

改进遗传算法在混合有源滤波器的研究

侯世英, 索利娟, 郑含博

(重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030)

摘要: 针对混合有源滤波器设计中无源滤波器的重要性, 采用改进遗传算法, 对无源滤波器的成本、无功补偿和滤波效果三个方面进行参数优化, 得到多组最优目标, 改善了以往遗传算法存在的早熟等问题, 而且选取优化后的三组无源滤波器参数应用到混合有源滤波器, 通过 Matlab 对其滤波效果进行了仿真, 并将其滤波效果分别与优化前的滤波效果进行了比较, 结果表明, 经过优化的混合有源滤波器的滤波效果总体上均比参数优化前的效果好, 而且可以根据谐波实际情况来调整无源滤波器的参数, 并都相应的减小了有源滤波器容量, 提高了混合滤波器的性价比。

关键词: 无源滤波器; 改进遗传算法; 混合有源滤波器; 参数优化; 电能质量

Research of refined genetic algorithm in the hybrid active power filter

HOU Shi-ying, SUO Li-juan, ZHENG Han-bo

(State Key Laboratory of Safety and New Technology of Power Transmission & Distribution Equipment and System, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Aiming at the importance of the passive power filter in the design of hybrid active power filter, parameters of the hybrid active power filter for its cost, harmonic suppression and effect of filtering are optimized by refined genetic algorithm, which improves the problems like forwardness of the genetic algorithm and gets many best targets. Besides, it applies several parameters after optimizing into hybrid active power filter, and the simulation filtering effects by MATLAB are compared between before optimizing and after optimizing. The conclusion is given, which proves that the hybrid active power filter after optimization in totality is much better than no optimization on the filtering effect, the capacity of active power filter is reduced and the parameters of passive filter can be adjusted according to the need. In a word, the hybrid active power filter after optimization is better.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50507020).

Key words: passive power filter; refined genetic algorithm; hybrid active power filter; parameter optimization

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)01-0070-05

0 引言

在电力系统的谐波问题治理中^[1-2], 混合型有源滤波器具有造价低、性能好, 以较小的有源装置容量实现较大容量的谐波补偿, 在补偿谐波的同时, 兼顾部分基波无功补偿, 因此有着广泛的发展和前景^[3-4]。

混合型有源滤波器的设计中, 无源滤波器的优化程度对混合型有源滤波器的整体性能有着根本性的影响, 研究无源滤波器的优化设计问题, 对提高混合型有源滤波器的经济性、技术性和实用性均有重大意义^[5]。常见的无源滤波器优化设计方法有: 遗传算法、模糊优化设计、混合的遗传算法等^[6-7], 在后期的研究中也出现了很多新的方法, 如改进的

遗传算法、自适应遗传算法、改进的自适应遗传算法等等^[6]。其中, 改进的遗传算法, 用来处理多约束条件的非线性规划问题, 并成功地应用到 LC 参数的优化中。不但能够找到全局最优解, 还大大提高了遗传算法的寻优速度。因此, 本文采用改进遗传算法来进行无源滤波器的优化, 并运用到混合型有源电力滤波器中, 得到了较好的滤波效果。

1 问题描述

在如图 1 所示的并联型混合有源滤波器中, 无源滤波器为几组分别调谐于各次主要谐波的单调谐滤波器和一组高通滤波器并联运行的形式, 通过旁路谐波电流, 对电网起到带阻和低通滤波器的作用。

无源滤波器的设计的关键是在满足基波无功补偿容量的前提下, 对 LC 参数的设计。滤波器的 LC 参数优化是一个多约束、非线性的规划问题, 目前

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50507020)

现有优化设计方法中, 存在假设条件较多、寻优能力不强、寻优速度较慢等问题, 本文将基于改进遗传算法的无源滤波器优化应用于混合有源滤波器中, 以期得到更好的滤波效果。

