

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2012.01.011

# 混合有源电力滤波器中无源滤波器多目标优化设计

李永安, 李圣清, 罗晓东, 曾黎琳, 何政平

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412008)

**摘要:** 对粒子群优化算法进行改进, 引入异步时变加速系数和线性时变权重系数, 提出一种改进型粒子群优化算法。将无源滤波器的滤波效果、无功补偿容量及初期投资作为优化目标, 利用改进型粒子群优化算法对混合有源电力滤波器中无源滤波器参数进行优化设计。仿真验证了理论分析和设计的正确性, 相关设计方法可为其它类型的混合有源滤波器中无源滤波器的优化设计提供参考。

**关键词:** 优化设计; 无源滤波器; 改进型粒子群优化算法

中图分类号: TN713

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2012)01-0045-05

## Multi-Objective Optimal Design for Passive Part of Hybrid Active Power Filter

Li Yongan, Li Shengqing, Luo Xiaodong, Zeng Lilin, He Zhengping

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China)

**Abstract:** An improved particle swarm optimization algorithm is proposed, which the particle swarm optimization algorithm is revised and asynchronous time-varying acceleration coefficients and linear weight coefficients are introduced. It takes the harmonic distortion, capacity of reactive power compensation and the original investment as optimal objectives and uses improved particle swarm optimization algorithm for the design of the PPF parameters of hybrid active power filter. Simulation result verifies the theoretical analysis and the design, and the related design method can provide reference for PPF design of other types of HAPF.

**Keywords:** optimal design; passive power filter; improved particle swarm optimization algorithm

## 0 引言

随着非线性负载在电网中的大量使用, 电网中的谐波污染日益严重, 治理谐波已迫在眉睫。目前, 混合有源滤波器 (hybrid active power filter, HAPF) 在谐波治理与无功补偿工程中得到了广泛应用<sup>[1-5]</sup>。在混合有源滤波系统中, 由大容量的无源滤波器

(passive power filter, PPF) 承担主要谐波补偿任务, 混合有源滤波器能否按其工作原理实现预期的谐波抑制效果, 主要取决于无源滤波器的优化设计。因此, 对无源滤波器的参数进行优化设计非常重要。

PPF 参数的设计需要考虑经济指标、技术指标等多种因素, 是典型的多目标、非线性优化设计问题。目前, 针对无源滤波器的优化设计问题, 应用

收稿日期: 2011-11-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51077046), 湖南省教育厅重点科研基金资助项目 (09A022), 湖南省自然科学基金资助项目 (09JJ6070), 湖南工业大学研究生创新基金资助项目 (CX1113)

作者简介: 李永安 (1985-), 男, 河南安阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电能质量调节与控制技术,

E-mail: liyongan\_1985@163.com

通信作者: 李圣清 (1961-), 男, 湖南永兴人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要研究方向为电能质量调节与控制, 现代电力系统控制理论及应用, E-mail: Lsq1961@sohu.com

较多的主要是遗传算法 (genetic algorithm, GA)<sup>[6-11]</sup>。文献[10]中采用GA对PPF的参数进行了优化设计,算法过程非常复杂,开发周期较长。粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO)算法是进化算法的一种,是一种新兴的群体智能优化算法。该算法简单、操作方便、收敛速度快,没有遗传算法的交叉及变异等操作,近年来,在电力系统中得到了广泛应用<sup>[12-13]</sup>。本文将改进型PSO算法应用于无源滤波器参数的优化设计。

## 1 无源滤波器的设计原则及设计问题的数学描述

### 1.1 设计原则

无源滤波器优化设计是一个难度较大的非线性、多目标优化问题,其参数设计应遵循如下原则:

1) 电感、电容、电阻之间的关系应满足电网谐波呈现低阻抗的无源滤波原理。

2) 无源滤波器的整体基波等效阻抗对基波呈现高阻抗,且整体阻抗不应与电网阻抗形成串、并联谐振,又要满足系统无功补偿的要求。

3) 投入装置后,系统电网谐波含量应满足国家所制定的标准。

4) 考虑电网背景谐波的存在,无源滤波器谐波容量的设计应增加10%的容量。

5) 设计时应保证在正常失谐的情况下无源滤波器仍能满足各项技术指标的要求。

6) 在满足上述设计原则的前提下,要尽可能降低初期总投入成本。

### 1.2 设计问题的数学描述

建立混合有源滤波器中无源滤波器的优化设计问题的数学描述:

1) 滤波器装设后,最大限度地补偿系统所需无功容量,即使系统的功率因数尽量接近1,即

$$\max \sum_{i=1,2,\dots,H} Q_i, Q_{\min} \leq \sum_{i=1,2,\dots,H} Q_i \leq Q_{\max}, \quad (1)$$

