

基于改进PID算法的电压调节器智能控制

电压调节器的工况十分复杂，其具有非线性、突变等变化特点，传统PID控制算法存在超调、控制准确度低等不足，为改善电压调节器的控制性能，提出一种改进PID算法的电压调节器控制算法。将PID的三个参数编码成为一个萤火虫位置相量，通过模拟萤火虫种群的觅食和寻偶行为找到最优PID参数，然后通过PID参数在线调节实现对电压调节器的智能控制，最后采用Matlab 2012软件进行仿真对比实验。实验结果表明，相对于传统PID参数优化算法，改进PID算法可以使电压调节器控制系统的超调量减小，响应时间加快，提高了系统的稳定性能。

王红梅^{1,2}/1.广东科学技术职业学院机电学院 2.南京理工大学自动化学院



王红梅/高级工程师

随着我国电力系统的快速发展，电网的规模越来越大，发电机组单机电压和容量等级得到不断提高，电力系统已步入大电网、大机组和高电压时代，对电力系统的稳定性和品质要求越来越高。电压调节器是发电机中的一种重要元件，其性能好坏与发电机机端电压品质和系统抗干扰能力密切相关，而发电机电压调节器性能的优劣取决于其参数设置，因此对发电机的电压调节器进行优化对于提高输电能力，保证电网稳定运行具有十分重要意义。

针对发电机的电压调节器控制优化问题，在过去十几年，国内外学者和专家进行广泛、深入的研究，取得了一定的研究成果。当前发电机电压调节器普遍采用比例-积分-微分（Proportional Integral Differential, PID）调节方式，PID控制器对发电机的电压调节器控制效果由比例、积分和微分三个参数确定，参数好坏决定了控制器的控制效果。传统PID参数优化采用Ziegler-Nichols

（Z-N）法、爬山法和梯度法等，这些方法对初值敏感，寻优效率低，难以找到全局最优PID参数。随着发电机的工况日益复杂，电力系统具有非线性变化，传统方法难以准确描述其变化趋势，控制准确度低。随着非线性理论的发展，一些学者将神经网络与传统PID进行融合，以提高电压调节器控制准确度，但是神经网络自身存在结构复杂、参数难以确定等不足，影响其应用范围。由于群智能算法具有并行性和全局搜索能力，有学者采用遗传算法、粒子群算法对PID参数进行优化，从而实现电压调节器控制，获得了不错的应用效果。

萤火虫算法是一种模拟萤火虫觅食和寻偶等行为的群智能优化算法，具有简单、鲁棒性强和寻优能力优异等优点，十分适合于对复杂非线性系统的优化和控制。为了提高电压调节器控制准确度，提出一种改进PID算法的电压调节器控制策略，采用萤火虫算法对PID参数进行在线优化，并针对萤火虫算法不足进行改进，仿真实验结果表明，本方法可以改善电压调节器的控制性能。

改进萤火虫算法

1. 标准萤火虫算法

萤火虫算法是模拟自然界中萤火虫的发光行为构造出的随机优化算法，萤火虫彼此吸引，吸引的强度取决于自身的荧光亮度和吸引度，萤火虫的荧光亮度由目标函数决定，对于任何两个萤火虫，较亮的萤火虫会吸引另一个萤火虫往其方向移动。通过亮度和吸引度的不

关键词/Keywords

电压调节·
PID控制器·
萤火虫算法·
参数优化·

断更新,从而实现目标优化。萤火虫的相对荧光亮度为

$$I = I_0 e^{-\gamma r_{ij}} \quad (1)$$

式中, I_0 为萤火虫的最大荧光亮度,即 $r=0$ 处的荧光亮度; γ 为光强吸收系数; r_{ij} 为萤火虫 i 和 j 之间的空间距离。

萤火虫的吸引度为

$$\beta = \beta_0 e^{\gamma r_{ij}} \quad (2)$$

式中, β_0 为最大吸引度,即 $r=0$ 处的吸引度。

萤火虫 i 被吸引向萤火虫 j 移动的位置更新为

$$x_i = x_j + \beta(x_j - x_i) + \alpha(\text{rand} - 1/2) \quad (3)$$

式中, x_i 、 x_j 为萤火虫 i 和 j 所处的空间位置; β 为吸引度; α 为移动步长; rand 为 $[0, 1]$ 之间的随机数。

2. 改进萤火虫算法

在标准萤火虫算法中,所有萤火虫均要互相比较,导致寻优的时间较长,问题求解效率低,易获得局部最优解,为此本文对标准萤火虫算法进行改进。首先引入两个参数 ζ 和 ξ ,定义如下

