

# 基于差分进化机理优化的PID控制的AVR系统

王荣杰<sup>1,3</sup>, 詹宜巨<sup>2</sup>, 周海峰<sup>1</sup>, 崔博文<sup>1</sup>

(1. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 中山大学工学院, 广东 广州 510006;  
3. 福建省船舶与海洋工程重点实验室, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 在现代电力系统工程中, 电力系统的动态稳定已成为目前一个极具挑战性的问题。同步发电机励磁控制是提高电力系统稳定性和保证电力质量的最重要的装置, 但它的转子与其他部分之间的机电耦合会产生类似阻尼系统中出现的弹簧式的振荡现象。对此, 提出一种基于差分进化机理优化的PID控制的自动电压调节系统。首先将多变异策略和优劣淘汰机制引入到差分进化算法中, 然后由新的差分进化机理调节PID参数, 从而实现由PID自适应地控制自动电压调节系统的目的。仿真结果表明了该调节系统的可行性, 同时它比其他系统具有更好的动态响应性能。

**关键词:** 自动电压调节; PID控制器; 差分进化; 多变异策略; 同步发电机

## PID controlled AVR system based on differential evolution mechanism optimization

WANG Rongjie<sup>1,3</sup>, ZHAN Yiju<sup>2</sup>, ZHOU Haifeng<sup>1</sup>, CUI Bowen<sup>1</sup>

(1. Marine Engineering Institute, Jimei University, Xiamen 361021, China; 2. School of Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China; 3. Fujian Provincial Key Laboratory of Naval Architecture and Ocean Engineering, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** The stability problem of dynamic stability of power system has a challenge in modern power system engineering. Synchronous generator excitation control is one of the most important measures to improve power system stability and to guarantee the quality of electrical power it provides. In a synchronous generator, the electrometrical coupling between the rotor and the rest of the system causes it to behave in a manner similar to a damper system. Therefore, we consider the problem of enhancing the stability of PID controlled automatic voltage regulator based on differential evolution mechanism optimization. Firstly, the multi-mutation strategies and worst one elimination system are integrated into differential evolution algorithm. Then parameters of PID are self-adjusted by using improved differential evolution mechanism, so as to realize self-tuning of automatic voltage regulator. The simulation results show that the proposed method can get better dynamic respond behavior than other conventional methods.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51309116 and No. 51179074).

**Key words:** automatic voltage regulator; PID controller; differential evolution; multi-mutation strategy; synchronous generator

中图分类号: TM711

文章编号: 1674-3415(2015)24-0108-07

## 0 引言

比例-积分-微分(Proportional-Integral-Derivative, PID)控制器是一种集合比例、积分和微分三种运算

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51309116, 51179074); 福建省教育厅杰青项目(JA14169); 人工智能四川省重点实验室开放课题(2014RYJ03); 集美大学科研基金资助项目(ZQ2013001, ZC2013012)

的控制回路反馈机理。鉴于其结构简单和易于实现等优点, 它被广泛应用于过程控制、电机驱动、飞行控制和仪器仪表<sup>[1-7]</sup>。但由于控制对象的非线性和时滞性, PID控制器参数的调节仍是一个需要继续探讨的关键技术。近年来, 随着智能优化算法的不断涌现, 它们也被应用于调节PID的参数, 文献[8]提出了差分进化(Differential Evolution, DE)优化方法, 文献[9-10]也分别提出了应用遗传算法(Genetic Algorithm, GA)和粒子群优化算法(Particle Swarm

Optimization, PSO)来优化 PID 控制的参数; 虽然这些算法都能实现 PID 控制器参数的自适应调节功能, 但都存在收敛的“过早熟”不足, 此外 PSO 和 GA 还存在各自的其他不足, 如 GA 收敛速度慢, 而 PSO 算法中惯性权值因子选择存在盲目性<sup>[11]</sup>。将三者相比, 众多的数值优化分析实例都验证了 DE 比 GA 和 PSO 算法具有更好的优化和收敛性能<sup>[12]</sup>; 为了进一步提高 DE 的优化和收敛性能, 以及克服收敛的“过早熟”不足, 本文将多变异策略和优劣淘汰制引入到 DE 算法中, 然后利用新的差分进化机理自适应地优化 PID 的参数。在现代电力系统工程中, 电力系统的动态稳定已成为目前一个极具挑战性的问题; 而同步发电电动机励磁控制是加强电力系统稳定性和保证电力质量的最重要的装置, 自动电压调节器(Automatic Voltage Regulator, AVR)是同步发电机励磁控制系统的一个部件, 它的任务是确保同步发电机的端电压幅值恒定在特定的范围内; 在同步发电机中, 转子与其他部分之间的机电耦合会产生类似阻尼系统中出现的弹簧式的振荡现象。因此, 本文提出了一种差分进化机理优化的 PID 控制的 AVR 系统。