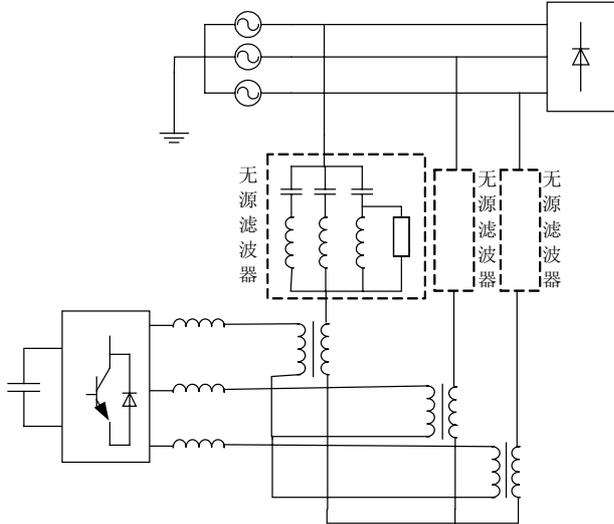


图 1 并联型混合有源滤波器结构框图

Fig.1 Structure diagram of hybrid active power filter

2 改进型遗传算法

标准遗传算法是遗传算法的一种经典格式, 主要包括基因编码、评价个体优劣、选择、杂交、变异等一系列演变过程组成, 仅适用于单目标优化问题, 且存在收敛概率低、速度慢和易早熟等缺陷, 所以对基本的遗传算法进行改进, 是拓展其引用领域的必然。

本文采用在操作算子方面进行改进并引入早熟收敛的判定的遗传算法对无源滤波器进行优化, 即对其成本、无功补偿和滤波效果 3 个目标进行全局优化, 并应用于混合有源滤波器中, 以改善系统的滤波效果。

3 无源滤波器优化设计

3.1 目标函数的建立

(1) 无源滤波器的成本

主要是考虑无源滤波器的初期安装成本和后期的运行维护费用。为简单起见, 忽略较小的附加成本, 其成本可表示为:

$$F = f_1 + f_2 + f_3 = \sum_{i=1}^n (k_1 R_i + k_2 L_i + k_3 C_i) + T(\Delta A \beta + K_a K_c Q) \quad (1)$$

式中: n 为无源滤波器的组数; f_1 为无源滤波器的初期成本, f_2 为每年的损耗成本 f_3 为每年的年运

行、维护费用。

(2) 无功补偿

无源滤波器的装设, 既不能使系统出现无功功率过补偿, 又要使系统的功率因数尽量接近 1, 即:

$$Q_{\min} \leq \sum_{i=1}^n Q_i \leq Q_{\max} \quad (2)$$

本次设计从提高功率因数需要上考虑无功补偿容量的确定方法, 可用下面的公式计算^[8]:

$$Q = P_{pj} \left(\sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi_1} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi_2} - 1} \right) \quad (3)$$

式中: P_{pj} 为电网中最大负荷月的平均有功功率, $\cos \varphi_1$ 为补偿前的功率因数, $\cos \varphi_2$ 为补偿后的功率因数。

3.2 适应度函数的建立

遗传算法在进化搜索中基本不利用外部信息, 仅以适应度函数(fitness function)为依据, 利用种群中每个个体的适应度值进行搜索。因此适应度函数的选取至关重要, 直接影响到遗传算法的收敛速度以及能否找到最优解。一般而言, 适应度函数是由目标函数变换而成的, 由上述可知, 可以得到所需的适应度函数分别为:

$$F_1(x) = m_1 - F \quad (4)$$

$$F_2(x) = \sum_{j=1}^n P_{Q,j} \quad (5)$$

$$F_3(x) = m_2 - \alpha_v THD_u - \alpha_i THD_i \quad (6)$$

其中: m_1, m_2 是较大的正数, 用来保证 $F_1(x)$ 和 $F_3(x)$ 始终为正值, 其值可根据具体情况确定; α_v 和 α_i 都是大于零的常数, 它们用来匹配电压和电流畸变率的权重, 通常情况下 $\alpha_v : \alpha_i = 1 : 10$ 。