$$\zeta = \text{mod}[(t-1)/\text{gen}]/\text{gen} \quad (4)$$

$$\xi = (\text{rank}_i)^{-\zeta} \quad (5)$$

式中, t 为当前迭代次数; gen 为最大迭代次数; rank_i 为萤火虫排序的位置; ξ 为萤火虫吸引其他的萤火虫向其靠近的概率。

在每次迭代过程中,改进萤火虫算法对 ζ 和 ξ 值进行更新,当 ξ 的值大于随机数 τ 时,该萤火虫才能吸引其他萤火虫向其靠近。相对于标准萤火虫算法,利用参数 ξ ,萤火虫的移动不仅与吸引度有关,而且与阈值 ξ 相关,这样,萤火虫移动依靠更亮萤火虫的吸引度和迭代次数。

然后,为了加快算法快速收敛和全局寻优能力,将移动步长采用逐次递减方式,具体如下

$$\alpha = \alpha^* \sqrt{\lambda} \quad (6)$$

式中, λ 为 $[0.001 \ 0.01]$ 之间的常数。

为了测试本文对萤火虫算法改进的有效性,选择四个标准测试函数进行仿真实验,四个标准测试函数定义如下。

1) Sphere函数为

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (7)$$

2) Rosebrock函数为

$$f_2(x) = \sum_{i=1}^{n-1} [100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2] \quad (8)$$

3) Rastrigin函数为

$$f_3(x) = \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10] \quad (9)$$

4) Griewank函数为

$$f_4(x) = 1 + \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) \quad (10)$$

如图1所示,相对于标准萤火虫算法,改进萤火虫算法避免陷入局部最优,不仅能获得更高的收敛准确度,并可以加快收敛速度,实验结果证明了本文对标准萤火虫算法改进的有效性,具有一定的优越性。