### 1 AVR 系统模型

AVR 系统组成的模型如图 1 所示, 它可简化成由放大、励磁、发电、传感和比较等五个单元组成, 图 2 为 AVR 系统的转移函数模型。由图 2 可得到 AVR 系统在频域的转移函数为

$$\frac{u_t(s)}{u_{ref}(s)} = \frac{(K_a K_c K_g)(1+sT_r)}{[(1+sT_a)(1+sT_c) \cdot (1+sT_g)(1+sT_r) + (K_a K_c K_g K_r)]} \quad (1)$$

式(1)中的相关参数的选择依据和限制<sup>[13]</sup>见表 1,  $K_g$  和  $T_g$  会随电网负载变化而变化。为了便于分析, 本文取基准电压为单位阶跃信号, 即  $u_{ref}(t)=1(V)$ ,  $t \in [0, T]$ 。

表 1 AVR 系统的参数选择依据

Table 1 Parameters limit of AVR system

| 组成部分 | 参数取值范围                |                            |
|------|-----------------------|----------------------------|
| 放大   | $10 \leq K_a \leq 40$ | $0.02 \leq T_a \leq 0.1$   |
| 励磁   | $1 \leq K_c \leq 10$  | $0.4 \leq T_c \leq 1$      |
| 传感   | $K_r=1$               | $0.001 \leq T_r \leq 0.06$ |
| 发电   | $0.7 \leq K_g \leq 1$ | $1 \leq T_g \leq 2$        |

式(1)中 AVR 各组成部分的参数选为:  $K_a=10$ ,  $T_a=0.1$ ,  $K_c=1$ ,  $T_c=0.4$ ,  $K_g=1$ ,  $T_g=1$ ,  $K_r=1$ ,  $T_r=0.01$

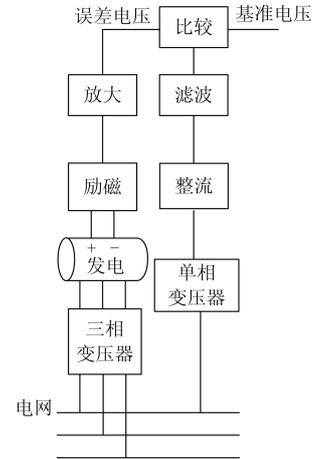


图 1 AVR 系统模型

Fig. 1 Model of AVR system

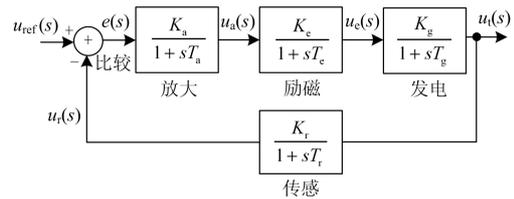


图 2 AVR 系统的转移函数模型

Fig. 2 Transfer function model of AVR system

时, 此时的系统含有  $(-12.4892, -99.9712, -0.5198 - 4.6642j, -0.5198 + 4.6642j)$  极点,  $j = \sqrt{-1}$  为虚数, 很显它是一个稳定的系统, 但由如图 3 所示 AVR 系统产生响应的输出信号波形可知, 它的响应  $u_t(t)$  出现了振荡现象。

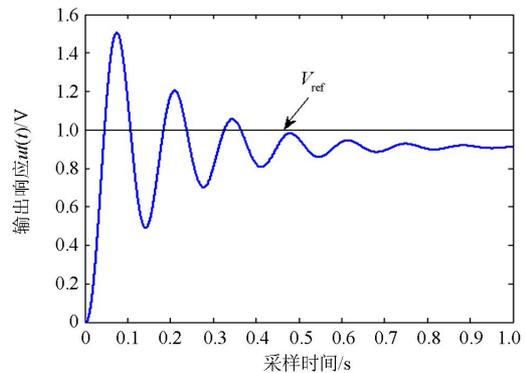


图 3 AVR 系统的输出响应

Fig. 3 Output response of AVR system

### 2 基于差分进化机理优化的 PID 控制的 AVR 系统

为了消除输出响应如图 3 所示的类似阻尼系统中出现的弹簧式的振荡现象, 并提高 AVR 系统的动

态稳定性, 本文提出了一种基于差分进化机理优化的 PID 控制的 AVR 系统, 它的组成结构如图 4 所示。

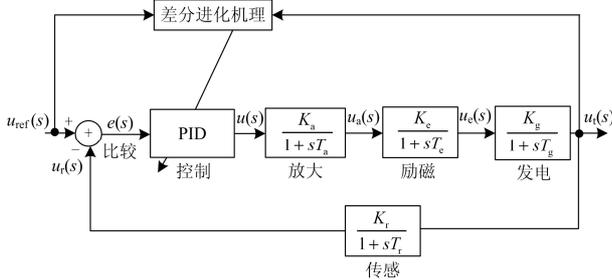


图 4 基于差分进化机理优化 PID 控制的 AVR 系统结构  
Fig. 4 Block diagram of PID controlled AVR system based on differential evolution mechanism