式中  $Q_{\max}$ ,  $Q_{\min}$  为滤波器所能提供的基波无功功率的最大值与最小值。

2) 滤波器装设后,要使电网谐波含量在满足国家标准的基础上,越小越好。谐波电压、电流含量均以总畸变率为衡量标准,且不超过各自的国标要求,即

$$\min \eta_{T,I}, \eta_{T,I} = \sqrt{\sum_{h=2}^N \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \leq \eta_{T,I,\max}, \quad (2)$$

$$\min \eta_{T,U}, \eta_{T,U} = \sqrt{\sum_{h=2}^N \left(\frac{U_h}{U_1}\right)^2} \leq \eta_{T,U,\max}, \quad (3)$$

式(2)和(3)中:  $\eta_{T,I}$ ,  $\eta_{T,U}$  分别为电流、电压的总畸变率;

$I_1$ ,  $U_1$  为基波电流和电压有效值;

$I_h$ ,  $U_h$  为系统  $h$  次谐波电流和电压有效值;

$N$  为截取的谐波最高次数。

3) 装设滤波器总初期投资最小,即

$$\min C = \sum_{i=1,2,\dots,H} (k_1 C_i + k_2 L_i + k_3 R_i), \quad (4)$$

式中  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  分别为第  $i$  组无源滤波器的电容、电感、电阻所对应的单位价格因子。

## 2 基于改进型PSO优化算法的无源滤波器的优化设计

### 2.1 全局版PSO优化算法

全局版PSO算法将优化问题的每一个解视为搜索空间中一个微粒,每一个微粒都用一个适应度值和一个速度来决定它们飞翔的方向和距离。假设  $D$  维空间有  $m$  个微粒,微粒  $i$  ( $i=1,2,\dots,m$ ) 的位置为  $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iD})$ , 速度为  $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ , 它所经历过的历史最好位置表示为  $P_b = (P_{b1}, P_{b2}, \dots, P_{bD})$ , 此位置相应的适应值为个体最优值。而整个群体经历过的最好位置表示为  $G_b = (G_{b1}, G_{b2}, \dots, G_{bD})$ , 此位置相应的适应值为全局最优值。算法迭代过程中速度与位置的更新公式为

$$\begin{cases} v_{id}(t+1) = v_{id}(t) + c_1 \lambda [P_{id}(t) - X_{id}(t)] + \\ \quad c_2 \mu [G_{id}(t) - X_{id}(t)]; \\ X_{id}(t+1) = X_{id}(t) + v_{id}(t+1); \\ i = 1, 2, \dots, m; \\ d = 1, 2, \dots, D; \\ t = 1, 2, \dots, T. \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\lambda, \mu \in U[0,1]$ ;

$c_1, c_2$  为加速系数,一般取  $c_1 = c_2 = 2$ ;

$t$  为当前迭代次数;

$T$  为最大迭代次数。

粒子的每一维速度都会被一个最大速度  $v_{\max}$  限定,其中  $v_{\max}$  为常数,常取变量搜索空间的20%~40%。如果某一维的速度更新后的速度超过用户设定的  $v_{\max}$ , 那么这一维的速度就被限定为  $v_{\max}$ 。

该算法收敛速度快,但算法开始初期全局搜索能力不足,容易陷入局部最优解,算法的后期局部搜索能力不强,不利于全局最优解的搜索。

### 2.2 改进型PSO算法

为了使粒子群在开始时具有较好的探索能力,即优化算法在优化初期加强全局搜索,同时为了保证算法在优化后期具有较好的开发能力,从而使粒

子收敛于全局最优解。本文在全局版 PSO 算法的基础上引入线性减小的时变权重系数  $w$  和异步时变加速系数  $c_1, c_2$ 。算法进行的初期取一个较大的  $w$  值, 进而加强算法的全局搜索能力, 使算法容易跳出局部极值点; 随着算法的进行,  $w$  值逐渐线性减小, 减小算法的全局搜索能力, 相反增强算法的局部搜索能力, 使算法更容易收敛。 $w, c_1, c_2$  的时变更新公式分别为

$$w_t = \exp\left[-\left(\frac{\eta t}{T_{\max}}\right)^2\right](w_{\max} - w_{\min}) + w_{\min}, \quad (6)$$

$$\begin{cases} c_1 = (c_{1f} - c_{1i})\frac{t}{T} + c_{1i}, \\ c_2 = (c_{2f} - c_{2i})\frac{t}{T} + c_{2i} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $w_{\max}, w_{\min}$  分别为最大、最小权重系数;  $\eta$  为一常数, 且  $\eta \in [20, 50]$ ;

