

混合有源滤波器多目标优化设计

江友华, 廖代发, 唐 忠

(上海电力学院 计算机与信息工程学院, 上海 200090)

摘要: 针对混合有源滤波器参数设计和投资优化问题, 综合考虑其初期投资成本、无功补偿、滤波效果等指标, 提出一种基于遗传粒子群复合算法的混合有源滤波器多目标满意优化设计方法, 建立起容量配置的多目标数学模型, 并运用罚函数理论, 将多目标优化转化为单目标优化, 使混合有源滤波器容量分配问题简单化, 具有更大的适用性和灵活性. 然后在电力系统计算机辅助设计/电磁暂态(PSCAD/EMTDC)环境下, 对混合有源滤波器进行仿真分析, 结果表明此优化设计的混合有源滤波器性价比得到提高. 最后, 通过实验对比, 也验证了理论分析及相关结论的正确性.

关键词: 混合有源滤波器; 改进型粒子群算法; 多目标优化

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Multi-objective optimal design of hybrid active power filter

JIANG You-hua, LIAO Dai-fa, TANG Zhong

(School of Computer and Information Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: In dealing with the parameter design and the investment optimization of hybrid active power filter, we comprehensively consider the price, the reactive power compensation and the filter effect in a new mixed algorithm of genetic theory and particle swarm optimization. On this basis, the multi-objective mathematical model of capacity assignment is created and the penalty function theory is applied; and then, the multi-objective design is converted into a single-objective design, making the capacity assignment simple and flexible. Secondly, simulation analysis is carried on the power systems computer aided design/electromagnetic transients including DC(PSCAD/EMTDC); the results demonstrate that the cost performance of the hybrid active power filter is improved by using the proposed method. Finally, experimental results and comparison analysis are presented to confirm the above-mentioned method.

Key words: hybrid active power filter; improved particle swarm optimization; multi-object optimal design

1 引言(Introduction)

目前, 混合有源滤波器(HAPF)综合了无源滤波器(PF)和有源滤波器(APF)的优点, 是补偿系统无功、治理和抑制谐波、解决电能质量问题的有效装置^[1]. 然而混合有源电力滤波器的综合设计需要分配有源滤波器、无源滤波器各自容量配置, 又需要考虑其经济指标, 且要看最后补偿效果, 致使其相互之间互相耦合, 是典型的多目标、非线性优化问题. 鉴于此, 国内外已提出了不少混合有源滤波器的优化配置方法, 主要有基于遗传算法(GA)^[2,3]的和自适应遗传算法^[4]的多谐波源优化配置方法、基于粒子群算法(PSO)和改进粒子群算法^[5~7]的多目标优化设计. 但是, GA由于缺乏有效的局部区域搜索机制, 算法在接近最优解时收敛缓慢甚至出现收敛停止现象. PSO算法在早期也存在求解精度低、易

发散等缺点, 在收敛情况下, 粒子趋向同一化, 使得后期收敛速度明显变慢, 易陷入局部最优. 因此综合PSO和GA算法各自的优点, 有学者提出了基于GA和PSO的混合算法^[8,9], 并开始应用于电力系统无功优化之中^[10], 且达到了一定的理想效果.

为此, 本文把GA-PSO复合算法应用于混合有源滤波器(HAPF)的综合优化设计, 将HAPF的初期投资成本、无功功率补偿容量、滤波效果作为多个优化目标, 以其最佳“满意度”, 进行多目标综合寻优, 降低有源谐波补偿系统的投资, 提高其性价比, 并引入罚函数理论, 将多目标问题转化为单目标优化问题, 达到HAPF参数满意优化设计的目的. 最后通过PSCAD/EMTDC V4.2建立仿真模型, 综合比较验证了设计的有效性和实用性.

