

孤岛微电网中二阶滤波器与 PID 控制器 一体化参数整定方法

史毅, 沈奥龙, 张正江, 胡文, 章纯, 洪智慧, 闫正兵

(温州大学 电气数字化设计技术国家地方联合工程研究中心, 浙江 温州 325035)

摘要: 在孤岛微电网系统中, 为降低测量噪声影响从而引入二阶滤波器; 然而二阶滤波器的引入, 通常使原系统 PID 控制器的最优参数发生改变, 从而导致控制系统性能指标下降; 为解决此问题, 提出了一种一体化参数整定方法; 该方法利用混合粒子群算法, 以不同参数下, 系统性能指标在 Topsis 综合评价法中的高分作为寻优目标, 一体化整定 PID 控制器与二阶滤波器的参数, 保证滤波器的引入不会对系统性能指标造成较大改变, 从而提升控制器性能; 通过孤岛微电网系统仿真实验, 验证了该方法的可行性与有效性。

关键词: 孤岛微电网; 二阶滤波器; 混合粒子群优化算法; Topsis 评价法; 一体化整定

Integrated Parameter Setting Method for Second Order Filter and PID Controller in Isolated Island Microgrid

SHI Yi, SHEN Aolong, ZHANG Zhengjiang, HU Wen, ZHANG Chun,
HONG Zhihui, YAN Zhengbing

(National-local Joint Engineering Research Center of Electrical Digital Design Technology,
Wenzhou University, Wenzhou 325035, China)

Abstract: In isolated island microgrid system, a second-order filter is introduced to reduce the impact of measurement noise. However, the introduction of second-order filter usually changes the optimal parameters of original PID controller, which leads to the performance index of control system to decline. To solve this problem, an integrated parameter setting method is proposed. In this method, the hybrid particle swarm optimization algorithm is used to optimize the high score of system performance index in Topsis comprehensive evaluation method under different parameters, and the parameters of integrated setting PID controller and second-order filter are integrated to ensure that the introduction of filter will not cause great changes to the system performance index, so as to improve the controller performance. The feasibility and effectiveness of the proposed method are verified by the simulation experiment of the isolated island microgrid system.

Keywords: isolated island microgrid; second-order filter; hybrid particle swarm optimization algorithm; Topsis evaluation method; integrated setting

0 引言

微电网是指由分布式电源、储能装置、负荷保护与监控装置所组成的系统。其既可以接外电网运行, 也可以孤立运行; 既能满足对偏远地区的电力供应, 也能满足偏远地区用户的基本用电需求。与一般的配电网相比, 微电网分布位置更加灵活, 可靠性也更高。由于其可以提供清洁、经济的能源, 具有较为积极的意义。因此, 近年来受到越来越多电力行业专家的关注。在其孤岛运行模式下, 由于微电网的多个分布式供给能源存在不确定性, 从而导

致微电网频率不稳定, 因此需要设计一个合适的频率控制器来提高微电网的频率稳定性。文献 [1] 中提出了一种基于 MPC (model predictive control) 的微电网频率协调控制策略来控制微电网频率的方法。文献 [2] 中介绍了利用 Q 学习算法进行微电网频率调节的控制方法。文献 [3] 中阐述了一种基于 H_{∞} 混合灵敏度的交直流混合微网频率控制方法。这些方法对微电网的频率控制起到了一定的积极作用, 但是以上研究都没有考虑测量噪声对微电网的影响。实际上, 从传感器反馈的信号往往含有测量噪声, 而测量

收稿日期: 2022-08-05; 修回日期: 2022-09-07。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61703309); 浙江省自然科学基金(LY18F030014)。

作者简介: 史毅(2001-), 男, 浙江宁波人, 硕士研究生, 主要从事微电网控制技术方向的研究。

张正江(1982-), 男, 江西乐平人, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事数据校正与参数估计、系统建模与控制等方向的研究。

引用格式: 史毅, 沈奥龙, 张正江, 等. 孤岛微电网中二阶滤波器与 PID 控制器一体化参数整定方法[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(3): 180-186, 200.

噪声又会对整个控制系统的性能产生影响。因此,对于微电网系统的性能分析,需要考虑测量噪声的引入。对此,文献[4]提出在反馈回路引入二阶滤波器的方法,来降低测量噪声的影响。然而,滤波器的引入势必会造成控制器在原系统中最优的参数不适用于现在的系统,对控制系统的性能造成一定的影响。为解决以上问题设计了基于混合粒子群算法的二阶滤波器与PID控制器一体化参数整定的方法。以不同参数下,系统性能指标在Topsis综合评价法中的高分作为寻优目标。保证系统在滤波器的引入同时,其综合性能良好。

1 混合粒子群优化算法

1.1 标准粒子群算法

粒子群算法来源于对鸟类群体行为进行建模与仿真的研究结果的启发^[5],其适用范围广泛,可用于不可导、非线性乃至多目标目标求解,相较于传统优化法,其鲁棒性和收敛性较好^[6-9]。

