

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.03.018

基于改进帝国竞争算法的微型燃气轮机容错控制

孟中祥, 肖玲斐, 马磊明, 李传鹏

(南京航空航天大学能源与动力学院, 南京, 210016)

摘要: 针对微型燃气轮机执行机构故障, 提出了一种基于改进帝国竞争算法的自适应容错控制方法, 实现了对故障的有效抑制。本文建立了微型燃气轮机发电系统部件级一体化模型, 实现了部件级模型与发电系统的联合仿真, 提出了一种自适应改革概率的方法对帝国竞争算法进行改进。设计了基于改进帝国竞争算法的自适应模糊逻辑保护控制器。最后进行了改进算法性能测试以及微型燃气轮机发电系统在孤岛模式下的仿真实验。结果表明: 本文所提出的改进方法可以提高帝国竞争算法的寻优性能, 设计的容错器可以明显改善故障发生时的动态性能, 确保发电系统的稳定工作。

关键词: 微型燃气轮机; 容错控制; 改进帝国竞争算法; 模糊控制

中图分类号: TK14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2020)03-0485-08

Fault Tolerant Control of Micro Gas Turbine Based on Improved Imperial Competition Algorithm

MENG Zhongxiang, XIAO Lingfei, MA Leiming, LI Chuanpeng

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: An adaptive fault-tolerant control method based on improved imperial competition algorithm is proposed to suppress the faults of micro gas turbine actuators. A component-level integrated model of micro-gas turbine power generation system is established and a method of adaptive reform probability is proposed to improve imperial competition algorithm. Then, an adaptive fuzzy logic protection controller based on improved imperial competition algorithm is designed. Finally, the improved algorithm test and the simulation experiment of micro gas turbine power generation system is carried out. The results show that the fault-tolerant control method proposed in this paper can significantly improve the dynamic performance when the fault occurs and ensure the stable operation of the power generation system.

Key words: micro gas turbine; fault tolerant control; improved imperial competition algorithm; fuzzy control

近年来,以风力发电、光伏电池和微型燃气轮机(Microturbine)等为代表的分布式发电(Distributed generation, DG)技术成为当前研究的热点^[1]。微型燃气轮机发电系统由微型燃气轮机、永磁发电机、整流器、逆变器和负荷组成,由微型燃气轮机带动永磁同步发电机发电,经过整流器和逆变器

“AC-DC-AC”变换为工频交流电^[2]。发电用微型燃气轮机为单转子结构,通常在极高的转速下进行工作,而且带有回热循环,燃烧室出口气流在回热器中预热压气机进口气流,其排气余热仍可通过制热或制冷装置进行回收。

在微型燃气轮机的控制方面,国内外学者提出

基金项目: 国家自然科学基金(51876089)资助项目;工业控制技术国家重点实验室开放基金(1800374)资助项目;南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(kfj20190205)资助项目。

收稿日期: 2019-04-10; **修订日期:** 2019-08-09

通信作者: 肖玲斐,女,副教授,硕士生导师, E-mail: lfxiao@nuaa.edu.cn。

引用格式: 孟中祥,肖玲斐,马磊明,等. 基于改进帝国竞争算法的微型燃气轮机容错控制[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(3): 485-492. MENG Zhongxiang, XIAO Lingfei, MA Leiming, et al. Fault tolerant control of micro gas turbine based on improved imperial competition algorithm[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(3): 485-492.

了多种控制方法。文献[3]将模型预测控制用于燃气轮机,证明控制器具备良好的跟踪能力和抗干扰能力。文献[4]提出了自适应控制策略,将整个燃气轮机发电系统简化为4阶模型,不能充分体现燃气轮机的复杂性和时变性。文献[5]基于控制系统传感器故障情况下的容错控制问题进行了理论上的研究,但没有考虑到全工况运行情况下系统参数的变化。文献[6]采用转速曲线来替代微型燃气轮机在发电系统中的作用,适用工况过于单一化,没有考虑动态特性。文献[7]中将微型燃气轮机的转速控制、温度控制、加速度控制、燃料供给、燃烧延迟及排气延迟环节均采用传递函数代替,但缺乏理论说明与实验数据支撑,文献[8-9]均采用了Rowen提出的微型燃气轮机暂态仿真模型,该模型结构简单响应快,可以直接与发电系统进行串联仿真,然而其排气温度和输出转矩直接采用经验公式,其实质上是严重失真的线性模型。上述文献均只对微型燃气轮机的电力电子变换器的控制方法进行研究,缺乏对发电用微型燃气轮机总体的特性分析和控制器设计。