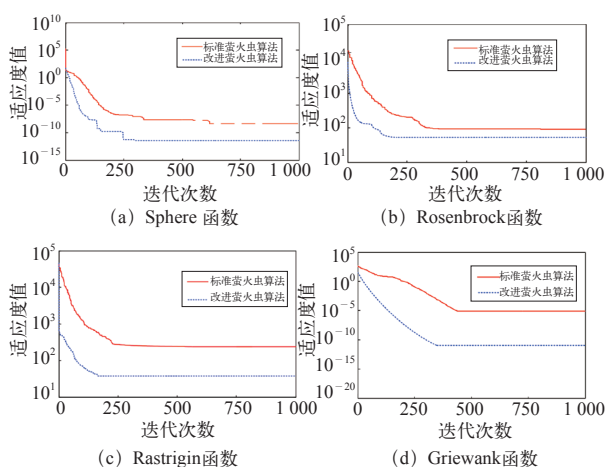


图1 萤火虫算法改进前后的性能对比

改进萤火虫算法优化PID的电压控制器设计

1. 电压调节器的数学模型

电力系统的发电机可用一阶滞后环节来描述其传递函数,具体如下

$$G_G(s) = \frac{K_g}{1 + T_{d0}s} \quad (11)$$

式中, K_g 为发电机的放大系数; T_{d0} 为时间常数; s 为复数变量。

电压测量单元用于检测发电机输出电压,并对励磁功率单元进行控制,其传递函数可表示为

$$G_M(s) = \frac{K_r}{1 + T_r s} \quad (12)$$

式中, K_t 为电压传感器的输入输出比例系数; T_t 为滤波器滤波回路时间常数。

功率单元的主要作用是放大励磁控制信号,也可以看作是一个一阶惯性环节,其传递函数表示为

$$G_A(s) = \frac{K_a}{1+T_a s} \quad (13)$$

式中, K_a 为功率放大单元的电压比例系数; T_a 为放大单元的时间常数。

目前采用PID控制算法对电压控制器进行控制,控制算法可以描述为

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (14)$$

要获得良好的电压控制效果,首先选择最合适的比例、积分和微分值,因此采用改进萤火虫算法对PID控制器三个参数进行优化,提高系统性能。

2. 参数的编码

设种群中的萤火虫个数为 M ,每个萤火虫的位置相量由PID控制器的三个控制参数组成,即萤火虫矢量的维数 $D=3$,该矩阵可以表示为

$$P(M, D) = \begin{pmatrix} K_p^1 & K_i^1 & K_d^1 \\ K_p^2 & K_i^2 & K_d^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ K_p^M & K_i^M & K_d^M \end{pmatrix} \quad (15)$$

3. 适应度函数设计

PID参数优化是使电压调节器的控制误差最小,缩短响应时间,因此采用误差绝对值乘时间积分的性能指标作参数选择的目标函数,则适应度函数取为

$$F(\text{ITAE}) = \int_0^\infty t |e(t)| dt \rightarrow \min \quad (16)$$

采用萤火虫算法是求最大值,故需处理适应度函数,在Simulink建模时,使用此函数的倒数作为目标函数,即实现将求目标函数的最小值转为最大值。

4. 改进萤火虫算法优化PID控制器工作原理

将PID控制器的三个参数编码成一个萤火虫的位置相量,通过模拟自然界中萤火虫的发光行为以及种群的觅食和寻偶行为寻找一组最优参数,其工作原理如图2所示。

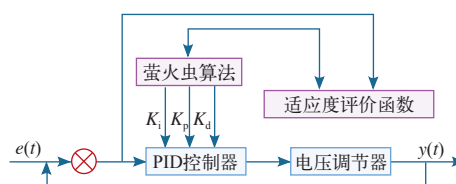


图2 改进萤火虫算法优化PID控制器的原理

5. 改进萤火虫算法优化PID参数步骤

1) 确定种群规模 m 、种群维数 d 、最大进化代数 iter_max 和控制器参数 K_p 、 K_i 、 K_d 取值范围的上、下界。

2) 随机初始化萤火虫位置,每一个萤火虫位置相量由PID控制器的三个控制参数组成。

3) 计算各萤火虫的适应度值作为各自最大荧光强度,并根据其进行排序。

4) 由式(4)和式(5)计算参数 ζ 和 ξ 的值并产生随机数 $\tau \in [0, 1]$ 。

5) 根据式(1)计算萤火虫个体的相对荧光亮度,比较邻域内萤火虫的荧光亮度的大小,同时比较 ξ 和 τ 的大小,确定各萤火虫的位置进化方向。

6) 由式(2)计算萤火虫个体的吸引度,并根据式(3)更新萤火虫的位置。

7) 若算法达到设定的最大进化次数 iter_max ,则输出最优值和最佳位置。否则令 $t = t + 1$,转步骤2)。

仿真实验

1. 仿真条件

为了测试本文方法的有效性和优越性,对如图2所示的电压调节器控制系统进行仿真实验。种群的规模取100,维数为3,最大迭代次数为200,并选择Z-N法进行对比实验,主要对发电机起励和扰动状态进行仿真,系统输入采用简单阶跃输入。

2. 结果与分析

本文算法与对比法的起励响应曲线如图3所示,模拟电压在4 s时产生30%扰动时的机端电压响应曲线如图4所示。从图3和图4可知,在迭代过程中本文算法对发电机单机机端电压起励和扰动的调节时间更短,其快速性明显优于对比算法,获得更加理想的控制效果。

