

改进的粒子群算法对无源滤波器参数的优化

缙新科^{1,2}, 洪 寒¹

(1. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 甘肃省工业过程先进控制重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 针对混合有源滤波器中无源滤波器设计过分依赖经验与无源滤波器优化能力不强的问题, 提出改进粒子群优化算法 PSO(Particle Swarm Optimization, PSO) 进行无源滤波器的多目标参数优化设计. 对无源滤波器的成本, 无功补偿容量及补偿后滤波效果 3 个目标全局优化. 利用改进的粒子群对其参数进行了优化设计, 使种群朝 3 个目标最佳协调点的方向进化. 通过仿真实验验证了优化设计的优越性和粒子群改进的有效性.

关键词: 混合型有源滤波器; 无源滤波器; 粒子群算法; 参数优化

中图分类号: TP711; TN713 文献标志码: A 文章编号: 1004-0366(2011)03-0110-05

Improved Particle Swarm Optimization of Parameters of PPF

GOU Xin-ke^{1,2}, HONG Han¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Science and Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Gansu Key Laboratory of Advanced Control for Industrial Processes, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Since the design of the passive power filter (PPF) in hybrid active power filters (HAPF) relies on experience too much and the PPF optimization is not strong enough, an improved particle swarm optimization (PSO) is proposed here to realize global optimization for multi-objective parameters of PPF, namely, the cost of PPF, its reactive compensation capacity and its compensation filtering effect. The improved particle swarm optimization (PSO) which optimizes parameters of PPF makes the population evolve toward the optimal coordination point of 3 targets. The simulation results show the superiority of optimization design and effectiveness of PSO.

Key words: hybrid active power filter (HAPF); passive power filter (PPF); particle swarm optimization; parameter optimization

随着电力电子器件在工业中的广泛应用, 电网的谐波污染问题日趋严重, 谐波治理已经迫在眉睫. 目前消除谐波的方法主要有无源滤波器 PPF (Passive Power Filter, PPF)、有源滤波器 APF (Active Power Filter, APF) 和大容量的 PPF 与小容量的 APF 共同构成的混合型滤波器 HAPF (Hybrid Active Power Filter, HAPF). 现针对一种比较有效, 实用发展前景广阔的并联混合型滤波系统进行研究. 无源滤波器主要进行谐波抑制和无功补偿, 有源滤波器主要用来改善无源滤波器的滤波特性. 因此对混合有源滤波器中的无源滤波器的研究有着良好

的经济性和实用性^[1-3]. 目前学者提出优化无源滤波器参数的算法有很多种^[4,5].

采用改进的粒子群算法对无源滤波器的参数进行多目标优化设计, 较全面地考虑了其初期投资、无功功率补偿容量以及滤波后电网谐波含量等问题. 通过粒子群算法使得这 3 个目标达到最佳协调点. 最后仿真实验表明, 经此优化设计后的无源滤波器及混合型有源滤波器系统具有良好的综合性能.

1 无源滤波器的参数优化模型

PPF 优化设计在考虑 PPF 设计原则的基础上,

往往重点考虑成本和滤波的效果. 通常 PPF 可以有很多不同形式的滤波器组合形式, 结构和参数并非唯一. 但基本上都应该遵循以下原则:

(1) 电容 C , 电感 L , 电阻 R 之间的关系满足串并联谐振的要求;

(2) PPF 的整体基波等效阻抗满足系统的无功补偿的要求;

(3) PPF 的整体阻抗不应与电网阻抗形成串并联谐振;

(4) 装置 PPF 后的电网谐波含量应满足国家标准(GB/T14549-1993);

(5) 各组 PPF 容量的计算不仅要包含各自所滤除的谐波容量, 还应该加上 10% 的谐波容量.