本文针对以上微型燃气轮机暂态模型仿真的缺点,提出了一种基于改进帝国竞争算法的微型燃气轮机发电系统容错控制方法。将发电机输入转矩作为燃气轮机的负载工况对发动机功率方程进行增广,并采用发电机的转速作为转速指令型号对微型燃气轮机进行控制,从而建立微型燃气轮机发电系统一体化部件级仿真模型。然后设计了满足微型燃气轮机发电系统温度及加速度保护的自适应模糊PID控制器,众所周知,PID控制器是一种被动容错控制器,即使在故障发生时仍然可以实现零静态误差跟踪。但其动态性能会显著恶化,从而使加速度和温度超限,在工程实际应用中造成结构性损伤,酿成事故。本文将控制器的相关参数设为可自适应调参的待定参数,提出采用改进帝国竞争算法(Imperial competition algorithms, ICA)对控制器参数寻优,使控制器能根据设定的控制性能指标在故障模式下自适应调整参数,从而减小故障发生时对微型燃气轮机带来的影响。

与基于仿生学的遗传算法、粒子群优化算法等不同,帝国竞争算法是一种基于社会学启发的群优化算法,其竞争机制与仿生学算法不同,其发展时间较短,仍然具有易早熟,容易陷入局部最优的问题,文献[10]提出了扰动ICA算法进行改进,为了防止算法早熟,使殖民地可以朝远离帝国主义国家

的方向移动,文献[11]提出了帝国分裂的机制进行改进,即当殖民地接近帝国主义国家势力值时,可以将帝国进行分裂,使寻优范围加大,文献[12]针对旅行商路线寻优问题,对比了帝国竞争算法与局部搜索、禁忌搜索、遗传算法、粒子群算法和蚁群算法等优化算法的寻优效果,证明算法具有较强的稳定性和寻优精度。本文提出一种自适应改革机制以及一种避免早熟的帝国合并补偿机制对算法进行改进,并通过仿真验证了改进后算法的优越性,本文还通过仿真实验验证了自适应容错控制器可以改善微型燃气轮机故障模式下的动态响应性能,达到保护控制的目的,同时保证发电系统的稳定运行。

1 微型燃气轮机动态建模

燃气轮机部件级数学模型精度较高,可在全包线内运行^[13]。本文采用部件建模方法,首先依据燃气轮机气动热力学特性和部件特性建立各部件的气动热力学方程^[14]。然后由流量平衡、转子功率平衡等原理,构造各部件共同工作方程

$$\begin{cases} \pi_c = \frac{P_2}{P_1} \\ \pi_T = \frac{P_3}{P_4} \\ (W_1, P_C) = f_c(\pi_c, n) \\ (W_3, P_T) = f_T(\pi_T, n) \\ n = f_{\text{rotor}}(P_C, P_T, P_L) \end{cases} \quad (1)$$

其中: π_c 为压气机压比, π_T 为涡轮压比通过进出口气流总压比值得到。 W_1 为压气机流量, W_3 为涡轮流量, P_C 为压气机功, P_T 为涡轮功通过离心压气机与向心涡轮通用特性线二维插值得到。轴的转速 n 由功率方程确定。求解时需要给定转速和压比初猜值进行迭代。常用的数值方法如牛顿-拉夫逊法、 $N+1$ 点残量法存在运算量大、严重依赖初猜值的缺点,本文采用基于容积法的燃气轮机建模方法,避免反复迭代过程。引入转子惯性和容积惯性方程后可使该非线性方程组闭合^[15],求解时将某一点作为初始点,进而获得燃气轮机动态模型。

微型燃气轮机涡轮产生的功率传递给压气机和发电机,其转子动力学方程

$$\frac{dn}{dt} = \frac{900}{\pi^2 J n} (P_T - P_C - P_L) \quad (2)$$

式中: n 为转速,单位为 r/min 。 P_T 为涡轮功, P_C 为压气机功, P_L 为发电机输入功率, J 为转子转动惯

量。 dn 为转速的微分, dt 为时间的微分。

将燃烧室及其进出口连接部分视为容腔,假设容腔内气体温度恒定,气压连续一致。此时进出口参数不再相等,而是满足容积动力学方程

$$\frac{dp_{out}}{dt} = \frac{RT}{M_a V} (W_{in} - W_{out}) \quad (3)$$

式中: dp_{out} 为容腔出口气压的微分, R 为气体常数, M_a 为气体摩尔质量, V 为容腔体积, W_{in} 为容腔进口流量, W_{out} 为容腔出口流量, T 为容腔温度,从而对部件级模型进行求解。