图 4 中 PID 控制的 AVR 系统的转移函数如式(2)所示。

$$\frac{u_t(s)}{u_{vref}(s)} = (s^2 K_d + s K_p + K_i)(K_a K_c K_g) \cdot \frac{(1 + sT_r)}{[s(1 + sT_a)(1 + sT_c)(1 + sT_g) \cdot (1 + sT_r) + (K_a K_c K_g K_r)(s^2 K_d + s K_p + K_i)]} \quad (2)$$

其中, PID 控制器的转移函数如式(3)所示。

$$\frac{u(s)}{e(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (3)$$

通过比较式(1)和式(2)可知, 本文提出 PID 控制的 AVR 系统中由积分 I 控制器为 AVR 系统增加有限个零点来减少稳态误差, 而改善它的暂态响应则是通过微分 D 控制器提供的零极点来实现。\$K\_p\$、\$K\_d\$ 和 \$K\_i\$ 为 PID 控制器中比例、微分和积分环节的参数, 要获得最优的这些参数其实是一个非线性和多维搜索复杂过程, 因此, 我们利用一种多变异策略的差分进化机理来优化 PID 控制器的参数。

## 2.1 多变异策略的差分进化算法

差分进化算法是 Storn R. 和 Price K. 提出的一种模拟生物进化的群体寻优算法<sup>[14]</sup>。该优化算法容易实现, 而且受控参数少, 这也是我们选择差分进化算法的一个主要原因。利用其求解优化问题时, 那么待优化参数就相当于进化的生物, 而生物进化一次相当于对于待求解的参数完成一次优化迭代。模拟生物进化机理来进行一次参数的优化迭代, 其过程包括变异、杂交和选优等三个阶段。原型的 DE 算法中单一变异策略增加了算法陷入局部最优或早熟收敛的概率, 解决此问题的思路就是使变异策略多样化。本文将待优化参数记为 \$\theta\$, 我们提出多

变异策略搜索下一个优化解的迭代计算式可改为

$$\theta_m(i, d) = \begin{cases} \theta(r_1, d) + F[\theta(r_2, d) - \theta(r_3, d)], & p(i) \geq 1.5\bar{p} \\ \theta(i, d) + \varphi[\theta(r_1, d) - \theta(r_2, d)], & p(i) \in [\bar{p}, 1.5\bar{p}) \\ \theta_{best}(d) + \varphi[\theta(i, d) - \theta(r_1, d)], & p(i) \in [0.5\bar{p}, \bar{p}) \\ \theta_{max}(d) + \theta_{min}(d) - \theta(i, d), & p(i) < 0.5\bar{p} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: \$\theta\_m\$ 为模拟生物变异搜索下一个新的解; \$\theta\_{best}\$ 为至目前为止的最优解; \$i=1, \dots, N\_s\$, \$N\_s\$ 为进化生物的规模; \$d=1, \dots, D\$, \$D\$ 为待求解参数的维数; \$\theta\_{max}(d)\$ 和 \$\theta\_{min}(d)\$ 分别为可能解的第 \$d\$ 维的最大值和最小值; \$F\$ 为 \$[0, 2]\$ 之间的随机数; \$\varphi\$ 为 \$[-1, 1]\$ 之间的随机数; \$r\_1\$、\$r\_2\$ 和 \$r\_3\$ 为在 \$[1, N\_s]\$ 之间随机产生与 \$i\$ 相邻解的序号, 注意 \$r\_1 \neq r\_2 \neq i\$, \$r\_1 \neq r\_2 \neq r\_3 \neq i\$; \$p(i)\$ 和 \$\bar{p}\$ 分别为与目标函数值成正比的不同可能优化解的概率

和平均概率, \$p(i)\$ 由式(5)计算得到, \$\bar{p} = \frac{\sum\_{i=1}^{N\_s} p(i)}{N\_s} = \frac{1}{N\_s}\$。

$$p(i) = \frac{fit(\theta_i)}{\sum_{i=1}^{N_s} fit(\theta_i)} \quad i=1, \dots, N_s \quad (5)$$

