

DOI: 10.3724/SP.J.1219.2012.00707

基于自抗扰的并联有源电力滤波器优化控制策略

童成意¹, 刘朝华²

(1. 长沙师范高等专科学校电子信息工程系, 湖南 长沙 410100; 2. 湖南大学信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 提出了一种并联型有源滤波器 (APF) 的自抗扰控制 (ADRC) 算法, 同时利用改进的免疫粒子群算法对自抗扰控制器参数进行全局优化, 利用小波变异增强了免疫克隆选择算法的动态优化性能, 构建了一种基于免疫粒子群的并联有源电力滤波器自抗扰控制系统. 实验结果表明, 文中的控制策略不依赖于精确的对象模型, 能够有效地抑制高频干扰对 APF 补偿性能的影响. 控制算法能对有源电力滤波器进行有效控制, 且具有较好的动态特性和鲁棒性.

关键词: 有源电力滤波器 (APF); 自抗扰控制 (ADRC); 人工免疫系统 (AIS); 粒子群优化 (PSO)

中图分类号: TM46/TP18

文献标识码: A

文章编号: 1002-0411(2012)-06-0707-06

An Optimization Control Strategy for Parallel Active Power Filter Based on Active Disturbance Rejection

TONG Chengyi¹, LIU Zhaohua²

(1. Department of Information Science and Information Engineering, Changsha Normal College, Changsha 410100, China;

2. School of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The optimal active disturbance rejection control (ADRC) algorithm for paralleling active power filters (APF) is proposed. The improved immune particle swarm algorithm is employed to achieve the global optimization of the active disturbance rejection controller's parameters. The dynamic optimization performance of the immune clonal selection algorithm is further enhanced by the wavelet variation. Based on the immune particle swarm algorithm, a kind of active disturbance rejection control system for parallel APFs is constructed. Experimental results indicate that the proposed control algorithm does not depend on the precise model of controlled plant, and can restrain the negative effect of high frequency interference on the performance of APF compensators. In addition, the effective control for APF is achievable by the proposed algorithm with proved good dynamic characteristic and robustness.

Keywords: active power filter (APF); active disturbance rejection control (ADRC); artificial immune system (AIS); particle swarm optimization (PSO)

1 引言 (Introduction)

随着电力电子技术的快速发展, 各种电力电子装置在工业中得到广泛应用, 同时电力系统谐波污染日趋严重, 影响着电网和电气设备的运行效益^[1]. 有源电力滤波器 (active power filter, APF) 是一种动态的、灵活的谐波抑制解决方案^[2-3]. 近年来, 有源滤波器逐渐成为电力系统的研究焦点. 控制策略决定了有源滤波系统补偿效果的好坏, 影响着有源滤波器的滤波效果. 目前, 有源电力滤波器的主要控制方法包括模糊控制^[4-5]、预测控制^[6]、矢量控制^[7]、自适应控制^[8]、滑模控制^[9-10]、神经网络^[11]等控制方法. 这些控制方法对有源滤波器控制起到

了积极的作用. 大多数的控制方法需要已知控制对象的精确数学模型, 然而现实中, 有源电力滤波器是一个极复杂的非线性动态补偿系统. 当有源电力滤波器处于负载情况时, 负载及线路上的参数不确定易导致系统不稳定且模型难以确定, 这将是源滤波器广泛应用的一个瓶颈.

自抗扰控制器是一种继承了传统 PID (proportional integral derivative) 的优点且不依赖于精确模型的非线性控制器, 具有控制精度高、抗干扰能力强等特点^[12]. 由于它对系统的变化和外部干扰不敏感性且具有较强的鲁棒性, 近年来自抗扰控制技术逐渐应用于电力电子装置的控制中^[13]. 同时由于自抗扰控制器参数难以确定, 在本文采用粒子群算

法对控制器参数进行寻优。

粒子群优化 (PSO) 算法源于对鸟类等粒子捕食行为的模拟, 是由 Eberhart 和 Kennedy 提出的一种仿生进化算法^[14], 并广泛地应用于科学与工程领域^[15]. 其在电力系统领域^[16]的自抗扰控制器优化设计上^[17]得到了成功应用. 人工免疫系统是一种全局优化方法, 能有效改进其它进化算法的寻优性能, 在电力系统及其自抗扰控制器优化方面得到广泛应用^[17-18].

本文提出一种改进免疫粒子群算法, 用于对自抗扰控制器进行实时寻优; 在此基础上, 设计了一种有源电力滤波器自抗扰优化控制方法, 使控制器参数得到最优配置, 增强了系统的自适应能力. 实验结果表明, 本文提出的控制策略能够较好地控制有源电力滤波器, 且具有较好的动态特性和较强的鲁棒性.