2 微燃机发电系统控制器设计

微型燃气轮机发电系统控制包含微型燃气轮机控制与整流逆变器控制 2 部分,其中微型燃气轮机的控制需要满足涡轮前温度保护和加速度保护的要求。并能在负载发生突变的情况下维持转速的恒定,本文设计的微型燃气轮机控制器结构如图 1 所示,给定指令转速后,控制器会根据误差信息计算控制量,保护模块根据转速对控制量进行限制输出,形成转速闭环控制。

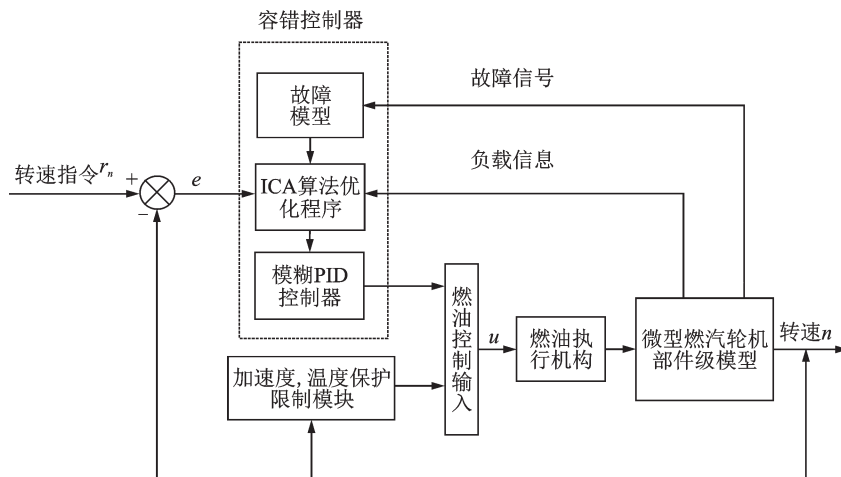


图 1 基于改进 ICA 的微燃机容错控制算法流程图

Fig.1 Flow chart of fault tolerant control algorithm for micro turbine based on improved ICA

2.1 自适应模糊控制器设计

将反馈转速与转速指令的偏差 e 及其一阶导数 e_c 作为输入量,并进行模糊化处理。然后通过模糊规则库的模糊推理得到输出量的模糊量化描述,最后进行解模糊输出精确的数学控制量。模糊化时采用三角形隶属度函数。采用 5 个语言变量 N_B, N_M, Z, P_M, P_B 对应从小到大的整个取值区间,模糊规则如表 1 所示。

表 1 模糊规则
Table 1 Fuzzy rules

模糊控制量	转速误差变化量 e_c					
	N_B	N_M	Z	P_M	P_B	
转速 误差 e	N_B	P_B	P_B	P_M	Z	Z
	N_M	P_B	P_B	P_M	N_M	Z
	Z	P_B	P_M	Z	N_M	N_M
	P_M	Z	P_M	N_M	N_M	N_M
	P_B	Z	Z	N_M	N_B	N_M

采用加权平均法对控制量进行解模糊化输出。

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{A_i}(x) \mu_{B_i}(y) z_i}{\sum_{i=1}^n \mu_{A_i}(x) \mu_{B_i}(y)} \quad (4)$$

式中: $\mu_{A_i}(x), \mu_{B_i}(y)$ 为隶属度函数,输出量为模糊 PID 控制器的增益参数 $\Delta K_p, \Delta K_I$ 。

模糊量的比例因子及模糊论域大小均为待定参数,控制器参数的确定依据优化算法的大量训练对参数进行寻优。系统的性能指标用二次型性能指标来表示用加权方式处理多目标优化问题,优化性能指标函数为

$$f(t) = \lambda_1 \int_0^t |e_n| dt + \lambda_2 \sigma + \lambda_3 t_r \quad (5)$$

式中: e_n 为转速偏差; σ 为超调量; t_r 为调节时间; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为给定的常数。