式(5)的 \$fit(\theta\_i)\$ 为衡量第 \$i\$ 个解 \$\theta\_i\$ 优化效果的目标函数。

杂交阶段产生新解的迭代由式(6)描述。

$$\theta_c(i, d) = \begin{cases} \theta_m(i, d), & \varphi \leq C_R \text{ 或 } i = k_s \\ \theta(i, d), & \varphi > C_R \text{ 且 } i \neq k_s \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中: \$k\_s\$ 为 \$[1, N\_s]\$ 之间的随机整数; \$\varphi\$ 为 \$[0, 1]\$ 之间产生的随机数; \$C\_R\$ 为杂交率, 它的取值范围在 \$[0, 1]\$。

为了更进一步提高算法的优化和收敛性, 我们提出的 DE 算法的选优阶段不仅要根据目标函数值从原来的 \$\theta\$ 和 \$\theta\_c\$ 中选出新的优化解 \$\theta\$, 还引入“优胜劣汰”的机制对 \$k\_{limit}\$ 次没有得到更新 \$\theta\$ 的按式(7)对它的元素进行重新赋予可能的解。

$$\theta(i, d) = \theta_{max}(d) + \theta_{min}(d) - \theta(i, d) \quad (7)$$

## 2.2 基于差分进化机理优化的 PID 控制的 AVR 系统

提出的基于差分进化机理优化 PID 控制的 AVR 系统的思路: 以求解式(2)或式(3)最优的 PID 参数准则为目标函数, 利用第 2.1 节中改进的差分进化算法进行优化得到最佳的 \$K\_p\$、\$K\_d\$ 和 \$K\_i\$, 最终获得有良好动态响应特性的 AVR 系统。求解 PID 参数准则有 ITAE、IAE、ITSE 和 ISE 函数, 它们分别由式(8)~式(11)描述, 在 DE 优化迭代运算中, 记 \$\theta=[K\_p, K\_d, K\_i]\$, 则它们被定义为目标函数 \$fit(\theta)\$。

$$ITAE = \int_0^t |V_{ref} - u_t(t)| dt \quad (8)$$

$$IAE = \int_0^t |V_{ref} - u_t(t)| dt \quad (9)$$

$$ITSE = \int_0^t t [V_{ref} - u_t(t)]^2 dt \quad (10)$$

$$ISE = \int_0^t [V_{ref} - u_t(t)]^2 dt \quad (11)$$

为了便于分析, 将上述的基于差分进化机理优化 PID 控制的 AVR 方法的实现步骤归结如下。

Step 1. 初始化最大迭代次数  $k_{max}$ ,  $k_{limit}$ ,  $C_R$ , 没有得到更优的解的记录  $k(i)_{count}$ , 进化生物的规模  $N_S$  和待优化解的维数  $D$ ; 在  $[\theta_{min}(d), \theta_{max}(d)]$  之间随机产生  $\theta(i, d)$  初始值,  $i=1, 2, \dots, N_S, d=1, 2, \dots, D$ 。

Step 2. 由式(5)迭代式得到变异阶段的更新解  $\theta_m$ 。

Step 3. 由式(6)迭代式得到杂交阶段的更新解  $\theta_c$ , 并计算它们相应的目标函数。

Step 4. 根据目标函数值大小关系, 从上次迭代的  $\theta$  和 Step 3. 计算的  $\theta_c$  中选出新的优化解; 如果新的优化解选择为上次迭代的  $\theta$ , 则相应的进化生物的  $k(i)_{count}=k(i)_{count}+1$ , 对于  $k(i)_{count}>k_{limit}$  的  $\theta$  根据式(7)产生它的新解。

Step 5. 从  $\theta$  中选取到目前为止最优的可能解  $\theta_{best}$ ; 如果到达收敛条件, 则跳出 Step 6; 否则, 跳回 Step 2。

Step 6. 将全局最优的可能解  $\theta_{best}$  装入 PID 控制器中, 即构造最优 PID 控制器控制的 AVR 系统。

### 3 仿真分析

为了验证第 2 节中基于差分进化机理优化 PID 控制的 AVR 系统的有效性, 分别从优化算法的收敛性和 AVR 系统动态调节特性进行了仿真实验, 每个仿真实验均进行了 30 次独立运行。AVR 系统的参数选为:  $K_a=10, T_a=0.1, K_c=1, T_c=0.4, K_r=1, T_r=0.01$ 。本文的仿真平台为 Matlab R2010b。