2 APF 数学模型及其自抗扰控制 (APF mathematical model and its active disturbance rejection control)

2.1 APF 数学模型

3 相 3 线并联型 APF 主电路如图 1 所示. 图中, e_s 为系统电源, L_s 为电源侧等效电感. APF 由直流侧电容器 C 、电压源逆变桥臂和输出滤波器 (电感 L_{f1} 、 L_{f2} 和电容 C_f) 组成, 其中电压源逆变桥臂中包含 6 个 IGBT (insulated gate bipolar transistor). 忽略电网阻抗 L_s , 设 3 相 $m = a, b, c$, 其中 a 、 b 、 c 分别代表 3 线电, 根据图 1, 3 相 3 线 APF 的数学模型为

$$e_m = -L_2 \frac{di_{2m}}{dt} + u_{CmP} + u_{PO} \quad (1)$$

$$u_{CmP} = L_1 \frac{di_{1m}}{dt} + u_{mN} + u_{NP} \quad (2)$$

$$C \frac{du_{Cm}}{dt} = i_1 - i_2 \quad (3)$$

其中, e_m 为电网输入电压, L_1 、 L_2 为电感, i_{1m} 、 i_{2m} 为电感上的电流, u_{CmP} 为电容与 IGBT 之间的电压降, u_{PO} 、 u_{NP} 为 IGBT 上的电压降, u_{mN} 、 u_{Cm} 为电容上的电压降, C 为电容, $i_1 - i_2$ 为电容电流差. 电压源逆变桥臂等效为可控电压源, APF 单相谐波域等效电路如图 2 所示. 图中, e_s 为电源谐波电压, i_s 为电源侧谐波电流, i 为流经 APF 电感 L_{f2} 的电流, u 为 APF 输出桥臂电压, e 为 APF 接入点的电压, i_L 为负载谐波等效电流源, i_L 为负载谐波电流, 电阻 R 为输出滤波器支路电阻和功率开关损耗等效电阻之和, $Z_{Lf}(s)$ 为输出滤波器的等效阻抗.

设电源等效阻抗为 $Z_{L_s}(s)$, 根据图 2 可得

$$e_s(s) = i_s(s)Z_{L_s} - i(s)Z_{L_f} + u(s) \quad (4)$$

将 $i_s + i = i_L$ 代入式 (1), 可以推导出电源侧谐波电流 $i_s(s)$ 为

$$i_s(s) = \frac{e_s(s) + Z_{L_f}i_L(s) - u(s)}{Z_{L_s} + Z_{L_f}} \quad (5)$$

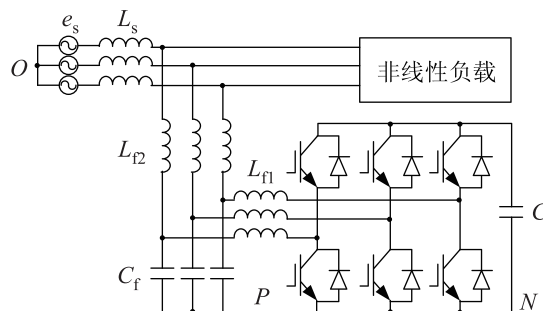


图 1 3 相 APF 的拓扑结构

Fig.1 Topology structure of the three-phase APF

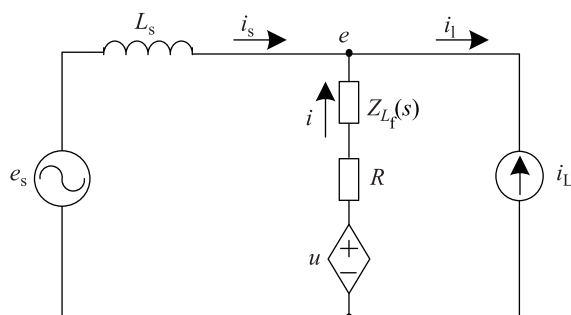


图 2 APF 单相等效电路

Fig.2 The single-phase equivalent circuit of APF

可见, 电源侧谐波电流 $i_s(s)$ 由电源谐波电压 $e_s(s)$ 和负载谐波电流 $i_L(s)$ 共同决定. L_{f1} 和电压型逆变器构成的有源滤波器连接在电容 C_f 与电感 L_{f2} 之间的节点. APF 的控制目标为跟踪固定周期的负载谐波电流信号, 利用自抗扰控制能有效地提高 APF 的控制精度.