2.2 故障类型

执行器故障包括执行器增益的变化以及执行器偏差失效。执行器增益变化可以描述为

$$u_i(t) = \rho_i(t) v_i(t) \quad (6)$$

式中: $v_i(t)$ 表示控制器给出的执行器的输入, $u_i(t)$ 表示执行器的输出, $\rho_i(t)$ 为增益变化的比例系数。执行器偏差失效可描述为

$$u_i(t) = v_i(t) + \Delta_i(t) \quad (7)$$

式中 $\Delta_i(t)$ 为偏差量,可将执行器故障模型归结为

$$u_i^F(t) = \rho_i(t) v_i(t) + \Delta_i(t) \quad (8)$$

2.3 基于殖民地自适应改革和帝国合并的改进

ICA 算法

ICA 是一种受社会学启发的群优化竞争算法^[16],改进 ICA 算法流程如图 2 所示。

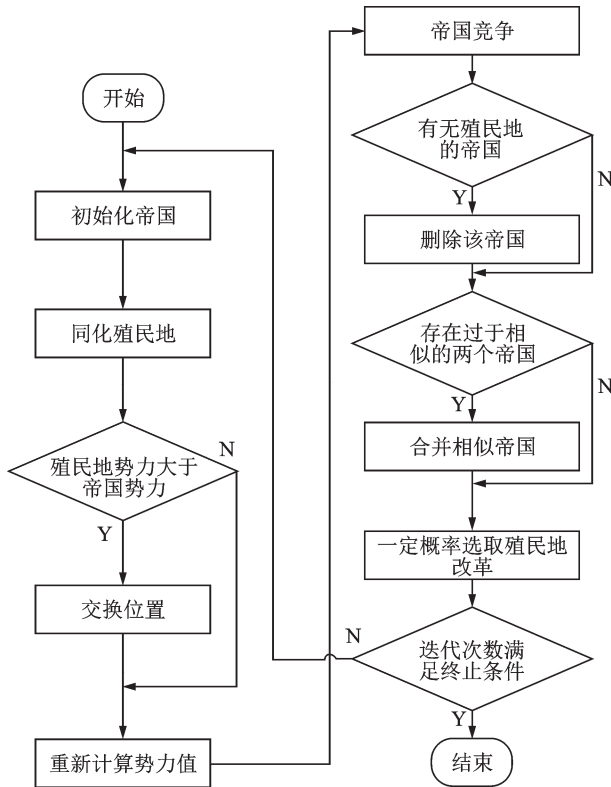


图2 改进 ICA 算法流程图

Fig.2 Flow chart for improving imperial competition algorithm

初始化帝国:对于 N 维的优化问题。生成 N 个数组作为初始国家,则

$$\text{Country} = [p_1, p_2, p_3, \dots, p_N] \quad (9)$$

设定一个代价函数对各个国家进行排序

$$\text{Cost}(\text{Country}) = f(p_1, p_2, p_3, \dots, p_N) \quad (10)$$

选择一定数量排名靠前的国家作为帝国主义国家,排名靠后的国家被划分给这些帝国主义国家,成为它们的殖民地。

同化殖民地:将殖民地的位置在搜索空间内向其所属帝国进行逐步的靠近,靠近的数值为一个随机值

$$x = \text{random}[0, \beta \times d] \quad (11)$$

式中: β 为可设计值, d 为殖民地与帝国主义国家的距离,该过程是优化算法对搜索空间的遍历过程。如果在同化完成后出现某个殖民地的势力值大于帝国主义国家,则将两者的角色进行互换,该帝国的其他殖民地向新的目标进行移动。

帝国竞争:选取帝国中的最弱殖民地,剩下的帝国依据其势力值大小获得该殖民地,帝国势力值的评价指标为

$$\text{Cost}(\text{empire})_i = \text{Cost}(\text{imperialist})_i + \xi \text{mean}\{\text{Cost}(cl\ of\ ep)_i\} \quad (12)$$

式中 ξ 是帝国中殖民地的势力系数,所有殖民地的平均值与帝国主义国家的势力值构成一个帝国势力评价指标,每个帝国获取被竞争殖民地的概率为

$$p_i = \frac{\text{Cost}(\text{empire})_i}{\sum_{i=1}^{N_1} \text{Cost}(\text{empire})_i} \quad (13)$$

式中 N_1 是总帝国数。随着竞争的进行,弱小的帝国会逐渐失去其殖民地。如果一个帝国没有殖民地,则删除该帝国。该步骤可以种群直接进行信息的交互,避免陷入局部最优。

以上3点即为帝国竞争算法的核心步骤,除此之外可以引入新的机制对算法进行完善,参考遗传算法中的变异,可以对该算法进行变异操作,实现方式为先设定一个改革概率,在每次迭代完成后依此概率计算每个帝国内进行改革的殖民地数量 R ,然后对一个帝国殖民地进行随机排序,选取前 R 个殖民地并重新初始化这些个体。这样可以增加种群多样性。