#### 实验一 改进的差分进化优化算法测试

为了考察第 2.1 节中多变异策略的差分进化算法的优化效果, 选取  $K_g=1$  和  $T_g=1$  的 ITAE、IAE、ITSE 和 ISE 函数进行试验; 此外, 我们还将本文的算法(记为 IDE)与文献[15-16]中原型的 DE 优化算法、文献[12, 17]中改进的 DE 优化算法(记为 MDE)及文献[18-21]中的 PSO 优化算法的实验结果进行比较和仿真。虽然, 目前众多文献中提及 DE 的改进算法或相关的一些智能优化算法, 鉴于本文的研究重点和限于篇幅, 对此本文不再赘述。IDE、MDE 和 DE 三种算法相关的参数设置为式(12), 而 PSO 优化算法的相关参数设置为式(13)。

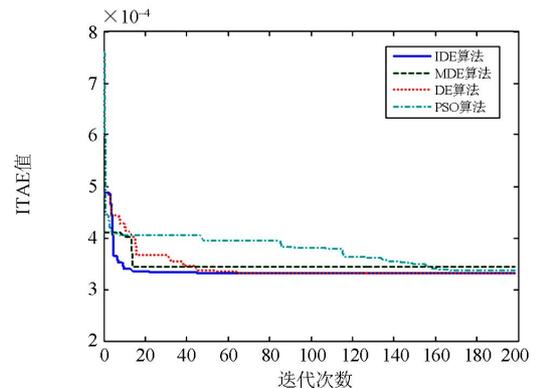
$$\begin{cases} k_{max} = 200 \\ C_R = 0.5 \\ N_S = 20 \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \text{最大迭代次数} = 200 \\ \text{种群规模} = 20 \\ \text{最大惯性权值因子} = 0.9 \\ \text{最小惯性权值因子} = 0.4 \\ \text{两个加速常数均为 } 2 \end{cases} \quad (13)$$

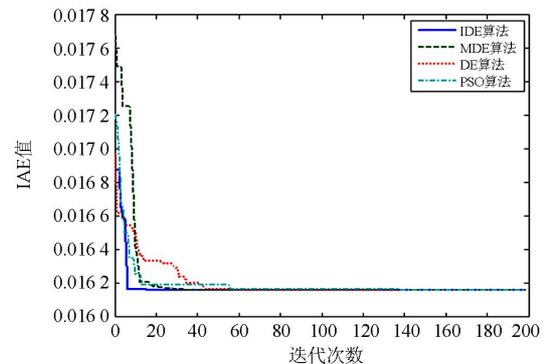
图 5 为 4 种不同优化算法对目标函数进行优化的收敛曲线, 通过此曲线可以直观分析不同算法的优化收敛能力, 待优化解  $\theta=[K_p, K_d, K_i]$  的初值均在  $[0, 3]$  之间随机产生。从图 5 的对 4 种不同优化算法进行比较的结果可知, 本文提出的 IDE 算法比 MDE 算法、DE 算法和 PSO 算法具有更良好的优化效果; 这也说明本文提出的通过改进差分进化算法中多变异策略和“优胜劣汰”选优方法相互的作用来改善相关算法的优化性能的思路是可行的, 实例仿真实验结果也达到了预期目标。

实验二 基于差分进化机理优化的 PID 控制的 AVR 系统的仿真与分析

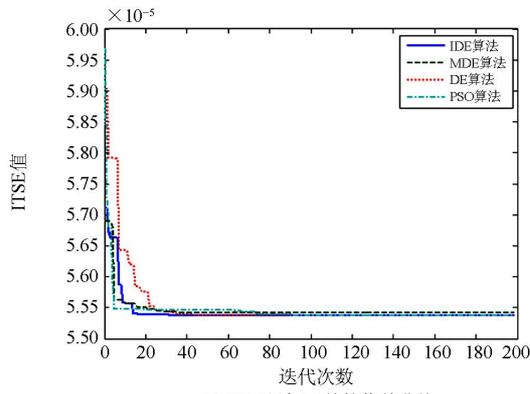
为了验证第 2.2 节中的基于差分进化机理优化的 PID 控制的 AVR 系统的有效性, 分别对  $K_g=1$  和