在用改进的粒子群算法对 PPF 优化设计时要考虑以下 3 个目标:

(i) 装设 PPF 初期投资最小, 即

$$\min F = \sum_{i=1}^n (k_1 R_i + k_2 L_i + k_3 C_i), \quad (1)$$

其中 F 为成本目标函数; k_1, k_2, k_3 分别为无源滤波器的电阻 R_i 、电感 L_i 、电容 C_i 所对应的单位价格因子;

(ii) PPF 的装设, 既不能出现无功功率过补偿现象, 又要使系统的功率因数尽量接近于 1, 即

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

其中 Q_{\min}, Q_{\max} 为 PPF 提供的基波无功功率的上、下限;

(iii) 所选择的 PPF 参数尽可能的降低电网谐波含量, 这里将系统的滤波效果用电流和电压的总谐波率作为衡量标准, 即

$$\min THD_I \text{ 且 } THD_I = \sqrt{\sum_i \left(\frac{I_{hi}^2}{I_1} \right)} \leq THD_{I_{\max}}, \quad (3)$$

$$\min THD_V \text{ 且 } THD_V = \sqrt{\sum_i \left(\frac{V_{hi}^2}{V_1} \right)} \leq THD_{V_{\max}}, \quad (4)$$

其中 THD_V, THD_I 分别为电压、电流的总畸变率; V_1, I_1 为基波电压和电流; V_{hi}, I_{hi} 为第 i 次谐波电压和电流; $THD_{V_{\max}}, THD_{I_{\max}}$ 分别为电压、电流总畸变率的上限, 一般根据国家标准(GB/T14549-1993) 来计算; $g_n(i)$ 为不同基函数所引起的系统响应.

在遵循 PPF 的设计原则的前提下, 通过改进粒子群算法对 PPF 进行优化, 使得上述目标函数达到协调的满意解的搜索问题.

2 改进的粒子群优化算法

2.1 基本粒子群

(1) 基本 PSO 算法原理 PSO 算法是群体智能

算法的一种. 它是由美国社会心理学家 James Kennedy 和电气工程师 Russell Eberhart 在 1995 年提出的, 该算法是以模拟鸟的群体智能为特征, 以求解连续变量优化问题为背景的一种优化算法^[7-11].

PSO 算法随机初始化一群粒子, 粒子规模为 n , 粒子解空间为 d 维. 每一次迭代, 粒子通过动态跟踪 2 个极值来更新其速度和位置.

更新公式为

$$v_{id}^{k+1} = \omega_{ij} v_{id}^k + c_1 r_1 (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (g_{id}^k - x_{id}^k), \quad (5)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1}, \quad (6)$$

其中 r_1, r_2 是 $[0, 1]$ 内的满足均匀分布的随机数; c_1, c_2 和 ω 分别为加速度因子和惯性因子; x_{id}^k, v_{id}^k 分别为第 i 粒子的第 k 次迭代中的位置和速度; p_{id}^k 为第 i 粒子的第 k 次迭代中的个体极值位置; g_{id}^k 为整个群体第 k 次迭代中的极值位置.

(2) PSO 算法流程 ① 初始化种群 x_i , 设定种群规模为 n , 迭代次数为 T , 初始化加速度因子 c_1, c_2 和惯性因子 ω , 并随机初始化种群的位置 x_{id} 和速度 v_{id} ; ② 计算各个粒子 x_i 的适应度, 如果好于该粒子当前的个体极值, 则将 p_{id}^k 设置为该粒子的位置, 且更新个体极值. 如果所有粒子的个体极值中最好的好于当前的全局极值, 则将 g_{id}^k 设置为全局极值; ③ 根据式(5)和式(6)对每一个粒子的速度和位置进行更新; ④ 根据位置约束条件判断 x_{id}^k 是否满足要求, 若是继续执行, 若否则转 ③; ⑤ 判断结束条件是否满足, 如果当前的迭代次数达到了预先设定的最大次数(或达到最小误差要求), 则停止迭代, 输出最优解, 否则转到 ②.

