): 613-615.
LI Bing, JIANG Wei-sun. Chaos optimization method and its application[J]. Control Theory and Applications, 1997, 14(4): 613-615.
- [27] 高尚, 杨静宇. 混沌粒子群优化算法研究[J]. 模式识别与人工智能, 2006, 19(2): 266-270.
GAO Shang, YANG Jing-yu. Research on chaos particle swarm optimization algorithm[J]. PR & AI, 2006, 19(2): 266-270.
- [28] Kundur P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-hill Professional, 1994.

收稿日期: 2009-10-25

作者简介:

史林军(1976-), 男, 博士研究生, 研究方向为新能源、电力系统稳定与控制; E-mail: hhljnjun@sohu.com

唐国庆(1937-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统稳定与控制。