假设在一个 N 维的搜索空间中,存在 N 个粒子。其中第 i 个粒子可以用一个 N 维向量表示:

$$X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}) \quad (1)$$

其移动速度 V_i 也可以用一个 N 维向量表示:

$$V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in}) \quad (2)$$

第 i 个粒子当下所搜索到的最佳位置,称为个体极值,记作:

$$P_{best} = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in}) \quad (3)$$

整个粒子群当下所搜索到的最佳位置,称为全局极值,记作:

$$g_{best} = (g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{in}) \quad (4)$$

粒子通过 P_{best} 与 g_{best} 之间的差值来对自己速度进行更新,如式(5)所示:

$$V_i(t) = \omega * V_i(t-1) + c_1 * r_1 * (P_{best}(t) - X_i(t)) + c_2 * r_2 * (g_{best}(t) - X_i(t)) \quad (5)$$

其中: ω 表示自身速度的惯性因子,代表粒子自身有着维持原来运动速度的“习惯”; c_1 表示个体学习因子,反映了粒子有着逼近自身个体极值的趋势;同时, c_2 表示社会认知因子,代表着粒子也会向全局极值。 r_1, r_2 则表示 $[0, 1]$ 之间的随机数。 t 表示整个迭代过程所进行到的次数。

粒子自身位置与速度之间的关系如式(6)所示:

$$X_i(t) = X_i(t-1) + V_i(t-1) * 1 \quad (6)$$

1.2 混合粒子群算法

标准粒子群算法有较快的收敛速度,但是在全局搜索的过程中,极容易出现陷入局部极值的情况^[10-11]。在全局多极值的情况下,更为如此。为此,本文对标准粒子群算法进行了改进,并将其与模拟退火、遗传算法结合,从而提高其寻优的精度。

1.2.1 增加对粒子速度的限制

粒子在全局搜索最优值过程的后期,如果自身速度过快,由式(6)可知,粒子将有可能脱离最优解存在的区域。但若自身速度过慢,粒子收敛到全局最优值的时间就

会变长。为解决此问题,本文采用动态限制的方式,随着粒子搜索进程的发展,将线性降低粒子搜索的最大与最小速度。该方法可以在前期保证粒子在全局大范围快速寻优,避免陷入局部极值;在后期,又可以粒子在某个最优值存在的局部进行精细搜索。

$$V_{max}(t) = (1 - \frac{t}{T}) * V_{max}(0) \quad (7)$$

$$V_{min}(t) = (1 - \frac{t}{T}) * V_{min}(0) \quad (8)$$

式中, $V_{max}(0), V_{min}(0)$ 表示粒子群的初始速度上限与下限。

1.2.2 惯性因子、学习因子的改进

在标准粒子群算法中,粒子的惯性因子 ω 为常数,不会随着迭代次数的增加而改变。而惯性因子决定了粒子继承自身上一步速度的大小。如果惯性因子 ω 过大,将不利于粒子进行局部的精细寻优;过小,则难以对全局进行充分搜索。目前针对惯性因子的调整策略有线性调整策略、非线性调整策略以及随机调整策略。

本文对于惯性因子的改进采用随机策略。 $\omega(t)$ 的表达式如式(9)所示。该调整策略可以维持粒子群的多样性,对避免算法陷入局部最优有一定的作用。

$$\omega(t) = 0.5 + \frac{rand}{2} \quad (9)$$

式中, $rand$ 是一个随机分布于 $[0, 1]$ 的常数。

标准粒子群算法将个体学习因子 c_1 、社会学习因子 c_2 设置为常数。这使得其在局部极值较多,且维数较高的函数中,难以得到令人满意的寻优结果。文献[12]提出了使 c_1 值随着搜索次数的增加慢慢减小,而 c_2 值则逐渐增加的学习因子改进策略。以此来保证粒子在搜索最优值的初期具备较强的全局搜索能力,而在后期又可以精细地局部搜索。而本文采用式(10)、(11)的 c_1, c_2 均随时间线性减少的策略,对 c_1, c_2 进行动态调节。

$$c_1(t) = (c_{1max} - c_{1min}) * \frac{(T-t)}{T} + c_{1min} \quad (10)$$

$$c_2(t) = (c_{2max} - c_{2min}) * \frac{(T-t)}{T} + c_{2min} \quad (11)$$

式中, c_{1max}, c_{1min} 与 c_{2max}, c_{2min} 为算法开始时所设置的两种学习因子的最大与最小值。

1.2.3 与模拟退火(SA)、遗传算法(GA)结合

模拟退火算法(SA)是受固体退火过程的启发而产生的一种优化算法^[13-14]。与传统的优化算法相比,其突出特点是在寻优的过程中,采用Metropolis准则,以一定的概率 P 接收搜索的得到的次优解,从而有能力实现突跳,降低陷入局部极值的概率。

本文对概率 P 的设定如式(12)所示:

$$P = \begin{cases} 1, & f(B) > f(A) \\ e^{-\frac{f(A)-f(B)}{T_0}}, & f(B) < f(A) \end{cases} \quad (12)$$

式中, A 为粒子群寻优过程中最优适应度下的一组参数; B 则为粒子群寻优过程中,非最优适应度下的一组参数; f 为目标函数表达式。 T_0 是一个常数,影响接收次优解的概率,