2.2 改进的粒子群

新惯性权重策略构造 AWPSO(A Inertia Weight Particle Swarm Optimization, AWPSO) ω 称为惯性权重(Inertia Weight), 它决定了粒子历史速度信息对当前速度信息的影响, 执行局部搜索与全局搜索之间的平衡角色. 此算法对基本粒子群的惯性权重重新构造. 进化公式为

$$z_{ij} = (c_1 r_1 (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (g_{id}^k - x_{id}^k)) / v_{id}^k, \quad (7)$$

$$\omega_{ij}^k = (\omega_{\max} - ((\omega_{\max} - \omega_{\min}) / it_{\max}) * k) * (1 / (1 + e^{-kk * z_{ij}})), \quad (8)$$

$$v_{id}^{k+1} = \omega_{ij}^k v_{id}^k + c_1 r_1 (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (g_{id}^k - x_{id}^k), \quad (9)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1}, \quad (10)$$

其中 z_{ij} 为粒子群进化因子; ω_{ij}^k 为惯性权重; it_{\max} 为迭代最大次数; ω_{\max} 和 ω_{\min} 分别表示最大最小惯性权重; k 为固定常数, 值的大小决定收敛速度的

快慢.

2.3 优化变量及适应度选择

以无源滤波支路中的电容作为变量来进行寻优,即令 $x_i = (c_5, c_7, c_H)^T$, 根据优化的目标构造的目标函数为

$$F_1(x) = F(x), \quad (11)$$

$$F_2(x) = C - \sum_{i=5,7,H} Q_i, \quad (12)$$

$$F_3(x) = THD_I, \quad (13)$$

其中3个函数都追求最小化,为了方便规划,对上述3个适度函数做统一处理,同时化为如下函数:

$$F'_i(x) = \frac{F_i(x) - F_{i\min}(x)}{F_{i\max}(x) - F_{i\min}(x)}, \quad (14)$$

其中 $i = 1, 2, 3$. $F_{i\min}(x), F_{i\max}(x)$ 为适度函数的最小值和最大值, $F'_i(x)$ 为新的适度函数.

通常,要使得这3个适度函数同时达到最小是不可能的.协调各适度函数之间的关系,使其都朝着最小化收敛.达到三者之间共同的最优化.现阶段,求解多目标函数的方法通常是把多目标转化为单目标求解.有利于减少计算,简化运算过程.通常对多个适度函数进行线性加权.但这样转化的总函数会出现多个极值点,容易陷入局部寻优.故此引进约束寻优的方法.通过对最关心的目标寻优,其他采用约束范围的方法来实现自己所需要的最优解.

3 算例仿真分析

以某变电站谐波治理的情况为例,对混合型有源滤波器中的无源滤波器的参数进行优化设计.该变电站的110 kV母线处主要的谐波次数为 $6k \pm 1$ 次.其中以5次,7次为主.总的畸变率为6.89%,功率因数为0.93左右,符合国家标准(GB/T14549-1993).其各次电流谐波见表1.

表1 滤波前各次谐波含量及国家标准

次数	谐波电流/A	国家标准值/A
5	59.65	26.41
7	28.33	19.81
11	15.26	12.28
13	8.25	10.43
17	5.96	7.92
19	4.38	7.13
23	8.10	5.94
25	7.98	5.41

采用的新惯性权重策略构造粒子群(AWPSO)利用矢量运算分析粒子进化公式,用一种新的方法

构造惯性权重公式,使惯性权重随不同代不同粒子不同维动态改变,加快粒子收敛速度和全局搜索能力.测试结果表明:AWPSO在收敛速度、收敛精度、全局搜索能力方面比基本粒子群算法均有不同程度上的提高.该算法能在50次代以内收敛到满意解.比传统的算法更加简单,易于实现,如图1、图2所示.