本文在改革概率基准上加一个自适应改革的改进,改革概率为

$$p_{vr} = P_0 \left(1 - \frac{\text{Cost}(\text{empire})_i}{\max\{\text{Cost}(ep_1), \dots, \text{Cost}(ep_n)\}} e^{-\frac{t - T_{\max}}{\theta}} \right) \quad (14)$$

式中: t 为算法当前的迭代步骤。 T_{\max} 为总迭代次数。 θ 为可设计参数,作用之一是当迭代次数较小时,改革力度会较大,迭代次数越多,改革力度越小,从而在后期使寻优结果保持稳定;二是较弱的帝国改革概率会更大,而较强的帝国改革概率更低,从而使强国稳定发展,而弱国倾向于突变发展。

本文还提出了一种不会导致早熟的帝国合并方案。计算任何2个帝国主义国家之间的距离,该距离小于一个阈值,则将其合并,势力值较低的帝国内国家全部沦为殖民地,并对殖民地进行排序,只保留原有数量的殖民地。并生成一个新的帝国,避免算法收敛过快,保持种群多样性,本文的优化算法参数如表2所示。

表 2 算法参数

参数名称	参数值
优化参数维度	7
初始国家大小	200
初始帝国数量	8
迭代次数	300
同化系数	0.5
合并临界值	0.005
帝国竞争概率	0.5
基础改革概率	0.1

2.4 发电系统控制策略

微型燃气轮机发电系统如图 3 所示,微型燃气轮机带动发电机发电,经过整流器和逆变器“AC-DC-AC”变换为工频交流电。控制目标是在微型燃气轮机不同工作模式下均能维持输出电流电压与频率的恒定,与燃气轮机控制系统一起维持供电系统的稳定工作。

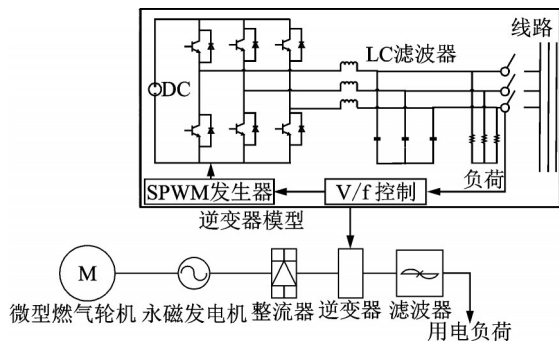


图 3 微型燃气轮机发电系统模型

Fig.3 Model of micro gas turbine power generation system

本文采用如图 4 所示的恒压恒频控制策略对逆变器进行控制,将输出电压从三相静止坐标系 abc 转换到 $dq0$ 坐标系后,进行 PI 调节^[17],控制量由 PWM 脉冲调制信号发生器转化为逆变器控制信号,从而控制逆变侧电压维持在 220 V 左右。