一般取 0.95。

遗传算法 (GA) 作为一种经典算法, 其通过交叉、变异算子, 对全局最优解有着较好的搜索能力, 可以弥补标准粒子群算法搜索能力弱的缺陷^[15-16]。本文对单次迭代结束后, 适应度值较低的 30% 粒子采用与全局最优粒子进行交叉以及自身随机变异的策略, 丰富粒子群体的多样性, 降低粒子群陷入局部最优解的概率, 使得粒子群最终可以收敛到全局最优解^[11]。

1.2.4 混合粒子群优化算法寻优步骤

本文所提出的改进粒子群算法的步骤如下:

1) 初始化粒子群, 设置算法中各个参数。

2) 按照所设置的适应度函数, 计算各个粒子的适应度, 并按照适应度, 从优到劣, 对粒子进行降序排序。将排序第一位的粒子适应度设定为全局最优适应度 $fzbest$, 将其所对应的参数设定为全局最优参数 $zbest$ 。

3) 同时, 按照粒子适应度大小, 将种群分为 3 类: I 类粒子, II 类粒子, III 类粒子。I 类粒子占比 40%, 其不结合模拟退火与遗传算法, 仅仅改变粒子群算法的惯性因子与学习因子, 完成对粒子速度与位置的更新, 保证算法整体的收敛速度; II 类粒子占比 30%。其在 I 类粒子的基础上融合模拟退火算法, 以一定的概率 P 接收在寻优过程中得到的次优解; III 类粒子将粒子群算法与遗传算法混合, 对粒子进行交叉与变异操作, 来完成对其速度与位置的更新。

4) 同时, 每类粒子在寻优过程中都会实时将自己当前的适应度 $fzbest$ 与自己所处类别的群体最优适应度 $fzbest_q$ 进行对比。若优于原群体最优适应度, 则将其替换, 并将群体最优参数修改为自己当下所搜索到的参数值。对于 II 类粒子, 若搜索到的解不优于原群体最优适应度其还将以一定的概率进行替换。

5) 当 I、II 类粒子寻优结束后, 两类粒子之间进行一次信息交互。将彼此之间的群体最优适应度与原全局最优适应度进行比较, 若优于原全局最优适应度, 则将其替换。

6) 对第 III 类粒子寻优时, 采用 Emperor 策略, 将此时的全局最优粒子作为父代, 与其他粒子交叉。同时, 增加小概率的变异, 更新 III 类粒子的速度、位置, 计算其适应度, 与群体最优适应度 $fzbest_q$ 比较。

7) 三类粒子寻优结束后, 将所有粒子再次按照适应度进行排序, 选出适应度最优的粒子, 作为将其适应度设置为全局最优适应度 $fzbest$, 将其参数设置为全局最优参数

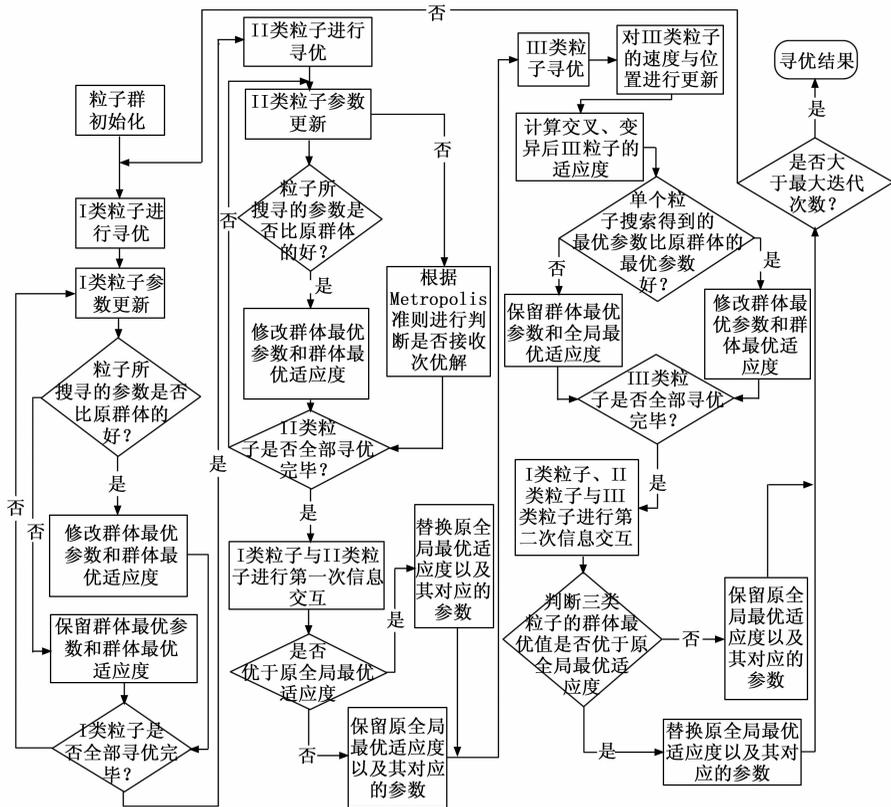


图 1 混合粒子群优化算法流程图

$zbest$ 。

判断是否到达最大迭代次数, 若没有, 则返回步骤 2) 继续下一次迭代。

以式 (13) 作为基准测试函数 (设置粒子群的粒子维数 n 为 20; x_i 的范围为 $[-5.12, 5.12]$), 进行标准粒子群算法、改进粒子群算法 (改进粒子群算法表示仅改进惯性因子与学习因子的粒子群算法) 以及混合粒子群算法寻优效果的测试实验。该测试函数的全局最优值为 0, 但局部极值点较多, 可以有效体现算法摆脱局部极值的能力。实验中, 粒子个数均为 1 000, 最大迭代次数为 1 000。