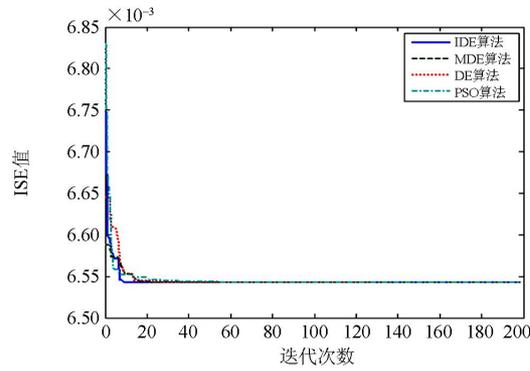
(a) ITAE 目标函数的收敛曲线



(b) IAE 目标函数的收敛曲线



(c) ITSE目标函数的收敛曲线



(d) ISE目标函数的收敛曲线

图 5 不同优化算法的收敛曲线

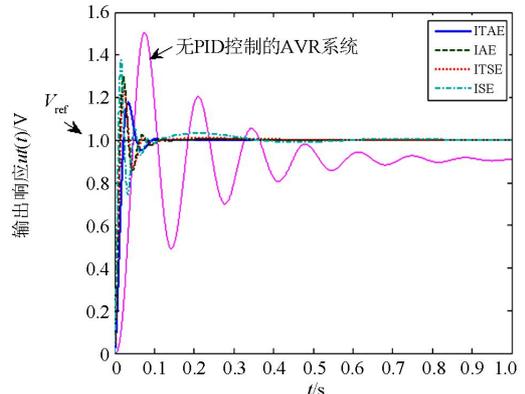
Fig. 5 Convergent curve of different optimization algorithms

$T_g=1, K_g=0.7$  和  $T_g=1, K_g=1$  和  $T_g=2, K_g=0.7$  和  $T_g=2$  的 AVR 系统进行动态调节的仿真实验; 此外, 还分别利用 ITAE、IAE、ITSE 和 ISE 四种准则函数来优化 PID 控制器的参数。利用它们优化的 PID 控制的 AVR 系统输出响应如图 6 所示。为了更好定量地分析本文提出的 AVR 系统的动态调节性能, 我们采用输出响应的最大超调量的百分比  $\delta_{max}$ 、稳态误差  $E_{ss}$ (Stead-state Error)、调节时间  $t_s$  (误差范围为  $\pm 2\%$ ) 和上升时间  $t_r$  来评价, 利用它们对不同的 AVR 系统调节性能评价的结果如表 2~表 5 所示。

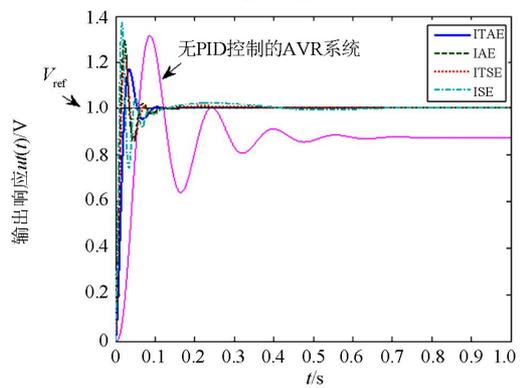
表 2  $K_g=1$  和  $T_g=1$  的 AVR 系统性能比较

Table 2 Performance comparison of AVR systems with  $K_g=1$  and  $T_g=1$

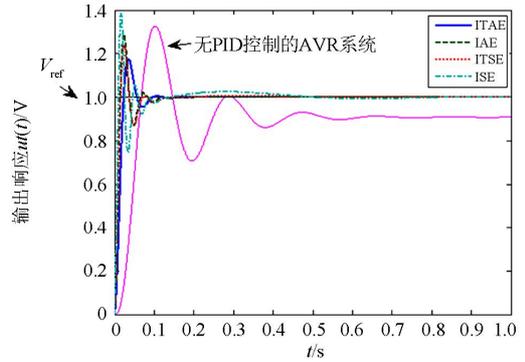
| 定量评价              | PID 参数优化目标函数 |              |              |          |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|----------|
|                   | ITAE         | IAE          | ITSE         | ISE      |
| $\delta_{max}/\%$ | 17.493 5     | 29.609 8     | 23.514 4     | 37.943 3 |
| $E_{ss}$          | 1.442 3e-007 | 1.074 5e-006 | 6.435 6e-006 | 0.001 6  |
| $t_s/s$           | 0.083 9      | 0.097 5      | 0.095 9      | 0.289 6  |
| $t_r/s$           | 0.015 7      | 0.009 7      | 0.010 6      | 0.006 9  |



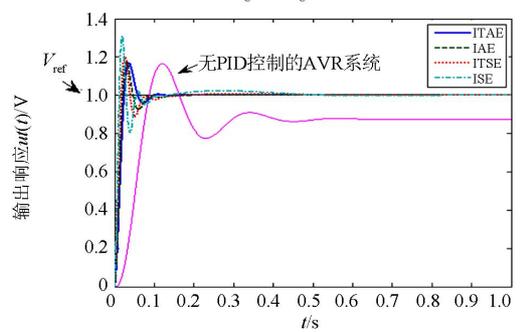
(a)  $K_g=1$ 和 $T_g=1$ 的AVR系统



(b)  $K_g=0.7$ 和 $T_g=1$ 的AVR系统



(c)  $K_g=1$ 和 $T_g=2$ 的AVR系统



(d)  $K_g=0.7$ 和 $T_g=2$ 的AVR系统

图 6 不同 AVR 系统的输出响应

Fig. 6 Output response of different AVR system

表 3  $K_g=0.7$  和  $T_g=1$  的 AVR 系统性能比较  
Table 3 Performance comparison of AVR systems