2 混合有源滤波器多目标优化模型(Multi-object optimal model of hybrid active power filter)

2.1 混合有源滤波器结构简图(Structural diagram of hybrid active power filter)

图1所示为一类适合中低压电压等级的HAPF常用网络拓扑结构简图. 图中: U_s 表示电网电压, i_s 表示电网电流, i_L 表示负载电流, i_c 表示控制电流, i_F 表示补偿电流, i_R 表示基波补偿电流, L_1, C_1 表示基波通路电感和电容, L_{na}, L_{nb}, L_{nc} 表示三相进行电抗器, C_G 表示滤波电容. 整个补偿系统由PPF和APF两部分组成, 直接并联挂在10 kV母线上, 并且APF支路中串联了基波并联谐振电路, 使得APF支路中不再受基波分量的影响, 极大的减小了逆变器的输出容量, 从而减小APF的初期投资. 无源滤波器主要滤除绝大部分5,7,11,13次谐波和补偿系统无功功率, 有源滤波器主要滤除高次谐波和改善系统阻抗的作用, 在负荷侧串联可控型电抗器 L_n , 通过调节 L_n 的大小可以解决由负荷引起的电压或者电流的谐波问题.

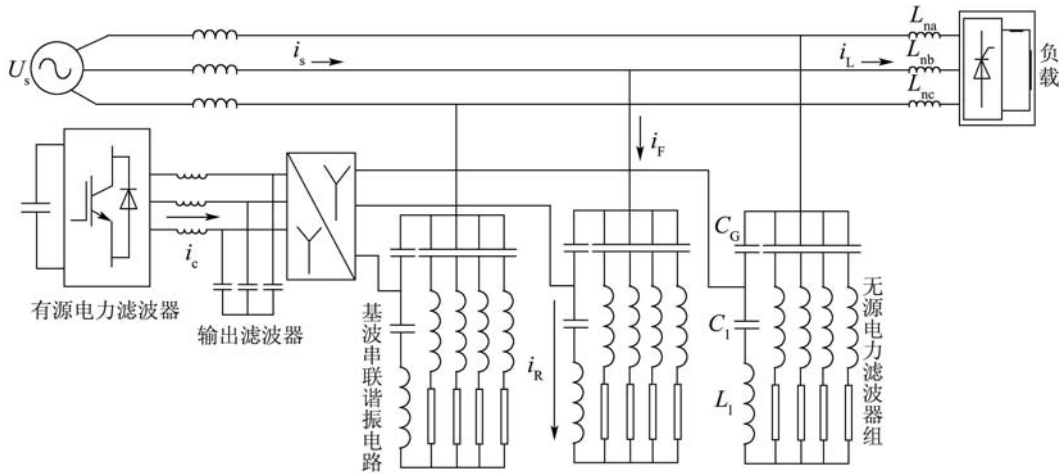


图1 混合型有源滤波器结构简图

Fig. 1 Structural diagram of hybrid active power filter

考虑到实际情况, 无源滤波器的电阻比较小, 通常可以忽略. 为此, 式(1)可简化如下:

$$\begin{cases} \min F_{PPF}, \\ F_{PPF} = \sum_{h=5,7,11,13}^N (K_1 C_h + K_2 L_h). \end{cases} \quad (2)$$

由图1可知有源滤波器(APF)流过的谐波电流为PPF滤波后其余的谐波电流, 通过一个并联基波谐振电路隔离了基波电压, 使得APF中产生的基波压降为零, APF不输出基波无功, 从而降低了APF的容量. APF的初期投资为 F_{APF} , 且

2.2 多目标优化问题描述(Multi-object optimal problem description)

当混合有源电力滤波器投入运行后, 系统要满足电网谐波标准, 在参数优化时要兼顾HAPF初期投资成本, 同时还要合理补偿系统无功功率. 因此对HAPF参数设计应综合考虑其初期投资成本、滤波效果、无功补偿等因素, 在满足电网电压和电流谐波标准及其一定无功补偿需求下, 优化PPF和APF的参数, 使系统达到很好的滤波效果又兼顾HAPF的初期投资成本, 使HAPF更加实用化.