$c_{1i}, c_{1f}, c_{2i}, c_{2f}$  分别为  $c_1$  和  $c_2$  的初值和终值。

本文中  $c_{1i}=2.5, c_{1f}=0.5, c_{2i}=0.5, c_{2f}=2.5; w_{\max}=0.9, w_{\min}=0.4$ 。在迭代开始时设  $w=w_{\max}$ ,  $w$  在迭代过程中逐步减小, 直到  $w=w_{\min}$ 。使 PSO 算法在开始优化时搜索较大的解空间, 得到合适的种子, 然后在后期逐渐收缩到较好的区域进行更精细的搜索, 以加快收敛速度。综上所述, 改进 PSO 算法的粒子速度和位置更新的数学表达式表示为

$$\begin{cases} v_{id}(t+1) = wv_{id}(t) + c_1\lambda[P_{id}(t) - X_{id}(t)] + c_2\mu[G_{id}(t) - X_{id}(t)]; \\ X_{id}(t+1) = X_{id}(t) + v_{id}(t+1); \\ i = 1, 2, \dots, m; \\ d = 1, 2, \dots, D; \\ t = 1, 2, \dots, T. \end{cases} \quad (8)$$

计算按如下步骤进行:

- 1) 确定改进型 PSO 算法的初始化参数, 包括每个粒子的随机速度  $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{i30})$  与相对应的随机位置  $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{i30})$ , 计算粒子的适应度值;
- 2) 设定滤波器参数优化设计问题的目标函数;
- 3) 给无源滤波器参数赋初值, 并保存该值;
- 4) 根据当前位置和速度更新粒子位置;
- 5) 计算第  $i$  个粒子在每个循环中的目标函数, 确定所有粒子中到目前为止寻找到的最好位置, 更新最好位置所对应的适应度函数;
- 6) 通过式 (6) 和式 (7) 实时调整  $w, c_1, c_2$  的大小, 利用式 (8) 更新位置和速度向量, 从而确定最优解;
- 7) 如果达到最大迭代次数, 计算终止, 否则转

到步骤 3)。

### 3 仿真

仿真系统三相电压对称, 系统基波电压为 10 kV, 工频频率为 50 Hz, 频率偏差为 2%, 实测功率因数为 0.91, 系统电压的总谐波畸变率满足国家标准, 系统谐波电流的总畸变率为 8.31%。该仿真电网系统的各次谐波电流含量如表 1 所示。

表1 10 kV 母线单相谐波电流结果  
Table 1 Single-phase harmonic current results for 10 kV bus-bar

谐波电流次数	3	5	7	9	11	13	15	17	19
电流 / A	66.1	30.0	15.5	12.1	8.0	4.6	8.2	8.4	6.1

HAPF 的拓扑结构如图 1 所示, 其中无源滤波器主要由 3,5,7 次单调谐无源滤波器与 9 次高通滤波器组成; 有源滤波器主要由谐波检测、预测、控制和补偿电路等组成。

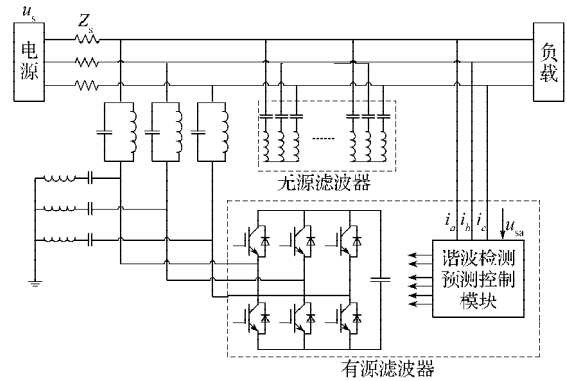


图1 HAPF 拓扑结构

Fig. 1 Topology of HAPF

采用文中提出的改进型 PSO 优化方法, 对 HAPF 中的 PPF 参数进行优化设计, 并与已有的 GA、全局版 PSO 优化方法进行比较, 3 种方法设计参数结果如表 2 所示。

表2 无源滤波器设计参数

Table 2 The design parameters of PPF

算 法	3 次滤波器		5 次滤波器		7 次滤波器		9 次滤波器	
	C/μF	L/mH	C/μF	L/mH	C/μF	L/mH	C/μF	L/mH
GA	20.5	19.8	18.6	22.6	6.0	35.5	5.1	16.1
全局版 PSO	19.5	20.8	14.1	29.7	5.5	38.4	10.8	7.7
改进型 PSO	18.2	20.6	15.2	27.5	5.1	35.0	12.1	6.5