2.2 自抗扰控制

自抗扰控制器^[12]是针对一类非线性系统提出的一种非线性控制器, 通过把传统 PID 的“线性和”形式转换为“非线性组合”而得到类似非线性 PID, 以此来提高系统的控制品质. 其中 β_1 、 β_2 、 b_0 为可调参数. 由以上内容可知, 对控制器参数, 除了 β_{01} 、 β_{02} 、 β_{03} 、 β_1 、 β_2 、 b_0 需要调试外, 其它控制器参数都可以设置成固定参数. 其结构如图 3 所示. 图中, y_0 是系统输入, y_{out} 为系统输出, Z_1 、 Z_2 、 Z_3 分别为对系统变量 X_1 、 X_2 、 X_3 的估计值.

自抗扰控制器结构由跟踪微分器 (tracking differentiator, TD)、扩张状态观测器 (extended state observer, ESO) 和非线性状态误差反馈律 (non-linear state error feedback, NLSEF) 三部分组成.

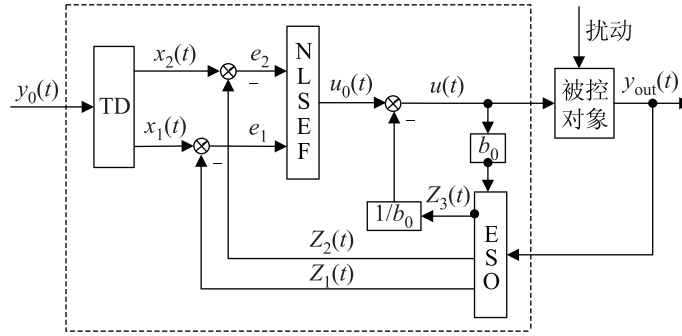


图3 自抗扰控制器结构图
Fig.3 The structure diagram of ADRC

3 免疫粒子群优化算法 (Immune particle swarm optimization algorithm)

3.1 粒子群算法

在解空间中随机初始化一组粒子，这些粒子经过若干次迭代后找到最优解。迭代公式为

$$v_{id}(k+1) = wv_{id}(k) + c_1r_1(p_{best} - x_{id}(k)) + \dots + c_2r_2(g_{best} - x_{id}(k)) \quad (6)$$

$$x_{id}(k+1) = x_{id}(k) + v_{id}(k) \quad (7)$$

式中， v_{id} 为粒子速度， x_{id} 为粒子位移， w 为惯性权重， p_{best} 为个体极值， g_{best} 为全局最优值， c_1 、 c_2 为加速常数， r_1 、 r_2 为 $[0, 1]$ 范围内变化的随机函数。

3.2 改进免疫粒子群算法

经典粒子群算法与其它进化算法类似，也是基于群体进化的，在进化后期容易陷入早熟收敛。人工免疫算法^[19-20]受生物免疫系统启发，通过学习外界物质的自然防御机理学习技术，提供新颖自适应智能学习方法。由于人工免疫系统存在变异操作、免疫记忆、克隆复制等，使算法最终能逃逸出局部最优解，获得全局最优解。免疫克隆选择算法是人工免疫算法的最核心算法之一。

小波免疫克隆选择算法流程为：

第1步：将 PSO 算法群体中适应度较差的后 S 个粒子看成免疫系统的抗体，组成临时抗体群 G_{Temp} ，并对 G_{Temp} 进行克隆扩增。克隆扩增算子为

$$Y(k) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\beta \times N}{i} \right] \quad (8)$$

式中， β 为克隆系数，每个细胞克隆倍数与亲和力成正比； N 为抗体个数； $[\cdot]$ 为取整操作； $Y(k)$ 为克隆扩增后的种群规模。

第2步：对克隆扩增后的子种群进行小波变异以获得新的个体。其变异算子为

$$Z(k) = Y(k) + m\sigma Y(k)$$

其中 m 常数， σ 为 Morlet 小波函数^[7]，其表达式为

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{a}} e^{-\frac{\varphi^2}{2a^2}} \cos \frac{5\varphi}{a} \quad (9)$$

其中， $\varphi \in [-2.5a, 2.5a]$ ，

$$a = e^{-\ln \lambda (1 - \frac{p-i}{T}) \zeta_m} + \ln \lambda \quad (10)$$

其中 ζ_m 为单调递增方程的形状参数， λ 为 a 的上限值， t 为当前迭代次数， T 为最大迭代参数。由于 Morlet 小波产生正数和负数的概率是等同的，因此更容易在解空间内进行有效的搜索。