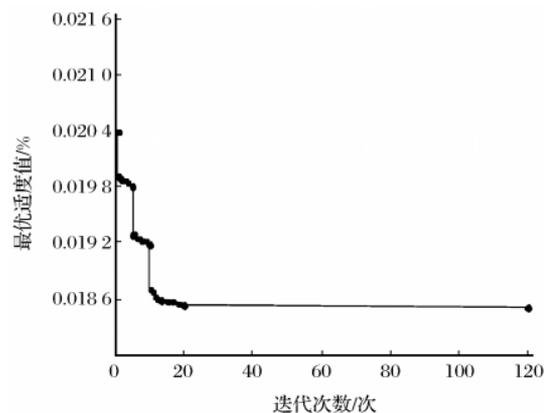


图1 基于AWPSO目标适应度值的进化过程

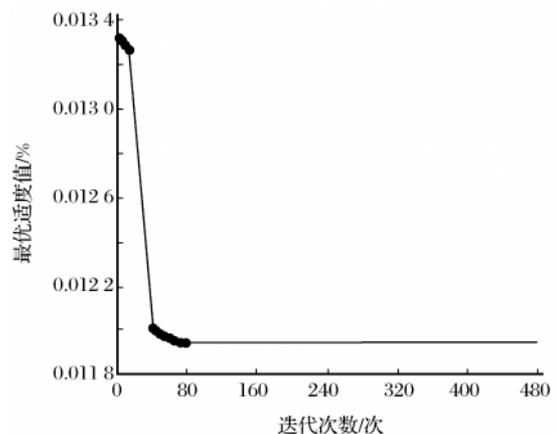


图2 基于基本PSO目标适应度值的进化过程

优化设计的3个目标最优不能同时达到.但是三者之间都能达到一个很好的协调点.此设计主要以考虑成本最优为主,无功补偿与滤波效果达到一定要求.这样在实现最经济的情况下,后两者可以通过混合型有源滤波器中的有源滤波器来消除.达到最优效果.我们采用如下优化方法来实现优化(见表2),滤波后各次谐波含量见表3.

经AWPSO优化设计后,采用模拟实验得出经过滤波后,系统谐波得到很好抑制.滤波后谐波电流得到了很好的抑制,也能节约一定的成本.和传统经验与基本PSO方法相比有很好的实效,如图3所示.

表 2 无源滤波器设计参数

滤波器	AWPSO 优化方法	基本 PSO 优化方法	传统 经验方法
5 次	$C_5=14.25 \mu\text{F}$ $L_5=29.37 \text{mH}$ $Q_5=60$	$C_5=14.16 \mu\text{F}$ $L_5=29.65 \text{mH}$ $Q_5=60$	$C_5=18.57 \mu\text{F}$ $L_5=22.57 \text{mH}$ $Q_5=60$
7 次	$C_7=5.37 \mu\text{F}$ $L_7=39.17 \text{mH}$ $Q_7=60$	$C_7=5.43 \mu\text{F}$ $L_7=38.50 \text{mH}$ $Q_7=60$	$C_7=6.03 \mu\text{F}$ $L_7=35.70 \text{mH}$ $Q_7=60$
高通	$C_H=11.22 \mu\text{F}$ $L_H=7.50 \text{mH}$ $Q_H=5$	$C_H=10.64 \mu\text{F}$ $L_H=7.70 \text{mH}$ $Q_H=5$	$C_H=5.40 \mu\text{F}$ $L_H=16.30 \text{mH}$ $Q_H=5$
补偿无功	0.970 Mvar	0.960 Mvar	0.936 Mvar
成本	节约 3.71%	节约 3.98%	—

表 3 滤波后各次谐波含量

次数	AWPSO 优化方法	基本 PSO 优化方法	传统 经验方法
5	11.96	12.14	10.70
7	7.15	7.02	6.46
11	8.46	8.64	11.63
13	4.00	4.06	5.09
17	3.58	3.62	4.19
19	2.68	2.89	3.30
23	5.13	5.17	5.82
25	5.37	5.41	6.07
η_{THD}	1.880%	1.892%	1.950%