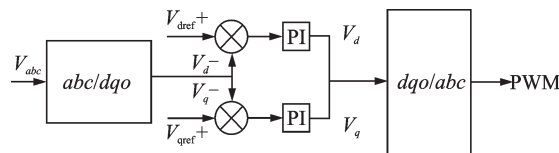


图 4 V/f 控制原理图

Fig.4 V/f control schematic diagram

3 仿真实验验证

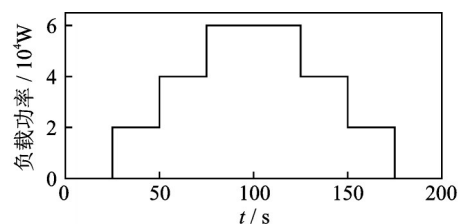
3.1 部件级模型开环实验

以 100 kW 级微型燃气轮机为建模对象,求解时的初值及相关参数如表 3 所示。

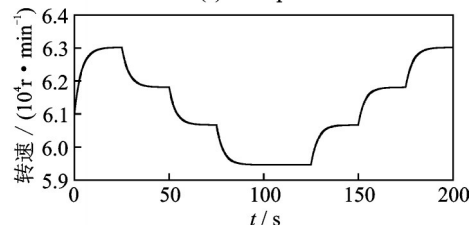
表 3 微型燃气轮机主要参数

参数名称	参数值
大气压力/Pa	103 000
大气温度/K	288.15
回热器空气侧气体总压恢复系数	0.988 8
燃烧室燃烧效率	0.99
燃烧室总压恢复系数	0.96
容腔气体常数/(J·(mol·K) ⁻¹)	8.314
回热器燃气侧气体总压恢复系数	0.966 9
设计点压气机出口流量/(kg·s ⁻¹)	0.998
设计点涡轮进口流量/(kg·s ⁻¹)	1.006
设计点涡轮进口压力/Pa	360 000
设计点压气机出口压力/Pa	380 608
设计点压气机功/kJ	175.1
设计点涡轮功/kJ	295.9
设计点转速/(r·min ⁻¹)	61 000
燃气定压比热/(J·(kg·K) ⁻¹)	1 060.7
空气定压比热/(J·(kg·K) ⁻¹)	904.6
回热器回热度	0.88
理想气体摩尔质量/(g·mol ⁻¹)	29
燃料低热值(甲烷)/(kJ·kg ⁻¹)	50 036.635
设计点涡轮出口压力/Pa	106 770

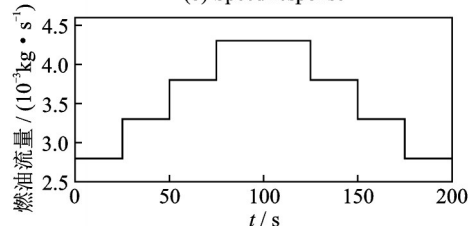
在开环模式下对建立的燃气轮机部件级模型进行变负载和变转速的仿真运行试验,图 5(a)为机械负载变化,图 5(b)为对应的转速曲线。图 5(c)为燃油量变化,图 5(d)为对应的转速曲线。当负载功率加大时,转速突变减小,转速随着转子惯性特性而变化。



(a) Load power



(b) Speed response



(c) Fuel curve

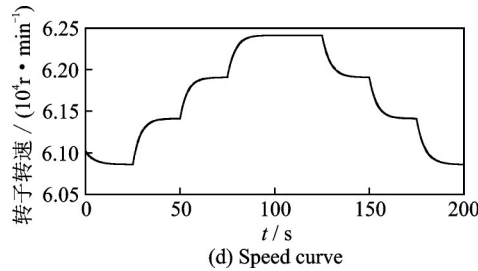


图5 燃气轮机开环响应曲线

Fig.5 Gas turbine speed step simulation curve

3.2 改进算法测试

对改进前后的优化算法寻优能力进行测试,测试函数寻优维度从低到高分别进行,搜索区间为 $[-50, 50]$,测试函数为

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 10\cos(2\pi x_i) + 10) \quad (15)$$

寻优目标为寻找极小值,改进前后算法与遗传算法的对比结果如表4所示,描述算法优劣的指标为整个种群的最优结果及平均结果,改进后ICA寻优能力得到明显提升,与遗传算法相比,改进ICA算法在处理较低维度的优化问题时具有明显的优势。

表4 优化算法性能对比

Table 4 Performance comparison of optimization algorithms

寻优维度	指标	改进ICA	ICA	GA
5	Best	1.798 0e-11	0.178 3	0.900 247
	mean	1.798 0e-11	0.178 3	110.271
10	Best	10.135 8	57.387 3	69.815 2
	mean	10.135 8	135.539 6	509.025
15	Best	70.282 2	302.572 3	237.164
	mean	174.980 8	528.633 4	782.414 1
20	Best	305.427 7	675.635 5	388.433
	mean	2 194.4	2 070.2	994.466

3.3 加减速控制

转速突变时要求其具有较小的超调量,调节时间和静态误差。图6(a)为同时添加增益故障和漂移故障后优化算法的训练结果,其优化性能指标函数有了明显幅度的改善。图6(b)为转速响应图,无故障时,燃气轮机具有较小的超调量和调节时间,当加入故障后,其动态性能会显著恶化,此时优化算法控制器进行在线自适应调参可以改善这种性能的恶化。

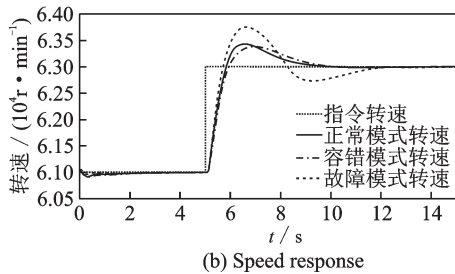
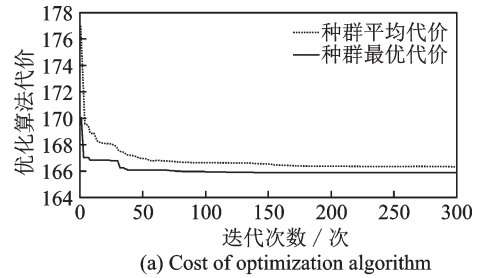