3.3 染色体构成

由于染色体是实向量的形式, 所以采用一维向量、实数编码。首先, 由无源滤波器的谐振条件我们知道有:

$$L_i = \frac{1}{\omega^2 C_i}, \quad R_i = \frac{\omega_i L_i}{Q} \quad (7)$$

而对于二阶高通电力滤波器有:

$$R_H = \frac{1}{\omega_H C_H}, \quad L_H = \frac{R_H m}{\omega_H} \quad (8)$$

式(7)、(8)中 Q 和 m 分别为调谐锐度和调谐曲线形状参数, 二者分别取经验值 $Q=30, m=0.5$ 。

为使无源滤波器发生串、并联谐振, 染色体的论域应满足边界条件: $\text{Im}(Z_{HS}) \neq 0, \text{Im}(Y_{HS}) \neq 0$;

$Im(Z_{HS}) < t, Im(Y_{HS}) < t$ 。

式中, Z_{HS} 为无源滤波器与电网的串联阻抗, Y_{HS} 为无源滤波器与电网的并联导纳, t 是为了保证在频偏的情况下系统能保持稳定而使 Z_{HS} 和 Y_{HS} 小于一个很小的正数。

3.4 染色体选择策略

不同的选择策略对算法性能的影响都很大, 所以, 染色体的选择对于算法来说也是至关重要。简单的遗传算法并不能保证解的全局收敛性, 而动态 ε 制约法对染色体进行比较、分类和选择, 选择的概率则随进化的进行而变化, 可以动态调整概率, 最优染色体保留策略, 它将 $F_1(X)$ 的寻优问题假定在一个约束空间内, 即 $\max F_1(X)$:

$$X \subset \{X | \varepsilon_{i,\min} \leq f_i \leq \varepsilon_{i,\max}, i=1,2,3\} \quad (9)$$

式中: f_i 为 $F_1(X)$ 的适应度值, $\varepsilon_{i,\min}$ 和 $\varepsilon_{i,\max}$ 为对应 $F_1(X)$ 的最小值和最大值。这样就可以使种群向 f_1 较大的方向进化时, 兼顾使 f_2 和 f_3 有较好的基因, 避免算法陷入 $F_1(X)$ 的局部最优解。

而将 $F_2(X)$ 和 $F_3(X)$ 设定阈值常数制约, 有:

$$P_{Q,\min} \leq F_2(X) \leq P_{Q,\max},$$

$$n_2 - \alpha_V THD_U - \alpha_I THD_I \leq F_3(X) \leq n_2$$

3.5 早熟问题的解决

遗传算法中的另一关键问题是早熟问题, 它意味着遗传算法寻优陷入了局部值。在该算法中若每个染色体的适应度和适应度的平均值之差的绝对值小于一个给定的正数, 即认为计算陷入早熟。

一旦出现早熟, 则从进化池中选取一个最佳的染色体作为 X_0 , 对它的每一个基因都用 $a=4$ 的 Logistic 方程迭代, 将第 y 个基因生成的序列 $\{X_M\}$ 作为新种群每个染色体上第 y 个基因, 即用 $2M$ 个 Logistic 方程迭代形成新一代种群, 就可增加种群的多样性, 从而克服“早熟”收敛。算法引入的 Logistic 方程为: $X_{n+1} = aX_n(1-X_n)$ 。式中 $X_n \in (0,1)$ 且 $X_n \neq 0.5, n=0, 1, 2, \dots$, 其中 X_0 必须符合算法进化的方向, 是种群中最好的染色体, 根据以下两个条件分别进行判断和选取:

- (1) 其适应度 F 必须满足 3.4 中相应的阈值条件。
- (2) 其最优概率应当最大。

4 仿真实证

本文中遗传算法程序是在 MATLAB7.0 中编写的, 该遗传算法的基本流程如图 2 所示。从图 2 可知, 优化结束后, 从简单分析适应度函数来确定遗传算法是否寻到最优个体, 如果适应度函数没有达到最大, 则遗传算法在这次运算中有些约束或目标