| 定量评价               | PID 参数优化目标函数 |              |              |              |
|--------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                    | ITAE         | IAE          | ITSE         | ISE          |
| $\delta_{\max}/\%$ | 17.041 0     | 29.599 2     | 23.516 8     | 37.181 6     |
| $E_{ss}$           | 1.360 1e-007 | 1.083 4e-006 | 6.442 4e-006 | 2.995 1e-004 |
| $t_s/s$            | 0.084 7      | 0.097 5      | 0.095 9      | 0.309 0      |
| $t_r/s$            | 0.015 9      | 0.009 7      | 0.010 6      | 0.007 0      |

表 4  $K_g=1$  和  $T_g=2$  的 AVR 系统性能比较  
Table 4 Performance comparison of AVR systems

| 定量评价               | PID 参数优化目标函数 |              |              |          |
|--------------------|--------------|--------------|--------------|----------|
|                    | ITAE         | IAE          | ITSE         | ISE      |
| $\delta_{\max}/\%$ | 17.373 5     | 28.576 7     | 24.114 1     | 38.091 3 |
| $E_{ss}$           | 5.551 5e-007 | 2.490 7e-005 | 1.766 9e-005 | 0.002 4  |
| $t_s/s$            | 0.085 2      | 0.100 7      | 0.104 6      | 0.324 9  |
| $t_r/s$            | 0.016 1      | 0.010 4      | 0.010 9      | 0.007 0  |

由图 6 所示的不同 AVR 系统输出响应可知, 除在 4 种目标函数优化 PID 控制  $K_g=0.7$  和  $T_g=2$  的 AVR 系统的输出响应相对比较接近外, 其他的 AVR 系统的输出响应区别都很大, 由表 2~表 5 所示的性能也可以验证。由图 6 和表 2~表 5 的比较结果还可知, 以 ISE 为目标函数优化 PID 参数的 AVR 系统输出响应的  $t_r$  短, 但响应存在振荡现象; 而以 ITAE 为目标函数优化 PID 参数的 AVR 系统动态稳定性较好, 但输出响应的  $t_r$  长; ITSE 或 IAE 目标函数权衡这两种因素, 因此以它们优化 PID 参数的 AVR 系统在输出动态稳定性和上升时间得到相对比较中和的效果, 特别是 IAE 函数。由这个仿真实验结果表明, 本文提出的利用改进的差分进化机理和 PID 控制相结合来提高 AVR 系统动态响应特性是可行的。

表 5  $K_g=0.7$  和  $T_g=2$  的 AVR 系统性能比较  
Table 5 Performance comparison of AVR systems

| 定量评价               | PID 参数优化目标函数 |              |              |              |
|--------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                    | ITAE         | IAE          | ITSE         | ISE          |
| $\delta_{\max}/\%$ | 16.689 1     | 17.411 4     | 20.336 7     | 30.764 8     |
| $E_{ss}$           | 3.207 0e-007 | 3.558 4e-005 | 1.124 2e-005 | 8.870 6e-004 |
| $t_s/s$            | 0.086 6      | 0.079 9      | 0.109 2      | 0.298 6      |
| $t_r/s$            | 0.016 6      | 0.014 1      | 0.011 9      | 0.008 4      |

## 4 结论

针对提高 AVR 系统动态性能的要求, 本文主要完成如下的内容: 首先, 分别将多变异策略和“优胜劣汰”机制引入原型的差分算法的变异阶段和选优阶段, 得到一种新的差分进化机理; 通过对 4 种 PID 参数优化准则的优化结果表明了该方案的合理性, 且它比其他一些算法具有更好的优化性能; 然后利用这种改进的优化机理对用于 AVR 系统的 PID 控制器参数进行调节, 从而达到自适应地改善 AVR 系统动态响应特性的目的; 最后, 通过对不同 AVR 系统控制的仿真结果表明了该方法的可行性。