图6 燃气轮机转速阶跃仿真曲线

Fig.6 Gas turbine speed step simulation curve

3.4 加减载荷控制

在5s时进行减载,此时转速突变上升,10s时进行加载,转速突变下载。图7(a)为同时添加增益故障和漂移故障后优化算法的训练结果,可以看到当仿真进行到150次后,代价函数才开始改善,这说明本文提出的优化算法尽管在迭代前期没有找到最优解,但具有突破局部搜索的能力,图7(b)为转速响应,当发生故障时控制效果会恶化,通过控制器的在线调参使这种恶化幅度大大降低,说明容错控制器在变负载工况下能改善动态性能指标。

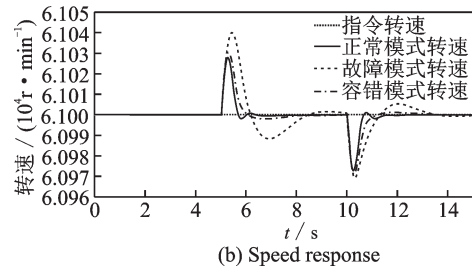
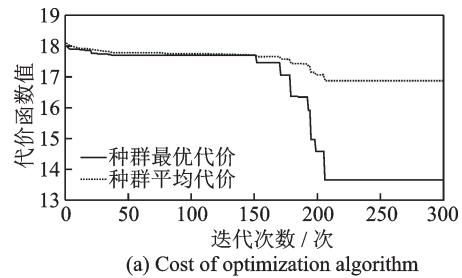


图7 燃气轮机加减负载仿真曲线

Fig.7 Gas turbine load simulation curve

3.5 逆变器控制

发电机输出电流经过逆变器转换成工频交流电供用户使用,逆变器输出电压如图8(a)所示,输

出电流如图8(b)所示。实验表明,本文设计的控制策略在微型燃气轮机负载功率发生突变时,可以维持电压稳定在有效值220 V恒压和50 Hz恒频的范围内,仅仅使电流值发生变化,从而保证了工况突变时输出电压幅值及频率的稳定性。

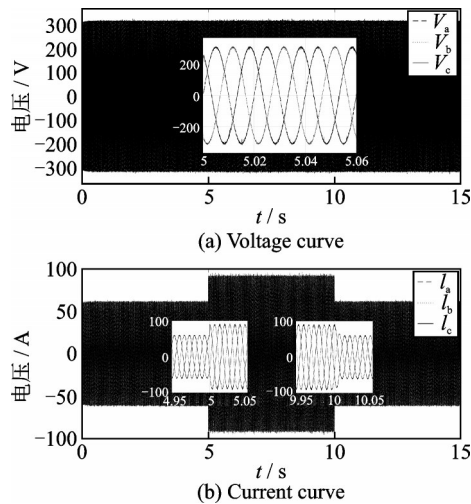


图8 直流侧与逆变器侧电压波形

Fig.8 DC side and inverter side voltage waveform

4 结 论

本文根据发电用微型燃气实际参数建立了微型燃气轮机发电系统一体化动态仿真模型,针对微型燃气轮机在执行器故障模式下动态性能恶化的问题,设计了基于改进的ICA算法优化和模糊逻辑的保护控制器来改善故障模式下的动态性能,仿真实验结果表明改进后ICA算法收敛速度较快,在突破局部搜索方面体现了良好的性能,对执行器发生故障时微型燃气轮机的动态性能具有改善作用,达到了保护控制的目的。本文还完成了发电系统在孤岛模式下逆变器的恒压恒频控制策略设计和仿真实验。仿真结果表明微型燃气轮机在变工况运行时仍能满足发电系统输出电流的恒压恒频要求,具有工程实用价值。

参考文献:

[1] 杨策,刘宏伟,李晓,等.微型燃气轮机技术[J].热能动力工程,2003(1):1-4,104.
YANG Ce, LIU Hongwei, LI Xiao, et al. Micro gas turbine technology [J]. Thermal Power Engineering, 2003(1): 1-4, 104

[2] ZHANG Tiemin, LIAO Yiyong, XU Zhilin, et al. Power supply of macro-micro driven linear piezoelectric motor [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 34(1): 22-29.