$$f = \sum_{i=1}^n x_i^2 - 10 * \cos(2 * \pi * x_i) + 10 \quad (13)$$

分析图 2 可知改进粒子群算法, 改进粒子群算法与混合粒子群算法的寻优效果均要优于标准粒子群算法, 并且改标准粒子群算法与改进粒子群算法均存在难以摆脱陷入局部极值的问题, 寻优精度与混合粒子群算法相比不高。这说明混合粒子群算法有着较好的全局搜索能力, 适用于局部极值较多的复杂目标函数。

PSO 代表标准粒子群算法, AD-PSO 算法代表改进粒子群算法, SA-GA-PSO 算法表示混合粒子群算法。

2 基于 PID 控制器孤岛微电网系统

基于 PID 控制器的孤岛微电网系统如图 3 所示。该孤岛微电网由分布式风力涡轮发电机 (WTG)、柴油发电机 (DEG)、储能装置 (ESS) 和负荷构成, 各部分通过相应的

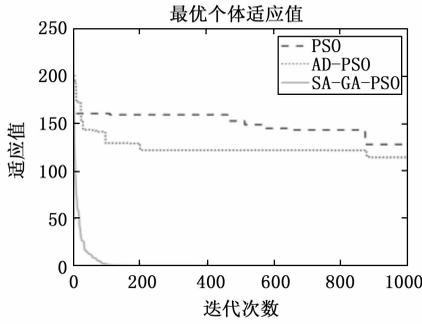


图 2 使用基准测试函数 f , 3 种优化算法的寻优结果比较

变换器并入直流母线。表 1 中记录了该孤岛微电网系统不同子系统的传递函数表达式及其相应参数。

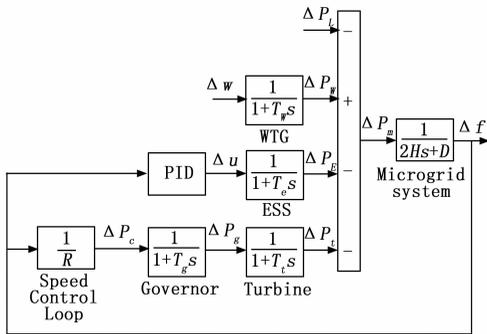


图 3 基于 PID 控制器的微电网系统

表 1 各子系统的传递函数及其相关参数

子系统	传递函数	参数
WTG	$\frac{1}{1 + T_{ws}}$	$T_w = 1.5 \text{ s}$
Speed Control Loop	$\frac{1}{R}$	$R = 3 \text{ Hz/pu}$
Turbine	$\frac{1}{1 + T_t s}$	$T_g = 0.08 \text{ s}$
Governor	$\frac{1}{1 + T_g s}$	$T_t = 0.4 \text{ s}$
ESS	$\frac{1}{1 + T_e s}$	$T_e = 0.1 \text{ s}$

2.1 电网频率控制的意义

在并网模式下, 微电网的频率主要由主电网所决定; 但在孤岛模式下, 微电网的频率控制具有一定难度。由于微电网内发电机组的容量较小, 它们的惯性也就较小^[17-19]。这时对于孤岛微电网来说如果其输入的能量是具有一定的波动性, 例如: 风能。由于风速具有间歇性, 当风力不稳定时, 风力发电机的发电功率就会产生波动, 导致电网产生频率偏差。如果发电设备所发出的电能多于系统负荷所需要的电能时, 电力系统的频率将会升高; 而当发电设备所发出的电能小于系统负荷所需要的电能时, 电力系统的频率将会降低。因此为了使系统处于稳定并保持良好的性

能, 通常会在系统中加入储能设备 (ESS)。

同时, 为了提高微电网系统频率控制的鲁棒性, 工业上往往会在微电网系统中加入 PID 控制器。

2.2 PID 控制

目前 PID 控制广泛应用于工业控制中, 其控制方法成熟, 易让人理解和掌握, 适用于不需要建立算法模型, 其控制结果好, 安全性高, 稳定性好^[20-21]。

PID 控制通过对偏差 $e(t)$ 进行比例、积分和微分变换, 实现对输出 $u(t)$ 的控制。比例、积分、微分调节 3 个环节彼此影响、相互制约。而将 K_p, K_i, K_d 调节到一组合适的值, 对系统控制则显得尤为重要。