## 参考文献

- [1] BIRGITTA K, BENGT L. Evaluation and simple tuning of PID controllers with high-frequency robustness[J]. Journal of Process Control, 2006, 16(9): 91-102.
- [2] 杨睿茜, 陈红坤, 陶玉波. 双馈式风机控制器参数整定的实用方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 63-69.  
YANG Ruixi, CHEN Hongkun, TAO Yubo. A practical method on doubly-fed induction generator controller parameter determination[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 63-69.
- [3] 杨天, 霍琳琳. 一种柔性直流输电系统 PID-ANFIS 优化控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 29-37.  
YANG Tian, HUO Linlin. A control method of PID-ANFIS controller for VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 29-37.
- [4] MONJE C, VINAGRE B, FELIU V. Tuning and auto-tuning of fractional order controller for industry applications[J]. Control Engineering Practice Journal, 2008, 16(7): 798-812.
- [5] 王同旭, 马鸿雁, 聂沐晗. 电梯用永磁同步电机 BP 神经网络 PID 调速控制方法的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 43-47.  
WANG Tongxu, MA Hongyan, NIE Muhao. The research of PMSM BP neural network PID control in elevator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 43-47.
- [6] 汪先兵, 费树岷, 徐清扬. BP 神经网络 PID 控制的永磁真空开关储能电容恒流充电特性分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(10): 212-218.

- WANG Xianbing, FEI Shumin, XU Qingyang. Constant current charging characteristic analysis of storage capacitor based on BP neural network PID control for permanent magnet vacuum switch[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(10): 212-218.
- [7] 牛里, 杨明, 唐思宇. BP 神经网络 PID 控制的永磁真空开关储能电容恒流充电特性分析基于积分状态预测的 Anti-Windup PID 控制器设计[J]. 电工技术学报, 2014, 29(9): 145-152.
- NIU Li, YANG Ming, TANG Siyu. Design of anti-windup PID controller with integral state prediction [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(9): 145-152.
- [8] TOMAN M, STUMBERGER G, DOLINAR D. Parameter identification of the Jiles-atheton hysteresis model using differential evolution[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(6): 1098-1111.
- [9] ABDEL B. Genetic fuzzy self-tuning PID controllers for antilock braking systems[J]. Engineering Application of Artificial Intelligent, 2010, 23(7): 1041-1025.
- [10] HUNG M, LIN J, YAN J. Optimal PID control design for synchronization of delayed discrete chaotic systems[J]. Chaos Solitons & Fractals, 2008, 35(4): 781-785.
- [11] 文娟, 谭阳红, 雷可君. 基于量子粒子群算法多目标优化的配电网动态重构[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 73-78.
- WEN Juan, TAN Yanghong, LEI Kejun. Multi-objective optimization of distribution network dynamic reconfiguration based on integer coded quantum particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 73-78.
- [12] RAHNAMAYAN S, TIZHOOSH H, SALAMA M. Opposition-based differential evolution[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2008, 12(1): 64-79.
- [13] ELGRAD Olle I. Electric energy systems theory[M]. New York: Mc Graw-Hill, 1982.
- [14] ANAN B, TIRANEE A, BOONCHAROEN S. The best-so-far selection in artificial bee colony algorithm[J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(2): 2888-2901.
- [15] STORN R, PRICE K. Differential evolution — a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces[R]. Berkeley: University of California, 1996.
- [16] 贾立敬, 张建文, 王传林. 基于 DGA 的差分进化支持向量机电力变压器故障诊断[J]. 高压电器, 2015, 51(4): 13-18.
- JIA Lijing, ZHANG Jianwen, WANG Chuanlin. Fault diagnosis of power transformer based on DGA of Algorithm SVM[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(4): 13-18.
- [17] 康忠健, 訾淑伟. 基于差分进化算法的油田区域配电网无功优技术的研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 226-231.
- KANG Zhongjian, ZI Shuwei. Research on the reactive power optimization of oil-field regional distribution network based on differential evolution[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 226-231.
- [18] BABITA M, PANDA G. Development of efficient identification scheme for nonlinear dynamic systems using swarm intelligence technique[J]. Expert System with Applications, 2010, 37(1): 556-566.
- [19] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, Australia, Perth, 1995: 1942-1948.
- [20] 胡卫利, 程亮, 马倩. 基于改进粒子群组合算法的电网基建年度投资预测[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(11): 52-56.
- HU Weili, CHENG Liang, MA Qian. Prediction of annual power grid infrastructure investment based on hybrid algorithm of improved PSO[J]. Power System and Clear Energy, 2014, 30(11): 52-56.
- [21] 陈前宇, 陈维荣, 戴朝华. 基于改进 PSO 算法的电力系统无功优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(2): 8-13.
- CHEN Qianyu, CHEN Weirong, DAI Chaohua. Reactive power optimization based on modified particle swarm optimization algorithm for power system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(2): 8-13.

收稿日期: 2015-02-15; 修回日期: 2015-06-16

作者简介:

王荣杰(1981-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为智能信息处理和电力电子系统故障诊断; E-mail: Roger811207@163.com

詹宜巨(1955-), 男, 博导, 教授, 研究方向为电子信息技术应用;

周海峰(1970-), 男, 博士, 教授, 研究方向为智能信息处理。

(编辑 葛艳娜)