第3步：免疫克隆选择， $S_i(k) = T_s^C(Z(k)) = \max \{affinity(Z_i(k))\}$ ， $affinity$ 为亲和度函数，然后 $S_i(k) \cup Y_i(k) \rightarrow Y_i(k+1)$ ，这样保证了抗体群中的最优解不会变差。

算法流程如图4所示。

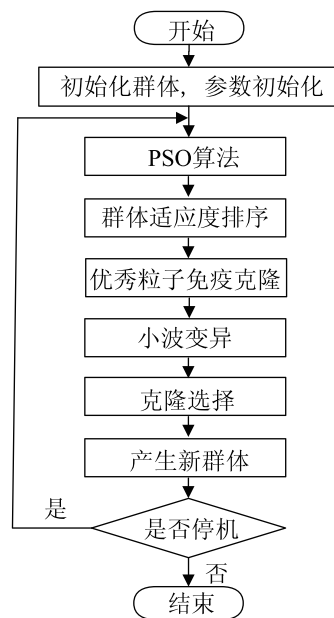


图4 免疫粒子群优化算法流程
Fig.4 The flow of immune particle swarm optimization algorithm

利用粒子群算法进行快速的局部搜索, 结合免疫算法的全局收敛性, 促使算法以较大的概率跳出局部极值点.

4 系统控制结构 (System control structure)

有源电力滤波器 (APF) 系统的控制器设计可以看做由一个直流侧电压控制外环和一个电流控制内环构成, 外环通过一个 PI 控制器对直流电压进行控制, 并获得电源电流的给定值, 内环的电流控制采用 ADRC, 在得到控制量后由脉宽调制 (PWM) 环节实现对 APF 的控制. 系统结构如图 5 所示, i_1 可以看作是对系统的干扰信号, 负载变化也就是 i_1 变化, 为了维持直流侧电容电压的恒定, 需要系统稳

态时有很好的抗干扰性能, 因此, 采用改进免疫粒子群算法对 ADRC 参数进行优化. 基于免疫粒子群优化的 ADRC 控制器如图 6 所示.

最优指标的选取须考虑系统的快速性、稳定性、准确性及其负载谐波:

$$J(p) = \int_0^{\infty} w|e(t)|dt + \sum_{\omega=\omega_0}^{\omega_f} (\psi(e^{j\omega T_s}) - 1)^2 \quad (11)$$

其中, $e(t)$ 为系统误差, w 为权重, ω_0 为基波角频率, ω_f 为最高次数负载谐波电流对应的角频率. 适应度函数 $J(p)$ 值越小, 表明相应粒子 p 越靠近全局最优解. 评价函数随着算法的运行逐步减小.

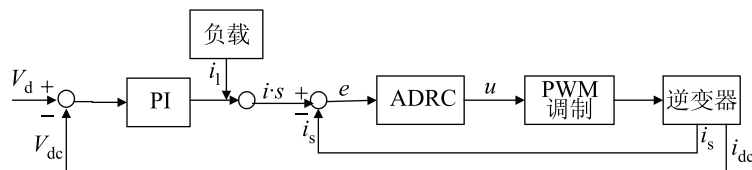


图 5 系统结构图

Fig.5 System structure diagram

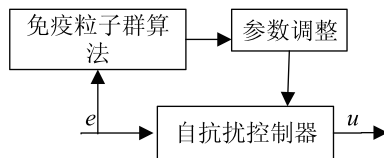


图 6 基于免疫粒子群优化的 ADRC 控制器

Fig.6 ADRC controller based on immune particle swarm optimization

5 仿真与实验 (Simulation and experiment)

5.1 标准函数测试

为了验证改进的免疫粒子群算法的多峰寻优能力, 选用 2 个标准函数进行测试. 该函数与文中并联有源电力滤波器自抗扰优化控制具有相似的性质. 并联有源电力滤波器自抗扰优化控制同样具有多个局部极值点, 需要优化能力强的算法才能得到全局最优解.

测试函数 1: Rosenbrock 函数

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^{30} (100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2) \quad (12)$$

测试函数 2: Ackley 函数

$$f_2(x) = -20 \exp \left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} x_i} \right) - \exp \left(\frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} \cos(2\pi x_i) \right) + 20 + e \quad (13)$$

f_1 (Rosenbrock) 函数是一个经典的复杂优化问题, 它的全局最优点位于一个平滑、狭长的抛物线形山

谷内. 由于函数仅仅为优化算法提供了少量信息, 使算法很难辨别搜索方向, 找到全局最小点的机会微乎其微. f_2 (Ackley) 函数的局部极值点较多且距全局最优点较远, 其寻优难度大.