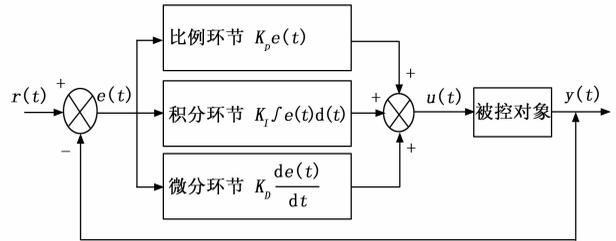


图 4 PID 控制器传递函数图

2.2.1 比例调节规律

作为最基本的控制规律, 比例调节常见于工业 PID 控制系统中, 且比例调节常可单独使用。比例调节一般指 PID 控制器的输出与其输入偏差信号 $e(t)$ 呈比例放大或缩小的关系。比例系数 K_p 越大, 比例调节的速度也就越快。但过大的比例系数 K_p , 容易造成超调, 甚至导致系统不稳定。

2.2.2 积分调节规律

积分调节用于消除静态误差, 增大系统的无差度, 通过对误差积分可以得到一段时间内误差的大小, 从而对输入量进行调整, 只要偏差存在, 积分调节便会一直起作用。积分项系数 K_i 越小, 调节速率越慢, 反之越快, 但是容易引起输出超调甚至震荡。

2.2.3 微分调节规律

微分调节可对误差的趋势进行预测, 提前对输出量做出预判性调整, 有利于减小超调, 克服震荡, 提高系统响应速率。但是容易产生高频噪声。

3 基于 Topsis 评价法的参数整定策略

Topsis 评价法 (逼近理想排序法)^[22-24] 是系统工程中一种多目标决策方法, 作为一种综合指标评价方法, 区别于如模糊综合评价法, 层次分析法。它的客观性比较强, 不需要目标函数, 即限制要求大大降低, 使得其适用范围较为广泛, 可有效找出有限方案中的最优方案。本文利用 Topsis 评价法, 计算不同 PID 控制器参数下的系统得分, 从而筛选出最优的控制器参数组合。

用 Topsis 评价法对进行系统综合评价的具体流程如下:

- 1) 判断指标类型: 某个指标数值越小越好, 则为极小型指标; 反之, 为极大型指标; 若某个指标数值上越接近

某个值越好, 则该值称为最佳数值, 该指标为中间型指标。如果某个指标数值落在一个区间内最好, 则其为区间型指标。

2) 将不同的指标数据分别进行正向化处理:

如果 $\{x_i\}$ 为一组中间型指标的序列, x_{best} 为最佳数值, 则:

$$\tilde{x}_i = 1 - \frac{|x_i - x_{best}|}{M}, M = \max\{|x_i - x_{best}|\} \quad (14)$$

式中, \tilde{x}_i 为正向化后的序列元素。

如果 $\{x_i\}$ 为一组极小型指标序列,

$$\tilde{x}_i = \max\{x_i\} - x_i \quad (15)$$

3) 正向化矩阵标准化:

假设由 n 个评价对象, m 个评价指标构成的正向化矩阵 \mathbf{X} 如下所示:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix}$$

记标准化矩阵为 \mathbf{Z} , 矩阵 \mathbf{X} 与 \mathbf{Z} 中元素的关系如下:

$$z_{ij} = x_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2} \quad (16)$$

4) 计算得分并归一化:

将得分归一化的目的是为了消除不同评价指标量纲上的差异。归一化后的矩阵如下所示:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1m} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \cdots & z_{nm} \end{bmatrix}$$

记由标准化矩阵 \mathbf{Z} 第 j 列中最大值构成的列向量为 Z_j^+ , 第 j 列中最小值构成的列向量为 Z_j^- 。第 i 个评价对象未归一化得分 S_i 为:

$$S_i = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^m (Z_j^+ - z_{ij})^2}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (Z_j^+ - z_{ij})^2} + \sqrt{\sum_{j=1}^m (Z_j^- + z_{ij})^2}} \quad (17)$$

归一化后的得分 \tilde{S}_i 为:

$$\tilde{S}_i = \frac{S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (18)$$

5) 计算总得分, 筛选出最优对象:

将单个评价对象在各个评价指标下的相对得分相加。某个评价对象对的总得分越高, 其在所有评价对象中的综合性能越好。总得分最高者则为最优对象。

对孤岛微电网系统而言, 其频率偏差信号 Δf 的均值 E 越小, 则越接近理想的频率控制情况。但若频率偏差信号 Δf 的均值 E 较小, 而其方差 σ^2 较大, 则表明微电网系统受扰动的影响大, 鲁棒性不强。因此, 对所整定的 PID 控制器参数进行评价时, 应当同时考虑频率偏差信号 Δf 的均值

E 与方差 σ^2 。

为了更好地评价 PID 控制器的控制效果, 本文引入总变差 TV 作为第三个评价指标。

$$TV = \sum_{k=0}^{N-1} |u(k+1) - u(k)| \quad (19)$$

TV 可用来衡量信号的平滑性, 值越小, 控制量的平滑性越好。^[21]

在 MATLAB 仿真中, 由于采用变步长算法, 在不同的 PID 控制器参数下, 频率偏差信号 Δf 的采样值个数会不同。因此, 对总变差 TV 指标进行修改, 以总变差平均值 TV_{arg} 作为第三个评价指标。

$$TV_{arg} = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} |u(k+1) - u(k)|}{N} \quad (20)$$