没有达到要求, 没有寻到最优个体。此时说明算法在本次寻优中没有收敛, 可再次运行该程序知道找到相当数量的最优个体。

本文以宁夏石嘴山某 10 kV 变电站谐波情况为例, 将基于改进遗传算法的无源滤波器优化应用到混合有源滤波器中, 对该电站的谐波污染进行治理。由于负载中大部分为整流装置, 5、7 次谐波较为严重, 故主要针对 5、7 谐波以及高次谐波进行治理。在算法程序中设立群数目为 200, 最大遗传代数数为 300 代, 最终取得 12 组最优个体, 取其中三组进行深度寻优, 如表 1 所示。

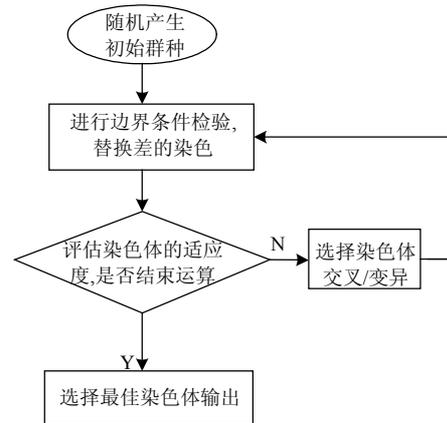


图 2 遗传算法优化程序流程图

Fig.2 Flow sheet of GA optimization

表 1 种群中的三组最优目标

Tab.1 Three groups optimized targets in the crowd

	优化前	一组	二组	三组
R_5 / Ω	1.2	1.2	1.2	1.2
L_5 / mH	14.98	13.00	16.60	11.80
$C_5 / \mu\text{F}$	27.06	31.17	24.41	34.34
R_7 / Ω	1.2	1.2	1.2	1.2
L_7 / mH	13.54	9.09	15.80	12.40
$C_7 / \mu\text{F}$	15.27	22.75	13.09	16.68
R_{11} / Ω	6.41	1.10	8.25	4.66
L_{11} / mH	411	392	465	368
$C_{11} / \mu\text{F}$	365	348	379	323
Q	100	100	100	100

仿真采用图 1 中结构, 电流检测采用基于瞬时无功功率检测的 d-q 法, 控制方法采用三角波控制方式, 然后将优化后的参数应用到该系统中, 通过 Simulink 仿真, 将无源优化前与三组最优个体的滤波效果进行比较, 具体如下所述。

以 A 相为例, 未投入 LC 滤波器之前, 负荷电

流的总畸变率为 29.6%，负荷电流仿真波形如图 3、4 所示，可以看出未经滤波的负载电流中谐波含量很大。

图 5 和图 6 分别为投入未优化的 LC 滤波器和优化过后的其中一组 LC 滤波器后，得到的系统电流仿真波形。经过与图 3 的比较，可以看出前者投入系统后，系统中谐波电流的含量减少很多，系统电流波形得到一定程度的改善，但是负载电流仍存在较大的畸变。图 5 (a) 中，经过优化的 LC 滤波器投入后，滤波效果比前者较好，但仍存在较大谐波污染问题。

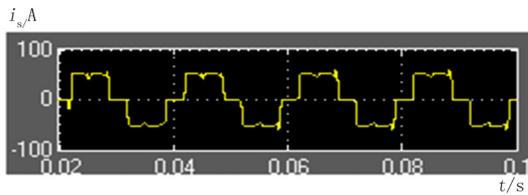


图 3 系统电流仿真波形 (a 相)

Fig.3 Waveform of system current (a phase)