表 1 给出了基于遗传算法的混合粒子群算法 (HGAPSO) [21]、全面学习粒子群算法 (CLPSO) [22] 及本文所提出的改进免疫粒子群算法 (AIS-PSO) 的比较结果. 表 1 中 mean、std.dev 分别表示均值、标准方差. 实验中, 粒子数均为 50, 测试 30 次取平均值.

从表 1 中可以看出, AIS-PSO 算法在均值与标准方差方面均优于 CLPSO、HGAPSO 算法. 同时, 从图 7 中可以看出 AIS-PSO 运算速度较快. 以上结果表明, AIS-PSO 在寻优精度与收敛速度方面都有很大的提高.

表 1 3 种 PSO 算法比较

Tab.1 Comparison of three PSO algorithms

function		CLPSO	HGAPSO	AIS-PSO
f_1	mean	120.98	63.62	18.84
	Std.dev	27.22	52.13	1.11
f_2	mean	17.07	0.34	5.88e-16
	Std.dev	1.83	0.78	0

5.2 实验

(1) 使用 Matlab7.0/Simulink 搭建基于单位功率因数控制的系统仿真模型, 参数设置如下: 电网电压

有效值 220 V, 频率 50 Hz, 逆变器直流侧电容 1500 μF , 三角载波频率 20 kHz. 其中 APF 系统参数见表 2.

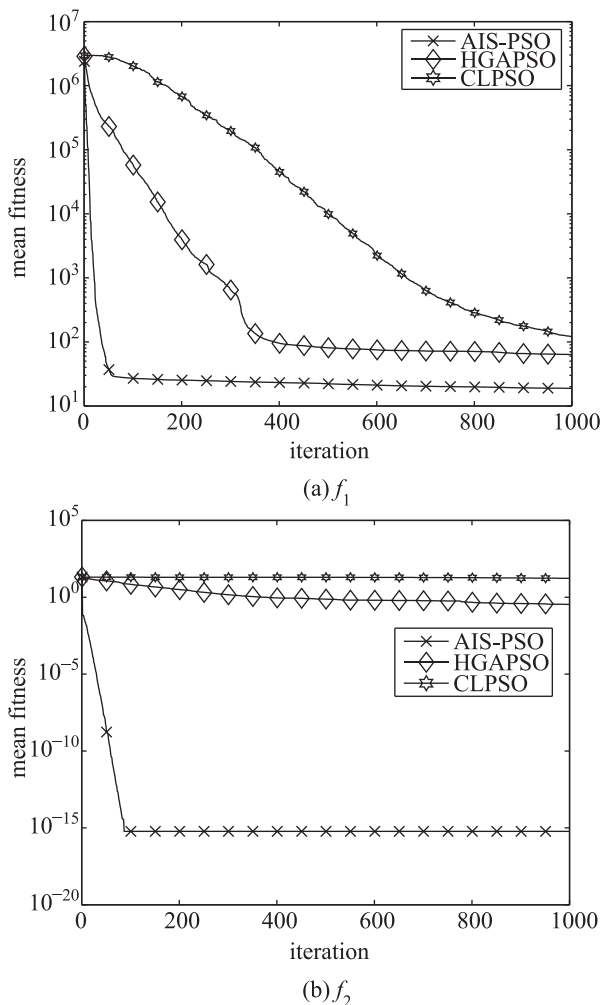


图 7 三种 PSO 算法收敛性

Fig.7 Convergence curves of the three PSO algorithms

表 2 APF 系统参数
Tab.2 Parameters of APF system

系统参数	参数取值
APF 输出侧等效电阻 R	2 m Ω
APF 输出侧电抗器 L_f	0.42 mH
控制时间 T_s	78.125 μs

通过图 8 可以看出, 相对于基本 ADRC 控制而言, 本文方法滤波后的电网电流波形要比基本自抗扰优化控制方法好, 同时能有效地降低稳态误差, 提高控制精度.

(2) 为进一步验证文中控制策略的正确性和有效性, 在额定电流为 100 A 的 APF 装置上进行了实验验证. APF 装置的主电路如图 1 所示, 调制层采用了载波调制方法, 以 5、7、11、13 和 17 次谐波为主. 补偿效果如图 9 和图 10.