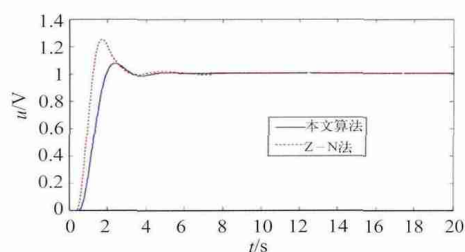


图3 两种算法的零起升压曲线

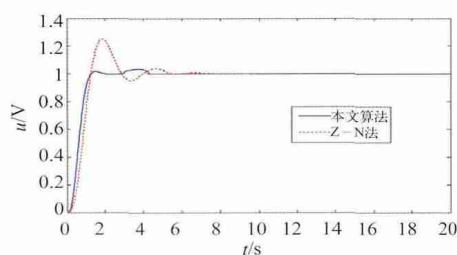


图4 两种算法的负载电压扰动曲线

图5为模型输出波形的对比,可以看出本文算法的拟合准确度比Z-N法更高,这主要是由于本文算法采用改进萤火虫算法优化PID参数,实现电压调节器智能控制,减少了拟合误差。

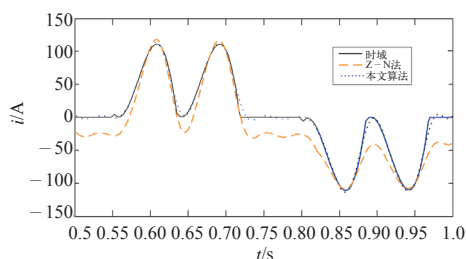


图5 模型输出波形对比

结束语

针对传统PID控制算法存在控制准确度低、超调量大等不足,提出一种改进PID算法的电压调节器智能控制策略。首先针对标准萤火虫算法存在的收敛速度慢、易陷入局部最优的情况,对其进行改进,根据萤火虫的排序高低为每一个萤火虫提供一个随迭代次数增加而降低的阈值参数,通过这个参数,萤火虫的移动同时依靠其吸引度和算法的迭代次数,然后将改进萤火虫算法应用到PID参数整定中,实现电压调节器智能控制,仿真结果表明,本文算法的控制系统具有超调量小,稳态准确度高,调节时间短,改善了电压调节器

控制系统的动态性能,获得了十分理想的控制效果,具有一定的实际应用价值。

参考文献

- [1] 张江滨,梁朝,焦尚彬.改进非线性励磁控制系统的电压调节准确度[J].西安理工大学学报,2004,20(3):263-247.
- [2] 孙启云,宋顺一,陈田.提高发电机励磁系统可靠性的几点改进措施[J].电网技术,2002,26(4):77-80.
- [3] 梁海瑛,张泾周.规则自适应模糊PID数字电压调节器设计[J].计算机工程与设计,2008,29(3):664-666.
- [4] 刘石红.并网基于PID整定的分布式并网电压不平衡调节研究[J].自动化与仪器仪表,2014,176(6):36-38.
- [5] 程林,张剑云,孙元章,等.大型电力系统励磁比例-积分-微分调节器的闭环优化方法[J].电网技术,2007,31(3):49-53.
- [6] 桂香.水轮发电机组PID参数的优化仿真研究[J].计算机仿真,2011,28(10):312-315.
- [7] 王德意,闫伟,杨国清.基于模糊评估的同步发电机混合励磁控制策略研究[J].水力发电学报,2007,26(5):143-148.
- [8] 姚舜才,潘宏侠.粒子群优化同步电机分数阶鲁棒励磁控制器[J].中国电机工程学报,2010,30(21):91-97.
- [9] 王冲,雷秀娟.新的小生境萤火虫划分聚类算法[J].计算机工程,2014,40(5):173-177.
- [10] 曾冰,李明富,张翼.基于改进萤火虫算法的装配序列规划方法[J].计算机集成制造系统,2014,49(11):799-806.
- [11] 周晓华,王荔芳,覃金飞,等.基于改进单神经元PID的SVC电压调节器[J].电测与仪表,2011,48(9):73-77.
- [12] 戴远海,彭建春,董凯.基于模糊-PI控制的SVC电压控制器的设计与实现[J].测控技术,2009,28(9):45-48.

(收稿日期:2014-10-20) EA