1) 装设HAPF的初期投资包括PPF与APF两部分成本. 无源滤波器(PPF)初期投资设为 F_{PPF} , 且

$$\begin{cases} \min F_{PPF}, \\ F_{PPF} = \sum_{h=5,7,11,13}^N (K_1 C_h + K_2 L_h + K_3 R_h). \end{cases} \quad (1)$$

式中: K_1, K_2, K_3 分别为无源滤波器的电容 C_h 、电感 L_h 、电阻 R_h 所对应的单位价格因子; N 为无源滤波器的组数.

$$\min F_{APF}, F_{APF} = \beta + \alpha q_h, \quad (3)$$

$$q_h = \sum_{h=3}^n V_h \times \sum_{h=3}^n I_h, h=3, 5, 7, 9, 11, \dots, n. \quad (4)$$

式中: n 为系统谐波次数; APF的造价以其输出的无功容量 q_h 为自变量的分段线性函数; β 为有源滤波器的基价; α 为容量与APF造价的关联系数, 在实际的应用中谐波次数一般取到31次. 所以HAPF的初期投资为 F , 且

$$\min F, F = F_{PPF} + F_{APF}. \quad (5)$$

2) 装设PPF后, 考虑补偿效果因数, 其补偿量

既不能不足,又不能过量,即有

$$\begin{cases} \max \sum_{h=5,7,11,13}^m Q_h, \\ Q_{\min} \leq \sum_{h=5,7,11,13}^m Q_h \leq Q_{\max}. \end{cases} \quad (6)$$

式中 $Q_{\min}$, $Q_{\max}$ 为PPF提供的基波无功功率容量的上、下限。

3) 装设HAPF之后,具有良好的滤波效果,使电网谐波含量符合国家标准,使系统电压总的谐波畸变率和电流总的谐波畸变率符合国标(GB/T 14549-1993),且越低越好。

$$\begin{cases} \min \eta_{\text{THDU}}, \\ \eta_{\text{THDU}} = \sqrt{\sum_{h=2}^n \left(\frac{U_h}{U_1}\right)^2} \leq \eta_{\text{THDU max}}, \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \min \eta_{\text{THDI}}, \\ \eta_{\text{THDI}} = \sqrt{\sum_{h=2}^n \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \leq \eta_{\text{THDI max}}. \end{cases} \quad (8)$$

式中: η_{THDU} 为系统电压的总谐波畸变率; U_h 为系统 h 次谐波电压有效值; $\eta_{\text{THDU max}}$ 为根据国标计算的电压总谐波畸变率上限; η_{THDI} 为系统电流的总谐波畸变率; I_h 为系统 h 次谐波电流有效值; $\eta_{\text{THDI max}}$ 为根据国标计算的电流总谐波畸变率上限; n 为截取的谐波最高次数,在实际应用中一般取到31次。

为了更好地确保各次谐波都达到国家标准,在寻优过程中加入谐波电流和谐波电压国家标准的约束,如下:

$$U_h \leq U_{h \max}, I_h \leq I_{h \max},$$

式中 $U_{h \max}$, $I_{h \max}$ 为国家规定的各次谐波标准。

2.3 罚函数理论在多目标优化中的应用 (Application of penalty function theory in multi-object optimization)

在求解基于多约束条件下的多目标函数优化问题时,容易导致求解过程中部分全局最优解收敛于局部,影响了多目标优化的效率.因此本文引入罚函数理论来解决局部收敛问题,将多目标优化问题转化为单目标优化问题进行求解。

罚函数理论是一种将约束极值问题转化为无约束极值问题求解的有效方法,对于不等式约束问题:

$$\begin{aligned} \min f(x), x \in \mathbb{R}^n, \\ \text{s.t. } g_i(x) \geq 0, i = 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \quad (9)$$

由于不等式约束 $g_i(x) \geq 0, i = 1, 2, \dots, m$,等

价于等式约束 $\min(0, g_i(x)) = 0, i = 1, 2, \dots, m$.所以可将不等式约束问题转化为等式约束问题,构造函数为

$$F(x, \lambda) = f(x) + \lambda \sum_{i=1}^m [\min(0, g_i(x))]^2, \quad (10)$$

其中 λ 为罚因子,且

$$\begin{cases} \lambda \sum_{i=1}^m [\min(0, g_i(x))]^2 = 0, x \in D, \\ \lambda \sum_{i=1}^m [\min(0, g_i(x))]^2 > 0, x \notin D, \end{cases} \quad \lambda > 0. \quad (11)$$