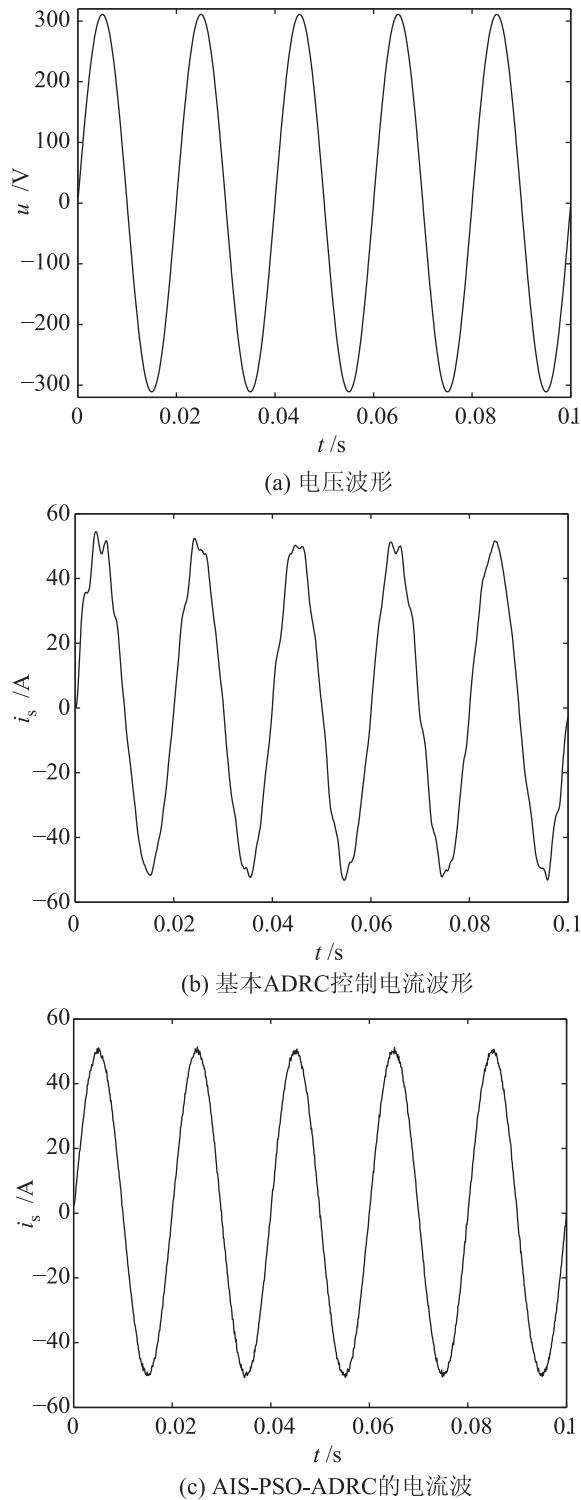


图 8 系统各变量的波形

Fig.8 System variable waveforms

图 9 为采用文中免疫粒子群 (AIS-PSO) 优化 ADRC 的控制策略时 APF 投入补偿后的电源电流波形. 图 10 为采用文中免疫粒子群 (AIS-PSO) 优化 ADRC 的控制策略时 APF 投入补偿后的电源电流谐波畸变率和频谱分析. 图 9 中 228 A、224 A 和 227 A 所指示的正弦曲线表示经过 AIS-PSO-ADRC 所控

制的电流幅值分别达到了 228 A、224 A 和 227 A。图 10 中, 228 A、224 A、227 A 所指示的曲线分别为所对应电流发生的畸变率。从图 9 可以看出, 本文采用 AIS-PSO 优化控制的电网电流的总畸变降到 4.7%, 说明本方法能很好地优化 ADRC 的参数, 使 ADRC 参数得到最优, 消除系统的稳态误差。

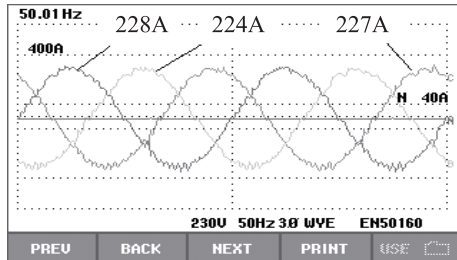


图 9 AIS-PSO-ADRC 控制的 APF 的电源电流波形
Fig.9 The APF current wave of source based on AIS-PSO-ADRC control

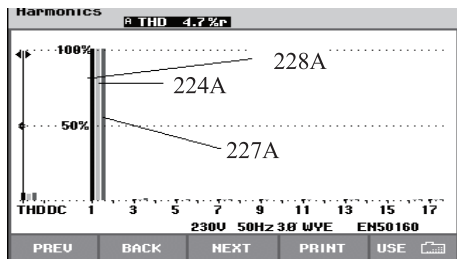


图 10 AIS-PSO-ADRC 控制的 APF 的电源电流波形谐波畸变率和频谱
Fig.10 The APF source current harmonic distortion rate and spectrum based on AIS-PSO-ADRC control