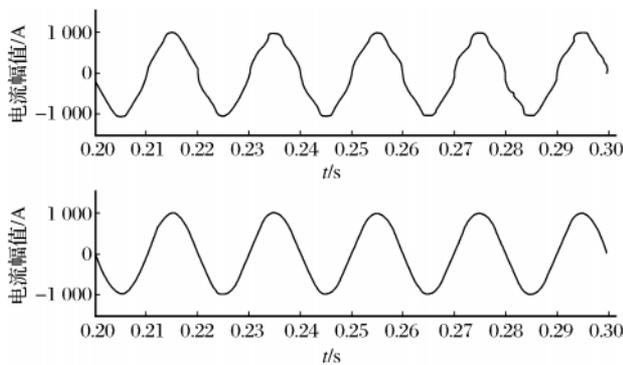


图 3 滤波前后电流波形

4 结论

针对混合有源电力滤波器(HAPF)中无源滤波

作者简介:

缙新科(1966-),男,甘肃省天水人,现任兰州理工大学电气工程与信息工程学院教授,硕士研究生导师.主要研究方向为智能结构及其动力学系统控制.

器参数设计,利用一种新粒子群多目标算法(AWP-
SO)进多目标线搜索与粒子群算法相结合的策略,
建立了 PPF 数学模型进行优化.优化结果表明:该
优化方法与以往的优化方法相比,AWPSO 在 50 次
的迭代次数内就能收敛到最优解,而基本粒子群不
仅需要 70 次的迭代才收敛,而且还有 3 次陷入局部
最优,所以 AWPSO 具有更加快速、简单、寻优能力
强的优点.经过 AWPSO 优化后的 HAPF 具有较好
的滤波效果,比传统经验方法节约了无源滤波器投
资的 3.71%,提高了其性价比,达到 HAPF 实用化
及谐波抑制的目的.

参考文献:

[1] 王兆安,杨君,刘进军.谐波抑制与无功功率补偿[M].北京:机械工业出版社,1998.

[2] 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.

[3] 陈峻岭,姜新建.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,2006,46(1):5-9.

[4] 任明,孙玉坤,饶翔.基于混沌遗传算法的滤波器优化[J].高电压技术,2009,35(6):1 439-1 445.

[5] 陶鸯,刘开培.C型滤波器在混合型有源滤波器中应用及优化[J].电力自动化设备,2009,29(2):39-44.

[6] 袁松贵,吴敏,彭赋,等.改进 PSO 算法用于电力系统无功优化的研究[J].高电压技术,2007,33(7):159-162.

[7] 何娜,黄丽娜,武建,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,2008,27(8):63-69.

[8] 徐刚,瞿金平.一种用于多目标优化的混合粒子群优化算法[J].计算机工程与应用,2008,44(33):18-21.

[9] 彭晓波,桂卫华,黄志武,等.GAPSO:一种高效的遗传粒子混合算法及其应用[J].系统仿真学报,2008,20(18):5 025-5 031.

[10] Eberbartr, Kennedy J. A New Optimization Using Pa-rticleswarm Theory[C]//Proceedings of the 16th International Symposiumon Micro Machine and Human Science. Nagoya, Japan: IEEE, 1995: 39-43.

[11] 孙小强,张求明.一种基于粒子群优化的多目标优化算法[J].计算机工程与应用,2006,42(18):40-42.

[12] Coello C A, Pulido G T, Lechuga M S. Hand-ling Multipleobj-ectives with Particle Swarm Optimization[J]. IEEE Transac-tionson Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 256-279.

[13] 缙新科,尹发根,陈莹,等.状态空间平均法在串联型有源电力滤波器建模中的应用[J].甘肃科学学报,2010,22(2):84-86.