HAPF的多目标综合优化设计中,以系统初期投资最小为目标,考虑基波无功功率补偿、滤波效果、电网谐波国标为约束,采用罚函数理论扩展的目标函数为

$$\begin{aligned} \min F = & F_{\text{PPF}} + F_{\text{APF}} + \lambda_1 \sum_{h=5,7,11,13} \left(\frac{\Delta Q_h}{Q_{h \max} - Q_{h \min}} \right)^2 + \\ & \lambda_2 \sum_{h=2}^n \left(\frac{\Delta \eta_{\text{THDU}}}{\eta_{\text{THDU max}}} \right)^2 + \lambda_3 \sum_{h=2}^n \left(\frac{\Delta \eta_{\text{THDI}}}{\eta_{\text{THDI max}}} \right)^2 + \\ & \lambda_4 \sum_{h=2}^n \left(\frac{\Delta U_h}{U_{h \max}} \right)^2 + \lambda_5 \sum_{h=2}^n \left(\frac{\Delta I_h}{I_{h \max}} \right)^2. \end{aligned} \quad (12)$$

其中约束条件表示如下:

$$\Delta Q_h = \begin{cases} Q_h - Q_{h \max}, & Q_h > Q_{h \max}, \\ 0, & Q_{h \min} \leq Q_h \leq Q_{h \max}, \\ Q_{h \min} - Q_h, & Q_h < Q_{h \min}, \end{cases}$$

$$\Delta \eta_{\text{THDU}} = \begin{cases} \eta_{\text{THDU}} - \eta_{\text{THDU max}}, & \eta_{\text{THDU}} > \eta_{\text{THDU max}}, \\ 0, & \eta_{\text{THDU}} \leq \eta_{\text{THDU max}}, \end{cases}$$

$$\Delta \eta_{\text{THDI}} = \begin{cases} \eta_{\text{THDI}} - \eta_{\text{THDI max}}, & \eta_{\text{THDI}} > \eta_{\text{THDI max}}, \\ 0, & \eta_{\text{THDI}} \leq \eta_{\text{THDI max}}, \end{cases}$$

$$\Delta U_h = \begin{cases} U_h - U_{h \max}, & U_h > U_{h \max}, \\ 0, & U_h \leq U_{h \max}, \end{cases}$$

$$\Delta I_h = \begin{cases} I_h - I_{h \max}, & I_h > I_{h \max}, \\ 0, & I_h \leq I_{h \max}. \end{cases}$$

于是通过罚函数理论将多目标优化问题转化为求取单目标最优化问题,且以函数的最佳“满意度”为原则进行优化求解。

3 GA-PSO复合算法(Mixed algorithm of genetic theory and particle swarm)

遗传算法(GA)由于缺乏局部区域搜索机制,在后期搜索效率低下,容易陷入局部收敛甚至出现收敛停滞现象.而粒子群算法属于进化算法的一

种, 从随机解出发, 通过迭代寻找最优解, 通过适应度来评价解的优劣. 在搜索过程中, 各个微粒根据自身的和同伴的飞行经验以一定的速度飞行, 追随当前的两个最优值来更新自己, 最终在搜索空间中找到全局最优解.

假设在 D 维搜索空间有 m 个粒子, 第 i 个粒子的位置为

$$X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})^T,$$

速度为

$$V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})^T,$$

个体极值表示为

$$P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})^T,$$

可以看作是粒子自己的飞行经验. 全局极值表示为

$$P_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})^T,$$

可以看作群体的经验. 对于第 $k+1$ 次迭代, 每个粒子飞行速度及其位移按照下式进行修正:

$$v_{id}^{k+1} = \omega \times v_{id}^k + c_1 \times \text{rand}(\cdot)(p_{id} - x_{id}^k) + c_2 \times \text{rand}(\cdot)(p_{gd} - x_{id}^k), \quad (13)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1}. \quad (14)$$

式中: 加速因子 c_1, c_2 通常取 $c_1 = c_2 = 1.45 \sim 1.5$, $\text{rand}(\cdot)$ 为 $[0,1]$ 之间的随机数, ω 为惯性权重, 影响其迭代次数及收敛速度. 为了提高熟练速度, 目前常用的方法是采用一种随着算法迭代次数的增加惯性权重线性下降的方法来修正 ω , 计算公式如下:

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{i_{\text{ter max}}} \times i_{\text{ter}}. \quad (15)$$

式中: $\omega_{\max}, \omega_{\min}$ 分别是 ω 的最大值和最小值, i_{ter} , $i_{\text{ter max}}$ 分别是当前迭代次数和最大迭代次数.