6 结论 (Conclusion)

针对有源电力滤波器问题, 本文利用自抗扰控制器鲁棒性强的特性, 将自抗扰控制器应用于有源电力滤波器控制, 并利用改进免疫粒子群算法对自抗扰控制器进行在线整定。经典测试函数测试表明所提免疫粒子群算法的寻优精度与算法稳定性均得到提高。在有源电力滤波器控制仿真实验中, 基于免疫粒子群的有源滤波器自抗扰优化控制方法能有效降低电流畸变率, 提高了系统控制性能。研究一种高效有源滤波器的自抗扰优化控制方法并将是该方法应用于大功率电气工业应用中将是接下来的重要研究方向。

参考文献 (References)

- [1] Lee T L, Li J C, Cheng P T. Discrete frequency tuning active filter for power system harmonics[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(5): 1209-1217.
- [2] Asiminoaei L, Blaabjerg F, Hansen S, et al. Adaptive compensation of reactive power with shunt active power filters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(3): 867-877.
- [3] Miret J, Castilla M, Matas J, et al. Selective harmonic-compensation control for single-phase active power filter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(8): 3117-3127.
- [4] Luo A, Shuai Z K, Zhu W J, et al. Development of hybrid active power filter based on the adaptive fuzzy dividing frequency-control method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(1): 424-432.
- [5] Bhende C N, Mishr S, Jain S K. TS-fuzzy-controlled active power filter for load compensation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1459-1465.
- [6] Drobnic K, Nemeč M, Nedeljkovic D, et al. Predictive direct control applied to AC drives and active power filter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(6): 1884-1893.
- [7] Vodyakho O, Kim T, Kwak S, et al. Comparison of the space vector current controls for shunt active power filters[J]. IET Power Electronics, 2009, 2(6): 653-664.
- [8] Valdez A A, Escobar G, Ortega R. An adaptive controller for the shunt active filter considering a dynamic load and the line impedance[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2009, 17(2): 458-462.
- [9] Matas J, de Vicuna L G, Miret J, et al. Feedback linearization of a single-phase active power filter via sliding mode control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(1): 116-125.
- [10] 郭伟峰, 武健, 徐殿国, 等. 新型滑模控制的并联混合有源电力滤波器[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(27): 29-35.
Guo W F, Wu J, Xu D G, et al. Hybrid shunt active power filter based on novel sliding mode control[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(27): 29-35.
- [11] Radzi M A M, Rahim N A. Neural network and bandless hysteresis approach to control switched capacitor active power filter for reduction of harmonics[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(5): 1477-1484.
- [12] Han J Q. From PID to active disturbance rejection control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 900-906.
- [13] 李乔, 吴捷. 自抗扰控制及其在 DC-DC 变换器中的应用[J]. 电工技术学报, 2005, 20(1): 83-88.
Li Q, Wu J. Auto-disturbance rejection control and its application to DC-DC converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(1): 83-88.
- [14] Eberhart R, Kennedy J A. New optimizer using particle swarm theory[C]//Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1995: 39-43.
- [15] Ho S Y, Lin H S, Liauh W H, et al. OPSO: Orthogonal particle swarm optimization and its application to task assignment problems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: System and Humans, 2008, 38(2): 288-298.
- [16] 何娜, 黄丽娜, 武健, 等. 基于粒子群优化算法的混合有源滤波器中无源滤波器的多目标优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(27): 63-69.
He N, Huang L N, Wu J, et al. Multi-objective optimal design for passive part of hybrid active power filter based on particle swarm optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(27): 63-69.

因此, 本文算法可以广泛地应用在实际项目中。对比实验和仿真实验验证了本文算法的有效性。

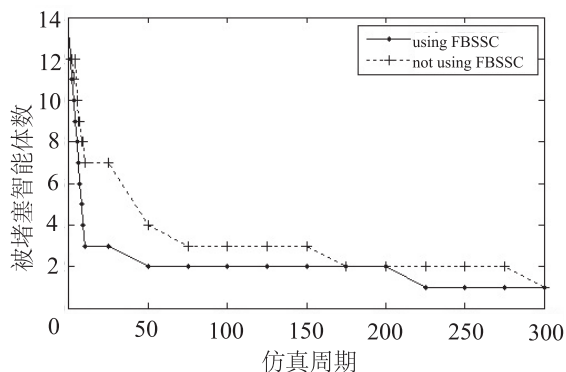


图 6 采用 FBSSC 算法前后被堵塞智能体数的比较

Fig.6 Comparison on numbers of blocked agents before and after using FBSSC

致谢: 感谢 Poupart 等人基于 Matlab 语言开发的 POMDP 软件包 (gapMin-2011-06-08), 在本文的实验中, 作者复用了其中的很多代码。