由表 2 可知, 基于改进型 PSO 优化方法设计的滤波器电容、电感参数比传统设计方法设计的参数都较小, 节约了滤波装置的初期总投资成本。全局版 PSO 方法的初期投资成本比 GA 算法节约 0.78%; 而改进型 PSO 方法, 在满足滤波效果的基础上, 初期投资成本比 GA 算法节约了 4.7%。

利用 MATLAB 软件进行仿真, 图 2 和图 3 分别为混合有源滤波器投入系统前、后系统的单相电流波形与其  $\eta_T$  分析。

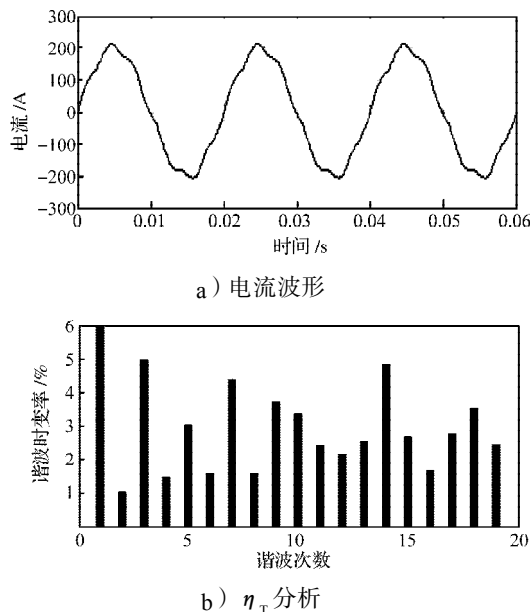


图 2 滤波前电流波形及其  $\eta_T$  分析

Fig. 2 The current waveform and its  $\eta_T$  analysis before filtering

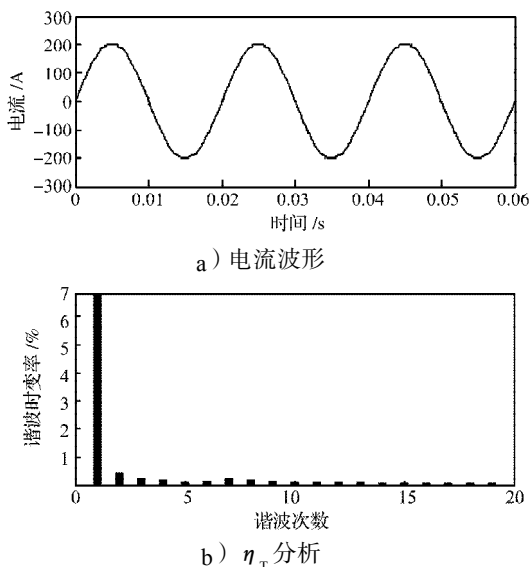


图 3 滤波后电流波形及其  $\eta_T$  分析

Fig. 3 The current waveform and its  $\eta_T$  analysis after filtering

由图 3 可看出, 滤波后的电流波形接近于正弦波形, 谐波抑制效果良好, 系统电流的总谐波畸变率从滤波前的 8.31% 降低为滤波后的 1.5%, 很好地验证了前面的结果。

图 4 为电网频率波动 2% 时, 滤波后单相电流波形及其  $\eta_T$  分析, 此时, 系统电流的总谐波畸变率为 2%, 满足国家标准, 这验证了本文优化设计系统的

有效性。

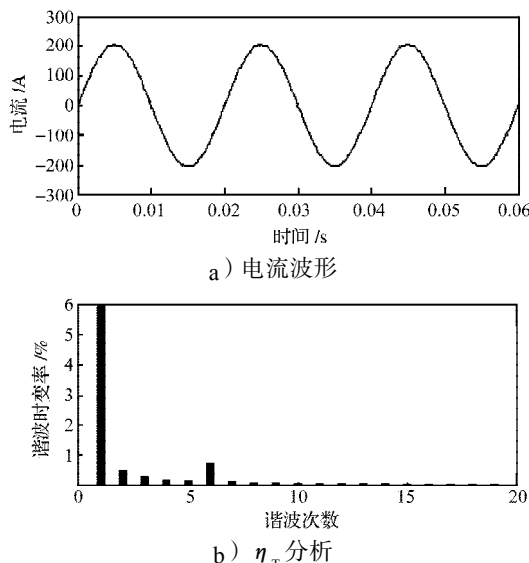


图 4 电网频率波动时滤波后电流及其  $\eta_T$  分析

Fig. 4 The current and its  $\eta_T$  analysis after filtering with grid frequency fluctuation