迭代过程中, 粒子的速度向量被限制在 $[-v_{\max}, v_{\max}]$ 之内, 以降低粒子飞出搜索空间的概率; 粒子的位置向量被限制在 $[x_{\min}, x_{\max}]$ 内. $x_{\min}$ 和 $x_{\max}$ 由实际问题决定, $v_{\max}$ 通常为 $k \cdot x_{\max}$, 其中 $0.1 \leq k \leq 1.0$.

在实际运算过程中, 发现PSO算法在早期存在精度低, 易发散的缺点. 在收敛情况之下, 所有的粒子都趋向同一化, 使得后期收敛速度变慢. 为了克服此不足, 采用复合粒子群算法, 既可以实现全局搜索, 又不至于陷入局部最优. 改进之处在于在GA-PSO算法中, 采用浮点编码, 种群数量 P_s , 粒子数 m , 加速因子 c_1, c_2 , 交叉率 P_c , 变异率 P_m . 在

复合算法中, 种群中的 P_s 个个体, 在GA中被看作为染色体, 在PSO中则为粒子. 在第 N 代群体里, 个体要经过提高、选择交叉、变异3个算子才能进入到 $N+1$ 代. 具体方法可以参考文献[6], 本文将不做具体阐述.

4 算法分析(Algorithm analysis)

取微粒的数目 $m = 50$, 加速常数 $c_1 = c_2 = 1.50$, 惯性权重 ω 按修正公式计算, 其中 $\omega_{\max} = 0.9$, $\omega_{\min} = 0.4$, 最大迭代次数为 $T = 250$, 节点电压最大畸变率 $\eta_{\text{THDU max}} = 5\%$, 有源滤波器的基价 $\beta = 35$, 单位为万元, 容量与造价的关联系数 $\alpha = 42$, 单位为万元/MVA. 图2为GA, PSO与GA-PSO优化设计过程仿真图. 从图中可以看出, 基于GA和PSO的优化程序也能很好的找到最优解, 但是GA和PSO速度明显比GA-PSO慢, 而且在实际的运行中容易陷入局部收敛.

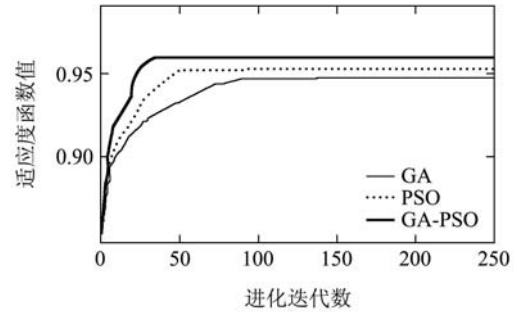


图2 适应度函数值优化过程

Fig. 2 Optimal process of fitness function value

本文利用Manitoba HVDC研究中心的PSCAD/EMTDC V4.2进行了仿真验证, 其主电路如图1所示. 其中电源线电压采用10 kV, 容量为100 MVA, 耦合变压器容量为4 MVA, 变比为10000:380, 基波谐振支路参数为 $C_1 = 960 \mu\text{F}$, $L_1 = 15.47 \text{ mH}$, 注入电容 $C_G = 19.65 \mu\text{F}$, 注入电容和基波谐振支路组成6次单调谐无源滤波器, 采用六脉冲整流桥作谐波源, 系统频率设为50 Hz, 采用基于瞬时无功功率理论的 $p-q$ 法进行谐波检测及其控制有源滤波器.

根据本系统参数和国标要求, 利用遗传算法(GA)、粒子群算法(PSO)和遗传粒子群算法(GA-PSO)对混合有源滤波器进行了参数设计, 其设计结果如表1所示.