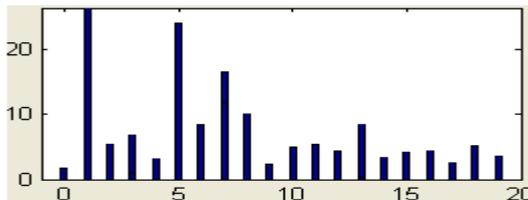


图 4 系统电流频谱图

Fig.4 Spectrum graph of system current

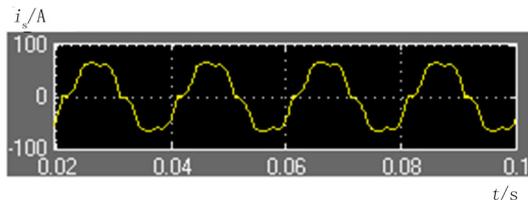


图 5 系统电流波形图

Fig.5 Waveform of system current

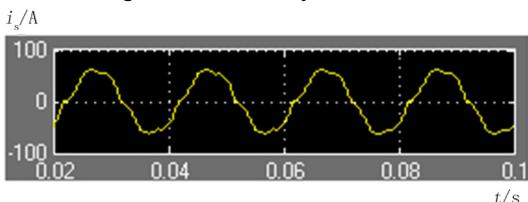


图 6 系统电流波形

Fig.6 Waveform of system current

优化前以及优化后的三组最优个体分别对负载电流进行滤波，系统电流的频谱分析图分别如图 7、图 8、9、10 所示，比较可知，优化后的滤波效果总体上来说均比优化前的滤波效果好，其中，经第一

组最优个体进行滤波后，对 5 次谐波的滤波效果比其他两组的效果要好，而第二组个体对第 7 次谐波的滤波效果又比另外两组效果明显，第三组则对 5、7 次谐波效果均不是太明显，但是对高次谐波的滤除效果要好。滤波过后系统电流的电流畸变率分别如表 2 所示。

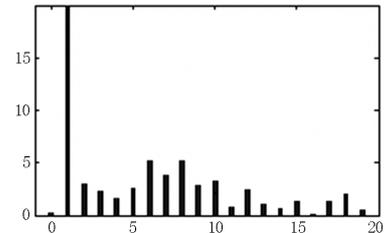


图 7 系统电流频谱图 (优化前)

Fig.7 Spectrum of system current (before optimization)

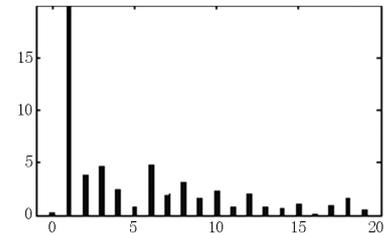


图 8 系统电流频谱图 (第一组)

Fig.8 Spectrum of system current (the first group)

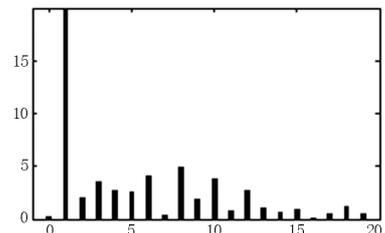


图 9 系统电流频谱图 (第二组)

Fig.9 Spectrum graph of system current (the second group)

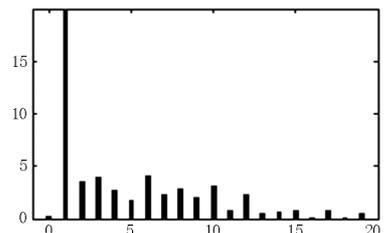


图 10 系统电流频谱图 (第三组)

Fig.10 Spectrum graph of system current (the third group)

表 2 无源滤波后系统电流的谐波总畸变率
Tab.2 THD of system current after passive filter

	滤波前	优化前	第一组	第二组	第三组
谐波畸变率	29.6%	13.9%	11.8%	11.4%	12.5%

图 6 和图 7 分别为优化前和优化后的无源滤波器投入后,再投入有源电力滤波器的系统电流仿真波形,可以看出优化前后系统波形也有较明显差异,且后者比前者效果较好。

经混合有源滤波器的滤波过后,系统电流的谐波畸变率分别如表 3 所示,可以看出,经过无源优化后的混合有源滤波器,对谐波的抑制作用,比没有进行无源优化的效果要好,具体情况如下:

在对 LC 滤波器参数进行优化的同时,由于参数的变化范围不大,所以在性价比上有了保证。另外,使用混合有源滤波器对系统谐波进行治理,不但可以较大程度的减轻谐波污染情况,还可以减小混合滤波结构中有源滤波器的容量,分别占所要补偿容量的 11%, 7%, 8%, 7%, 而使用常规型并联型有源滤波器时则为 25%, 明显减轻了有源滤波器容量,在造价和投资上占有很大优势,功率因数也从 0.86 分别提高到 0.90, 0.95, 0.91, 0.93, 可见效果比较明显。

表 3 混合滤波器投入后系统电流的谐波畸变率

Tab.3 THD of system current after hybrid APF

	优化前	第一组	第二组	第三组
谐波畸变率	4.51%	3.98%	3.46%	3.99%

在对最优个体选择时,应根据具体情况,选择性价比相对合适的设计参数,由于此次设计是针对 5 次谐波较为严重的情况,故选择优化后的第一组参数来进行设计,以保证设计的经济性和实用性。

5 结论

采用改进遗传算法,改善了以往遗传算法存在的早熟等问题,并得出了多组优化结果,通过仿真分析可知,经过该遗传算法优化之后的无源滤波器,在应用到本文采用的混合有源滤波器结构之后,较好的改善了其滤波效果,功率因数也提高了,相应的有源滤波器容量也有了相应的减小,混合有源滤波器的性价比得到了有效的提高。而且可以根据电力系统电网中实际存在的谐波情况,来调整滤波器的参数,对谐波进行治理,对电网的电能质量进行有效的改善。

参考文献

[1] Fujita H, Yamasaki T, Akagi H. A Hybrid Active Filter for Damping of Harmonic Resonance in Industrial Power Systems[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2000, 15(2): 215-222.

[2] 范瑞祥, 罗安, 李欣然. 并联混合型有源电力滤波器

的系统参数设计及应用研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 106-111.

FAN Rui-xiang, LUO An, LI Xin-ran. Parameter Design and Application Research of Shunt Hybrid Active Power Filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2):106-111.

[3] 何娜,徐殿国,武健.一种新型混合有源滤波器及其复合控制策略设计[J].电力系统自动化,2007,31(10):45-49.

HE Na, XU Dian-guo, WU Jian. A Novel Design Method and Compound Control Strategy for Shunt Hybrid Power Filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(10): 45-49.

[4] 涂春鸣, 罗安, 汤赐, 等. 注入式混合型有源电力滤波器的控制算法[J].电机工程学报,2008,28(24):52-58.

TU Chun-ming, LUO An, TANG Ci, et al. Control of Injection Type Hybrid Active Power Filter[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(24):52-58.

[5] GUAN Bai-li, XU Dian-guo, JIANG Zheng-mao, et al. Fuzzy Optimization of High-powered Passive Filter[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2004.1215-1222.

[6] 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 Jun-ling, JIANG Xin-jian, ZHU Dong-qi, 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.

[7] 李媛, 刘涤尘, 杜新伟, 等. 混合遗传算法在电力参数测量中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(12): 86-90.

LI Yuan, LIU Di-chen, DU Xin-wei, et al. Application of Hybrid Genetic Algorithm in Power System Parameter Measurement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (12): 86-90.

[8] 东南大学.电力系统[M].北京:电力工业出版社,1989.55-60.

Southeast University.Power System[M].Beijing: Electric Power Industry Press, 1989. 55-60.

收稿日期: 2009-02-19; 修回日期: 2009-03-16

作者简介:

侯世英 (1962-), 女, 教授, 从事电力电子技术应用及控制理论应用; E-mail: juan19830216@yahoo.com.cn

索利娟 (1983-), 女, 硕士研究生, 从事电能质量改善方面研究。