[3] ZHU M, WU X, LI Y, et al. Modeling and model predictive control of micro gas turbine-based combined cooling, heating and power system [C]//Proceedings of Control and Decision Conference. [S.l.]: IEEE, 2016: 65-70.

[4] 谭雪琴,苏晓杰.基于鲁棒自适应策略的燃气轮机系统控制器设计[J].南京信息工程大学学报(自然科学版),2018,10(2):166-172.
TAN Xueqin, SU Xiaojie. Design of gas turbine system controller based on robust adaptive strategy [J]. Journal of Nanjing University of Information Engineering (Natural Science Edition), 2018, 10(2): 166-172.

[5] 杨清浩.随机扰动下微型燃气轮机系统的控制策略研究[D].徐州:中国矿业大学,2016.
YANG Qinghao. Study on control strategy of micro gas turbine system under random disturbance [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.

[6] 朱劫成,王西田,刘时雨,等.微型燃气轮机直驱发电系统的控制与仿真[J].大电机技术,2018(6):42-46.
ZHU Jiecheng, WANG Xitian, LIU Shiyu, et al. Control and simulation of micro gas turbine direct drive power generation system [J]. Large Motor Technology, 2018(6): 42-46.

[7] 张宏伟,陈洁,孙明,等.微型燃气轮机可变频域自适应模糊PID控制[J].热能动力工程,2018,33(1):42-47.
ZHANG Hongwei, CHEN Jie, SUN Ming, et al. Variable domain adaptive fuzzy PID control of micro gas turbine [J]. Thermal Power Engineering, 2018, 33(1): 42-47.

[8] 毛万成,李勇,彭衍建,等.光伏/微型燃气轮机混合微电网协调控制策略[J].电力系统及其自动化学报,2018,30(4):22-29.
MAO Wancheng, LI Yong, PENG Yanjian, et al. Photovoltaic/micro gas turbine hybrid micro grid coordinated control strategy [J]. Journal of Power System and Automation, 2018, 30(4): 22-29.

[9] 何雄峰,李先允,谈益琿,等.微型燃气轮机发电系统LVRT特性分析研究[J].电气技术,2016(6):18-24.
HE Xiong feng, LI Xianyun, TAN Yihun, et al. Analysis and research on LVRT characteristics of micro gas turbine power generation system [J]. Electrical Technology, 2016(6): 18-24.

[10] LIN J L, CHO C W, CHUAN H C. Imperialist competitive algorithms with perturbed moves for global optimization [J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 284-287: 3135-3139.

- [11] 徐震浩,王程,顾幸生.基于DICA的存储受限流水线调度[J].华东理工大学学报(自然科学版),2018,44(04):563-572.
XU Zhenhao, WANG Cheng, GU Xingsheng. Storage constrained flow shop scheduling based on DICA [J]. Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 44(4): 563-572.
- [12] 郭婉青.帝国竞争算法的研究与改进[D].福州:福州大学,2014:13-19.
GUO Wanqing. Research and improvement of empire competition algorithm [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2014: 13-19.
- [13] 刘君,穆世霞,李岩松,等.微电网中微型燃气轮机发电系统整体建模与仿真[J].电力系统自动化,2010,34(7):85-89.
LIU Jun, MU Shixia, LI Yansong, et al. Overall modeling and simulation of micro gas turbine power generation system in microgrid [J]. Power System Automation, 2010, 34(7): 85-89.
- [14] ASGARI H, CHEN X Q, MORINI M, et al. NARX models for simulation of the start-up operation of a single-shaft gas turbine [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 93: 368-376.
- [15] 杨刚,孙健国,黄向华,等.一种不需要迭代的发动机辅助变量建模方法[J].航空动力学报,2003,18(2):289-294.
YANG Gang, SUN Jianguo, HUANG Xianghua, et al. A modeling method of engine auxiliary variables without iteration [J]. Journal of Aeronautical Power, 2003, 18(2): 289-294.
- [16] ANSARI H R. Use seismic colored inversion and power law committee machine based on imperial competitive algorithm for improving porosity prediction in a heterogeneous reservoir [J]. Journal of Applied Geophysics, 2014, 108(9): 61-68.
- [17] LEE S S, HENG Y E. Optimal VF-PDPC of grid connected inverter under unbalanced and distorted grid voltages [J]. Electric Power Systems Research, 2016, 140: 1-8.

(编辑:陈珺)