对于输出信号 Δf , 若其均值 E 、总变差平均值 TV_{arg} 数值上有正有负。但若其在 0 的左右, 且越靠近 0, 则控制器性能越好, 说明均值 E 、总变差平均值 TV_{arg} 是中间性指标; 而方差 σ^2 大于 0, 且值越接近于 0, 控制器的鲁棒性越强, 表明其为极小性指标。

对图 3 所搭建的孤岛微电网系统, 以 Topsis 评价得分作为目标函数, 用混合粒子群算法进行 PID 参数整定的具体流程如下:

1) 先通过计算机仿真得到 60 组不同 K_p 、 K_i 、 K_d 参数下系统频率偏差信号 Δf 的均值 E 、方差 σ^2 以及总变差平均值 TV_{arg} , 作为参考组。

2) 设置仿真模型的运行时间以及混合粒子群算法的相关参数。在每次迭代过程中, 将每个粒子所对应的 PID 控制器参数 K_p 、 K_i 、 K_d 代入 Simulink 所搭建的微电网模型进行仿真实验。仿真结束后, 将各个粒子所对应的频率偏差信号 Δf 的采样值返回到 MATLAB 工作区。

3) 计算各个粒子所对应的频率偏差信号 Δf 的均值 E 、方差 σ^2 以及总变差平均值 TV_{arg} 。

将各个粒子所对应的 3 个指标值与之前由计算机模拟得到的 60 组指标值一同代入 Topsis 评价算法。以每个粒子的相对得分作为粒子的适应度, 根据第一节中所提到的混合粒子群算法寻优步骤进行寻优。

4) 当运行次数达到最大迭代次数之后, 将混合粒子群算法搜寻到的最优参数输出。

4 PID 控制器与二阶滤波器参数的一体优化

4.1 不考虑测量噪声的 PID 参数整定

在实际生产生活中, 因为传感器自身的结构问题以及外界环境的影响, 传感器在工作时会受到测量噪声的影响。而传感器反馈的信号则是真实的测量信号叠加上测量噪声信号。这可能会导致控制器性能降低, 从而对整个系统会产生不良的影响。

在图 3 的孤岛微电网系统中, 系统的频率偏差信号 Δf 通过传感器测量反馈到输入端。测量噪声会不可避免地引入到反馈回路中, 其会产生对控制器性能的不良影响。

但其一般属于高频信号。本节将测量噪声考虑在内(系统框图如图 5 所示), 分别对有、无测量噪声下的微电网 PID 控制器参数进行整定。

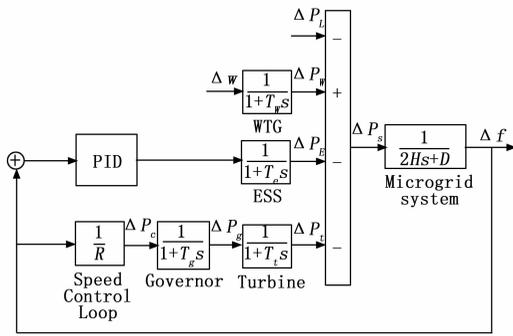


图 5 不考虑测量噪声, 加 PID 控制器的微电网系统

设定算法参数: 粒子群中粒子个数设置为 150 个, 单次实验最大迭代次数为 100 次; c_{1max} 、 c_{2max} 、 c_{1min} 、 c_{2min} 分别为 2.5、2.5、1.5、1.5; 初始速度上限 $V_{max}(0)$ 为 5, 初始速度下限 $V_{min}(0)$ 为 0.01; 粒子群的搜索上界为 [100, 400, 1.5], 搜索下界为 [1, 50, 0.01]。Simulink 中搭建的微电网系统的仿真时间设置为 25 s。

在未考虑测量噪声的情况下, 在 $\Delta\omega$ 处加入随机动力波动, 模拟分布式电源的不稳定性给发电机带来影响, 在 ΔP_l 处加入阶跃输入, 模拟用电负荷稳定的情况。结合微电网系统中具体参数, 用第 4 节中阐述的 PID 控制器参数整定方法对 PID 控制器进行参数整定。为降低实验的偶然性, 本文进行了 20 次的重复实验。寻优效果如图 6 所示。

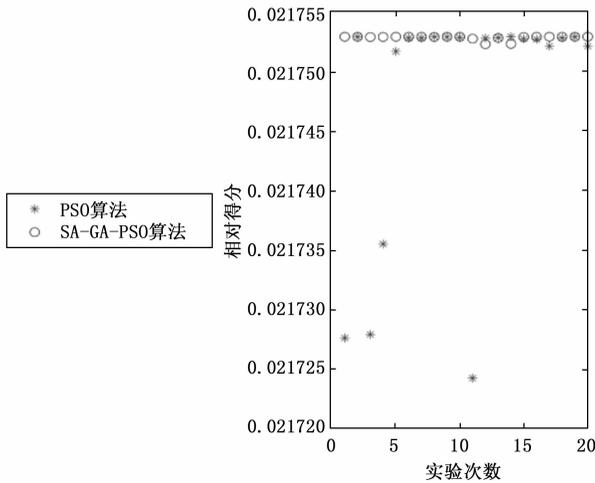


图 6 无测量噪声时, 标准粒子群算法与混合粒子群算法 20 次重复试验的寻优结果

表 2 无测量噪声时, 标准粒子群算法与混合粒子群算法寻优结果的平均值与方差

最优参数下的评价指标	标准粒子群算法	混合粒子群算法
相对得分的平均值	0.021 748	0.021 752
相对得分的方差	9.665×10^{-6}	1.866×10^{-7}