从表1可以看出采用GA-PSO复合算法设计混合有源电力滤波器, 与已有的GA和PSO相比, 在滤波效果上略有上升, 基波无功补偿略有下降, 但是系统整体初期投资也有一定比例的下降. 结果表

明了基于GA-PSO复合算法的混合有源滤波器的多目标优化设计,达到预期目标.

通过对优化的混合有源电力滤波器仿真分析,

由结果可知电流总畸变率由原来的19.46%降低为滤波后的2.04%,改善了系统的运行条件.表2表示滤波前后系统主要各次谐波电流大小.

表1 不同设计方法的参数对比

Table 1 Parameter comparison of different design methods

补偿类型	GA	PSO	GA-PSO
5次谐波滤波支路参数	$G_5 = 125.44 \mu\text{F}$	$G_5 = 120.15 \mu\text{F}$	$G_5 = 117.03 \mu\text{F}$
	$L_5 = 3.24 \text{ mH}$	$L_5 = 3.41 \text{ mH}$	$L_5 = 3.46 \text{ mH}$
	$R_5 = 0.13 \Omega$	$R_5 = 0.12 \Omega$	$R_5 = 0.11 \Omega$
7次谐波滤波支路参数	$G_7 = 54.11 \mu\text{F}$	$G_7 = 59.56 \mu\text{F}$	$G_7 = 70.46 \mu\text{F}$
	$L_7 = 3.84 \text{ mH}$	$L_7 = 3.48 \text{ mH}$	$L_7 = 2.93 \text{ mH}$
	$R_7 = 0.21 \Omega$	$R_7 = 0.13 \Omega$	$R_7 = 0.15 \Omega$
11次谐波滤波支路参数	$G_{11} = 119.35 \mu\text{F}$	$G_{11} = 98.73 \mu\text{F}$	$G_{11} = 94.50 \mu\text{F}$
	$L_{11} = 0.76 \text{ mH}$	$L_{11} = 0.85 \text{ mH}$	$L_{11} = 0.89 \text{ mH}$
	$R_{11} = 0.05 \Omega$	$R_{11} = 0.07 \Omega$	$R_{11} = 0.10 \Omega$
13次谐波滤波支路参数	$G_{13} = 44.76 \mu\text{F}$	$G_{13} = 37.12 \mu\text{F}$	$G_{13} = 34.30 \mu\text{F}$
	$L_{13} = 1.37 \text{ mH}$	$L_{13} = 1.37 \text{ mH}$	$L_{13} = 1.70 \text{ mH}$
	$R_{13} = 0.11 \Omega$	$R_{13} = 1.62 \Omega$	$R_{13} = 0.13 \Omega$
高通滤波器	$G_H = 18.20 \mu\text{F}$	$G_H = 22.00 \mu\text{F}$	$G_H = 22.00 \mu\text{F}$
	$L_H = 3.57 \text{ mH}$	$L_H = 2.81 \text{ mH}$	$L_H = 3.10 \text{ mH}$
	$R_H = 12.43 \Omega$	$R_H = 11.30 \Omega$	$R_H = 12.06 \Omega$
HAPF 补偿容量/Mvar	2.2256	2.2505	2.1736
APF 补偿容量/MVA	0.0316	0.0312	0.0225
治理后 $i_{\text{THD}}/\%$	3.17	2.96	2.04
HAPF 初期投资/万元	451.032	451.876	445.494

表2 滤波前后谐波电流比较

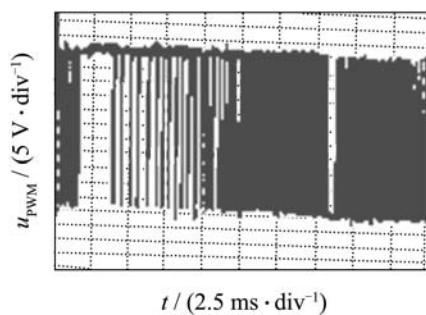
Table 2 Harmonic current comparison of different filter time