### 4 结论

本文对全局版 PSO 算法进行了改进, 得到改进型 PSO 算法, 并将该方法应用于无源滤波器参数的优化设计, 可得如下结论:

- 1) 与已有的全局版 PSO 算法相比, 改进型算法收敛速度更快, 搜索全局最优解的能力更强, 有效地避免了算法过早陷入局部最优。
- 2) 针对混合有源滤波器中的无源滤波器, 采用改进型算法进行多目标优化设计, 方法简单、操作方便、寻优能力强。
- 3) 仿真结果验证了使用改进型算法设计的无源滤波系统性能优良。

### 参考文献:

[1] 李圣清, 何伟华, 罗飞, 等. 串联混合型有源电力滤波器对三相负载谐波源补偿特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(34): 115-119.  
Li Shengqing, He Weihua, Luo Fei, et al. Research on Compensation Characteristics of Series Hybrid Active Power Filter to Harmonic Sources of Tri-Phase Loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(34): 115-119.

[2] 武健, 何娜, 徐殿国. 无变压器型并联混合有源滤波器设计及应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(12): 88-94.  
Wu Jian, He Na, Xu Dianguo. Design and Application of Transformerless Shunt Hybrid Active Power Filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(12): 88-94.

- [3] Singh B, Verma V, Chanda A, et al. Hybrid Filters for Power Quality Improvement[J]. IEE Proceedings of Generation Transmission and Distribution, 2005, 152(3): 365-378.
- [4] 周柯, 罗安, 唐欣, 等. 大功率并联混合型有源滤波器的综合设计与工程应用[J]. 电工电能新技术, 2007, 26(1): 29-33.  
Zhou Ke, Luo An, Tang Xin, et al. Design and Application of High-Capacity Shunt Hybrid Active Power Filter[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2007, 26(1): 29-33.
- [5] Fujita H, Yamasaki T, Akagi H. A Hybrid Active Filter for Damping of Harmonic Resonance in Industrial Power Systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 15(2): 215-222.
- [6] 李圣清, 朱英浩, 周有庆, 等. 基于交互式多目标遗传算法的无源滤波器优化设计[J]. 电工技术学报, 2003, 18(6): 1-6.  
Li Shengqing, Zhu Yinghao, Zhou Youqing, et al. Optimal Design of Passive Power Filters Based on Interaction Multi-Modal Genetic Algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(6): 1-6.
- [7] 王立国, 徐殿国, 苗立杰, 等. 无源滤波装置的建模分析及参数摄动的影响[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 70-74.  
Wang Liguo, Xu Dianguo, Miao Lijie, et al. A Modeling Analysis of Passive Power Device and Influence of Parameter Perturbation on Power System[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 70-74.
- [8] 陆秀令, 周腊吾, 张松华, 等. 无源滤波器多目标优化设计[J]. 高电压技术, 2007, 33(12): 177-182.  
Lu Xiuling, Zhou Lawu, Zhang Songhua, et al. Multi-Objective Optimal Design of Passive Power Filter[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(12): 177-182.
- [9] 陈峻岭, 姜新建, 朱东起, 等. 基于遗传算法混合有源滤波器参数的多目标优化[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2006, 46(1): 5-8.  
Chen Junling, Jiang Xinjian, Zhu Dongqi, et al. Multi-Object Optimization of Hybrid Active Power Filter Based on Genetic Algorithm[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2006, 46(1): 5-8.
- [10] 赵曙光, 王宇平, 焦李成, 等. 基于自适应遗传算法的无源电力滤波器综合优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 173-176.  
Zhao Shuguang, Wang Yuping, Jiao Licheng, et al. Adaptive Genetic Algorithm Based Optimal Design Approach for Passive Power Filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 173-176.
- [11] 涂春鸣, 罗安, 刘娟. 无源滤波器的多目标优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(3): 17-21.  
Tu Chunming, Luo An, Liu Juan. Multi-Objective Optimal Design of Passive Power Filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(3): 17-21.
- [12] 张文. 基于粒子群体优化算法的电力系统无功优化研究[D]. 济南: 山东大学, 2006.  
Zhang Wen. Studies on Power System Reactive Power Optimization Based on Particle Swarm Algorithm[D]. Jinan: Shandong University, 2006.
- [13] 袁晓辉, 王乘, 张勇传, 等. 粒子群优化算法在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 14-19.  
Yuan Xiaohui, Wang Cheng, Zhang Yongchuan, et al. A Survey on Application of Particle Swarm Optimization to Electric Power Systems[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 14-19.

(责任编辑: 邓光辉)