参考文献 (References)

- [1] Littman M L. A tutorial on partially observable Markov decision processes[J]. *Journal of Mathematical Psychology*, 2009, 53(3): 119-125.
- [2] Ross S, Pineau J, Chaibdraa B, et al. A Bayesian approach for learning and planning in partially observable Markov decision processes[J]. *Journal of Machine Learning Research*, 2011, 12(2): 1729-1770.
- [3] Kaelbling L P, Littman M L, Cassandra A R. Planning and acting in partially observable stochastic domains[J]. *Artificial Intelligence*, 1998, 101(2): 99-134.
- [4] Roy N, Gordon G. Finding approximate POMDP solutions through belief compression[J]. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2005, 23(9): 1-40.

- [5] Li X, Cheung W K, Liu J M. Improving POMDP tractability via belief compression and clustering[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2010, 40(1): 125-136.
- [6] Lee D D, Seung H S. Learning the parts of objects by non-negative matrix factorization[J]. *Nature*, 1999, 401(10): 788-791.
- [7] Sun J G, Crow M, Fyfe C. Extending metric multidimensional scaling with Bergman divergences[J]. *Pattern Recognition*, 2011, 44(5): 1137-1154.
- [8] 件博, 吴敏. 一种基于信念状态压缩的实时 POMDP 算法[J]. *控制与决策*, 2007, 22(12): 1417-1420.
- Wu B, Wu M. Real-time POMDP algorithm based on belief states space compression[J]. *Control and Decision*, 2007, 22(12): 1417-1420.
- [9] Roy N. Finding approximate POMDP solutions through belief compression[D]. Pittsburgh, USA: Carnegie Mellon University, 2003.
- [10] Paquet S. Distributed decision-making and task coordination in dynamic uncertain and real-time multiagent environments[D]. Quebec, Canada: Laval University, 2006.
- [11] Boutilier C, Dearden R, Goldszmidt M. Stochastic dynamic programming with factored representations[J]. *Artificial Intelligence*, 2000, 121(1/2): 49-107.
- [12] Poupart P, Kim K E, Kim D. Closing the gap: Improved bounds on optimal POMDP solutions[C]//*Proceedings of the Twenty-First International Conference on Automated Planning and Scheduling*. San Diego, CA, USA: AAAI, 2011: 194-201.

作者简介:

件 博 (1979-), 男, 博士生, 副教授. 研究领域为序贯决策, 机器学习, 无线传感器网络.

吴 敏 (1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师. 研究领域为过程控制, 鲁棒控制, 智能系统.

(上接第 712 页)

- [17] 刘朝华, 张英杰, 章兢, 等. 基于免疫双态粒子群的混沌系统自抗扰控制 [J]. *物理学报*, 2011, 60(1): 019501-1-019501-9.
- Liu Z H, Zhang Y J, Zhang J, et al. Active disturbance rejection control of a chaotic system based on immune binary-state particle swarm optimization algorithm[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(1): 019501-1-019501-9.
- [18] 江全元, 邹振宇, 曹一家. 基于免疫遗传算法的多机电力系统 UPFC 控制器 [J]. *电工技术学报*, 2006, 21(7): 60-68.
- Jiang Q Y, Zou Z Y, Cao Y J. UPFC in multi-machine power systems based on immune genetic algorithm[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2006, 21(7): 60-68.
- [19] de Castro L N, Von Zuben F J. Learning and optimization using the clonal selection principle[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(3): 239-251.
- [19] Dasgupta D. Advances in artificial immune systems[J]. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 2006, 1(4): 40-49.

- [20] Juang C F. A hybrid of genetic algorithm and particle swarm optimization for recurrent network design[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2004, 34(2): 997-1006.
- [21] Liang J J, Qin A K, Suganthan P N, et al. Comprehensive learning particle swarm optimizer for global optimization of multimodal functions[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2006, 10(3): 281-295.

作者简介:

童成意 (1965-), 男, 硕士生, 副教授. 研究领域为嵌入式系统及其应用, 智能控制理论与应用, 电力系统与控制.

刘朝华 (1983-), 男, 博士. 研究领域为计算机控制技术, 智能控制理论与应用, 智能系统.