从图 6、表 2 可知, 在 20 次重复实验中, 混合粒子群算法寻优得到的结果普遍优于标准粒子群算法, 搜索精度较高, 且寻优效果稳定。(相对得分的方差体现, 方差越小, 越稳定)说明混合粒子群算法相较于标准粒子群算法, 可以更好地整定微电网系统 PID 控制器的参数。

表 3 无测量噪声时, 混合粒子群算法寻得的最优 PID 控制器的参数值

PID 控制器参数	混合粒子群算法
K_p	100
K_i	55.11
K_d	1.5

4.2 考虑测量噪声

将 PID 控制器参数值设置为表 4 中所示, 在图 7 所示反馈回路中, 增加方差不同的白噪声信号, 与未加噪声信号时的输出信号进行对比。

表 4 保持原 PID 控制器的参数值不变, 在不同噪声情况下的输出信号 Δf

噪声信号的方差	输出信号 Δf 的评价指标		
	均值	方差	总变差平均值
0	-2.33×10^{-4}	0.001 1	-0.059 1
0.01	-5.93×10^{-4}	0.116 4	-3.393 8
0.03	-9.36×10^{-4}	0.201 3	-5.879 2
0.05	-1.11×10^{-3}	0.246 7	-7.302 1
0.07	-1.32×10^{-3}	0.307 5	-8.691 2
0.09	-1.44×10^{-3}	0.330 8	-9.786 4

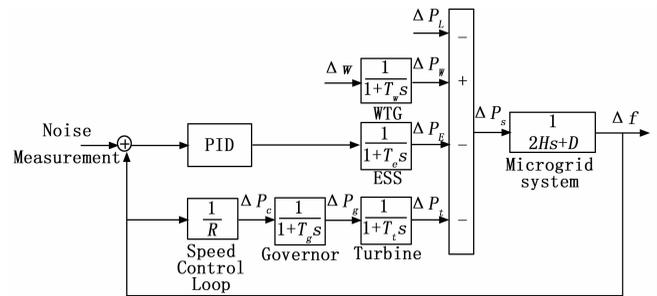


图 7 考虑测量噪声, 加 PID 控制器的微电网系统

分析表 5、图 8 可知, 频率偏差均值脱离 0 的幅度与引入的测量噪声的方差大小成正相关。同时, 测量噪声的引入增加了频率偏差的波动(用方差、总变差平均值表示, 二者的值越大, 说明控制系统输出的波动性大), 并且波动随着测量噪声的方差变大而逐渐增大。说明测量噪声的引入对控制系统的性能指标影响较大。

表 5 测量噪声方差为 0.05 和 0.09 时, PID 控制器与二阶滤波器的参数整定值

测量噪声方差	K_p	K_i	K_d	T	ξ
0.05	5	50	0.871 3	0.000 1	0.430 1
0.09	5	50	0.957 3	0.000 1	0.176 3

采用滤波器可以有效降低噪声信号的干扰。但是, 滤

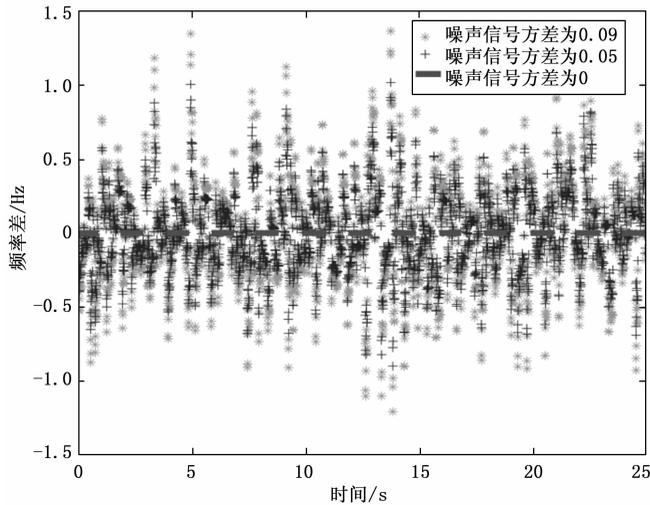


图 8 噪声方差为 0、0.05 和 0.09 时，输出信号 Δf 的波形图

滤波器的使用会给系统带来延迟效果，使控制系统的相位裕度减小，从而影响系统的稳定性。因此最优方案是选择一个对系统稳定性影响不大，并且能较为有效地降低噪声干扰的滤波器。由于二阶滤波器削弱噪声效果较好，而且对系统的相位裕度影响较小，因此本文选择使用二阶滤波器与 PID 控制器在反馈回路相结合的方式降低测量噪声对微电网系统性能指标的影响。所选用的二阶滤波器的传递函数如下：

$$G(s) = \frac{1}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1} \quad (21)$$