电流次数/次	5	7	11	13
滤波前/A	116.69	77.79	39.61	28.29
滤波后/A	16.27	12.02	6.36	7.07

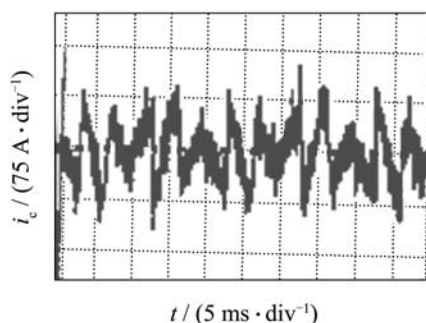
5 实验(Experiment)

按照上述分配原则,2006年给浙江某钢厂开发了一套混合有源滤波器装置,其中无源滤波器分别滤除5,7,11次谐波,其容量为400 kVA,有源滤波器容量为100 kVA.下面为现场测得的有源滤波器运行波形,其中图3(a)为PWM脉冲驱动波形,从波形中可以看出,PWM脉冲采用滞环控制,所以PWM周期并不固定,而是变化的;图3(b)为补偿谐波波形,其补偿特性比较好,可以及时,快速的补偿负载谐波;图3(c)为补偿前负载电流波形,由波形可以看出,其畸变率很高;图3(d)为补偿后负载电流波形,由波形可以看出,波形接近正弦波,

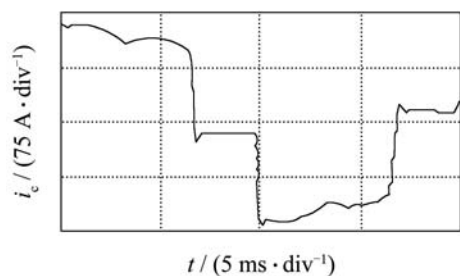
畸变率小,表明本方案补偿特性比较好.



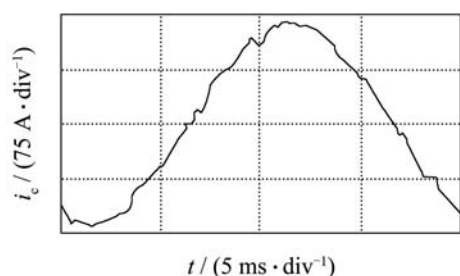
(a) PWM驱动波形



(b) 有源滤波器补偿电流波形



(c) 补偿前电流波形

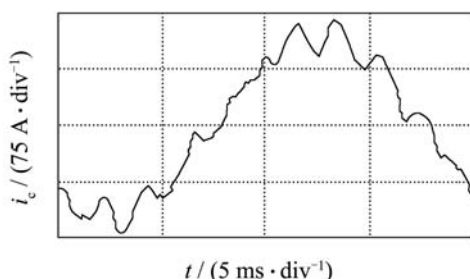


(d) 补偿后电流波形

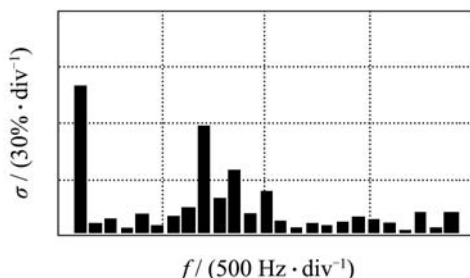
图3 有源滤波器现场运行波形

Fig. 3 Field running wave form of active power filter

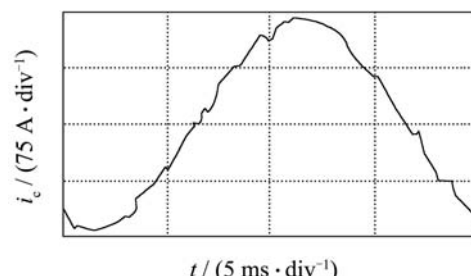
图4(a)、图4(b)为采用传统补偿策略得到的负载电流波形及频谱分析; 图4(c)、图4(d)为采用新补偿策略得到的负载电流波形及频谱分析. 由其负载电流波形和频谱波形对比可以看出, 新补偿策略得到的电流波形比较平滑, 接近正弦波, 谐波含量少.