加入滤波器的系统框图如图 9 所示。

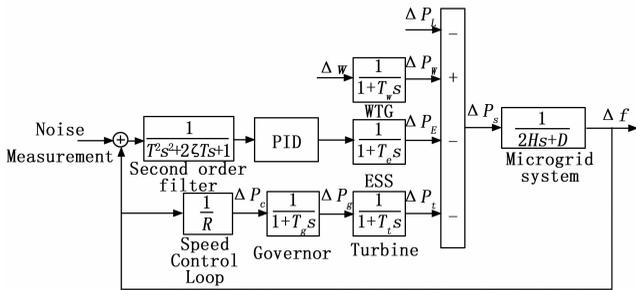


图 9 加入滤波器、PID 控制器的微电网系统

4.3 PID 控制器与二阶滤波器参数的一体化整定

此时参数寻优的具体流程也与 5.1 中整定 PID 控制器参数相仿。不同之处在于，此时待整定的参数多了二阶滤波器的时间常数 T 与其阻尼比 ξ 。同时将粒子群寻优的上界改为 $[100, 400, 10, 0.000\ 1, 1]$ ，下界改为 $[5, 50, 0.01, 0.000\ 01, 0]$ 。

对于测量噪声，本文选取了测量噪声方差为 0.05 与 0.09 这两种情况，对比了孤岛微电网系统中有无二阶滤波器时的频率偏差的输出波形，并计算了频率偏差的均值、方差与总变差平均值。首先得到的是有无二阶滤波器时的孤岛微电网系统的频率偏差输出波形，如图 10、11 所示。

对比表 6~7，可以看出当加入二阶滤波器之后，孤岛

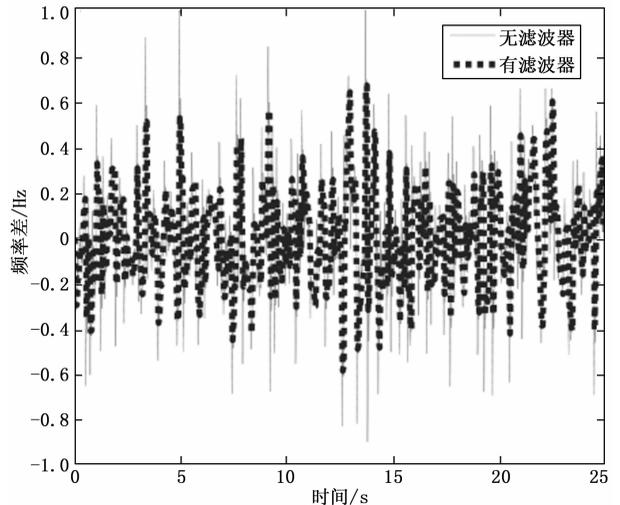


图 10 测量噪声的方差为 0.05 时，有无二阶滤波器的频率偏差波形

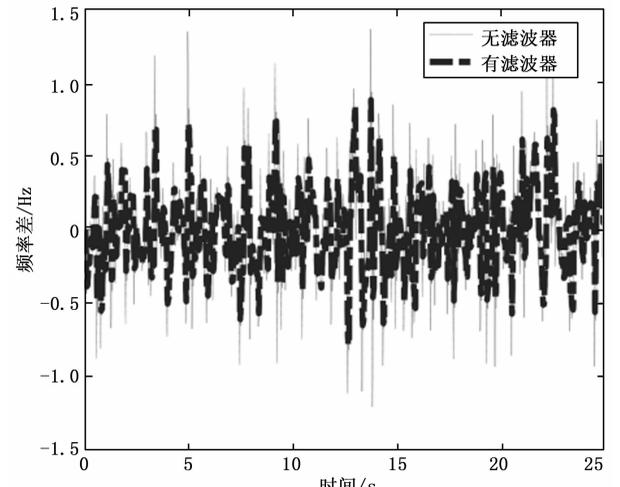


图 11 测量噪声的方差为 0.09 时，有无二阶滤波器的频率偏差波形

微电网的频率偏差值的波动性明显减小（反应在其方差值、总变差平均值的减小上），同时其均值也更加趋近于 0。验证了当频率偏差反馈回路有测量噪声存在时，加入二阶滤波器可以有效抑制测量噪声的影响从而提升孤岛微电网频率控制性能。

表 6 考虑测量噪声，无二阶滤波器的频率偏差的均值、方差与总变差平均值

测量噪声方差	均值	方差	总变差平均值
0.05	-1.11×10^{-3}	0.246 7	-7.302 1
0.09	-1.44×10^{-3}	0.330 8	-9.786 4

表 7 考虑测量噪声，有二阶滤波器的频率偏差的均值、方差与总变差平均值

测量噪声方差	均值	方差	总变差平均值
0.05	-1.15×10^{-4}	0.213 8	2.690 4
0.09	-1.31×10^{-4}	0.286 2	3.683 5

(下转第 200 页)