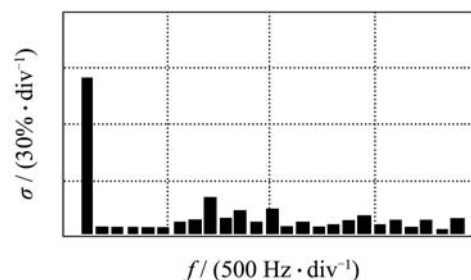
(a) 传统方法补偿效果



(b) 频谱分析



(c) 采用混合有源滤波器补偿效果



(d) 频谱分析

图4 不同补偿方法的试验结果对比

Fig. 4 Experiment result comparison of different

6 结论(Conclusion)

本文针对混合有源电力滤波器(HAPF)参数设计以及其初期投资问题, 提出了一种基于GA-PSO复合算法的多目标满意优化设计方法, 并应用罚函数理论将多目标问题转化为单目标优化问题, 建立了HAPF数学模型. 通过对PSCAD/EMTDC V4.2仿真环境下建立的HAPF模型仿真分析比较, 优化结果表明, 复合GA-PSO算法实现了HAPF容量的合理分配, 满足了系统无功功率补偿需求, 具有良好的滤波效果, 降低了HAPF的初期投资, 提高了性价比, 达到了HAPF实用化和谐波抑制及其无功补偿的目的.

参考文献(References):

- [1] DARWIN R, LUIS M, JUAN W. Improving passive filter compensation performance with active techniques[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2003, 50(1): 161 – 170.
- [2] 陈峻岭, 姜新建, 朱东起, 等. 基于遗传算法混合有源滤波器的参数多目标优化[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.)
- [3] 赵曙光, 王宇平, 焦李成. 基于自适应遗传算法的无源电力滤波器综合优化设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 173 – 176. (ZHAO Shuguang, WANG Yuping, JIAO Licheng. Adaptive genetic algorithm based on optimal design approach for passive power filter[J]. *Proceeding of the Chinese Society for Electric Engineering*, 2004, 24(7): 173 – 176.)

- [4] 余欣梅, 李妍, 熊信良, 等. 基于PSO考虑谐波影响的补偿电容器优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 26 – 30.
(YU Xinmei, LI Yan, XIONG Xinliang, et al. Optimal shunt capacitor placement using particle swarm optimization algorithm with harmonic distortion consideration[J]. *Proceeding of the Chinese Society for Electric Engineering*, 2003, 23(2): 26 – 30.)
- [5] 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, 28(27): 63 – 69.
(HE Na, HUANG Lina, WU Jian, et al. Multi-objective optimal design for passive part of hybrid active power filter based on particle swarm optimization[J]. *Proceeding of the Chinese Society for Electric Engineering*, 2008, 28(27): 63 – 69.)
- [6] 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): 5025 – 5031.
(PENG Xiaobo, GUI Weihua, HUANG Zhiwu, et al. GAPSO: effective genetic particle swarm Algorithm and its application[J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(18): 5025 – 5031.)
- [7] 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.
(YUAN Songgui, WU Min, PENG Fu, et al. Reactive power optimization of power system using the improved particle swarm optimization algorithm[J]. *High Voltage Engineering*, 2007, 33(7): 159 – 162.)
- [8] 彭磊, 张建平, 吴耀武, 等. 基于GA、PSO结合算法的交直流系统无功优化[J]. 高电压技术, 2006, 32(4): 78 – 81.
(PENG Lei, ZHANG Jianping, WU Yaowu, et al. Reactive power optimization of hybrid AC/HVDC power system based on genetic algorithm and particle swarm optimization[J]. *High Voltage Engineering*, 2006, 32(4): 78 – 81.)
- [9] EBERBART R, KENNEDY J. A new optimization using particle swarm theory[C] // *Proceedings of the 16th International Symposium on Micro Machine and Human Science*. Nagoya, Japan: IEEE, 1995: 39 – 43.
- [10] [10]KENNEDY J, EBERBART R. Partical swarm optimization[C] // *Proceeding of IEEE International Conference on Neural Networks*. Perth, Australia: IEEE, 1995.

作者简介:

江友华 (1974—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子技术及其在电力系统中的应用, E-mail: jyhua0306@sina.com;

廖代发 (1982—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统自动化, E-mail: liaodaifa0724@163.com;

唐忠 (1964—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统自动化, E-mail: tangzhong64@163.com.