

# 并联型有源滤波器的补偿策略研究

徐永海<sup>1</sup>, 刘书铭<sup>2</sup>, 朱永强<sup>1</sup>, 肖湘宁<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 河南电力试验研究院, 河南 郑州 450000)

**摘要:** 针对实际应用中有源滤波装置的补偿容量有限等问题, 阐述了并联型有源滤波器的补偿策略, 将有源滤波器补偿方案的选择和装置的补偿能力相结合, 讨论了装置的补偿容量能够满足补偿需要和装置的补偿容量不足两种情况下几种补偿方法的优劣。提出将遗传算法应用到有源滤波器中, 优化分配各次谐波补偿容量的方法, 并通过仿真, 验证了该方法可以在有限的补偿能力内, 使滤波效果达到最优。

**关键词:** 有源滤波器; 补偿策略; 补偿容量; 遗传算法

## Research of shunt active power filter compensation strategy

XU Yong-hai<sup>1</sup>, LIU Shu-ming<sup>2</sup>, ZHU Yong-qiang<sup>1</sup>, XIAO Xiang-ning<sup>1</sup>

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** Based on that the compensation capacity of the device used in practice is limited, this paper discusses strategy of shunt active filter compensation, combines the choice of compensation strategy of active filter with the compensation ability of devices, and discusses superiority and inferiority of the compensation strategy in two situations, one is that the compensation capacity can meet the needs of compensation, and the other is that the compensation capacity is less than the compensation. And this paper suggests using genetic algorithm in the active filter compensation strategy to optimize the distribution of the compensation capacity of each harmonic. Simulation verifies that the method can make the filtering effect achieve optimal results in a limited compensation capacity.

**Key words:** APF; compensation strategy; compensation capacity; genetic algorithm

中图分类号: TM76

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2010)08-0071-04

## 0 引言

电力电子装置和非线性负载的普遍使用, 使谐波电流和无功电流大量注入电网, 严重威胁电网和电气设备的安全运行与正常使用。并联型有源电力滤波器(APF)和无源滤波器相比不受电网阻抗的影响, 能对谐波和无功功率进行动态补偿, 是一种理想的谐波补偿装置<sup>[1]</sup>。APF的补偿原理是将检测环节得到的谐波电流作为指令信号, 驱动装置的IGBT开关动作, 输出一个与检测出的谐波电流相反的电流, 再输入系统达到滤波的效果。目前大多数文献对APF的研究主要集中在如何采用合适的控制策略使装置的输出结果较好地跟踪指令信号, 达到所需的补偿目标<sup>[2]</sup>, 即如何提高装置本身的性能, 而对

装置在实际应用中如何结合自身的补偿能力采用合适的补偿策略, 提高装置的实用性这方面的研究介绍的较少。由于大容量的APF存在造价高、功耗大、电磁干扰强等问题<sup>[3]</sup>, 实际应用中装置的补偿容量有限, 若系统运行条件比较恶劣, 所需的补偿容量大于装置的补偿能力时, 如何选择补偿策略使装置的补偿效果最优, 这方面的研究在装置的实用化过程中有着重要的作用, 本文结合实际算例, 比较分析了几种典型的补偿方案, 并将遗传算法应用于有源滤波器中<sup>[4-5]</sup>, 优化各次谐波的补偿容量, 提出一种基于遗传算法的有源滤波器的补偿策略, 并经过仿真, 验证了该方法的适用性。

## 1 补偿策略分析

在实际应用中, 装置采用的补偿方案不同, 所达到的滤波效果也不同。本文以某冶炼厂的实测谐

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2007BAA12B03)

波电流为例，比较不同的补偿策略的滤波效果。

某冶炼厂注入10 kV配网公共连接点的谐波电流的平均最大有效值如表1所示<sup>[6]</sup>。

表1 某冶炼厂注入10 kV配网公共连接点的谐波电流  
Tab.1 Harmonic currents injected into 10 kV distribution network at connection point by a smelter

谐波次数及谐波电流的平均最大有效值/A					
3	5	7	9	11	13
3.62	18.84	17.79	1.67	12.04	1.27
谐波次数及谐波电流的平均最大有效值/A					
15	17	19	21	23	25
1.00	1.19	1.71	0.33	1.06	1.10

注：其中带阴影的数据表示已超过国家谐波标准规定的限值。

对于标称电压为10 kV，公共连接点最小短路容量为50 MVA的系统，按照国家标准，允许电压总谐波畸变率为4%，允许的25次及以下各次谐波电流的方均根值如表2所示。

表2 注入公共连接点的谐波电流允许值  
Tab.2 Harmonic currents injected into distribution network at connection point of GB limit

标称电压 10kV 最小短路容量 50 MVA	谐波次数及谐波电流允许值 / A					
	3	5	7	9	11	13
	10	10	7.5	3.4	4.6	3.9
	谐波次数及谐波电流允许值 / A					
	15	17	19	21	23	25
	2.0	3.0	2.7	1.4	2.2	2.0

比较表1和表2可知，该冶炼厂的5次、7次、11次谐波电流严重超出国家允许标准，应予以治理。设APF装置能输出的最大补偿电流为30 A，补偿策略的制定结合装置的补偿能力，分别考虑装置能够满足补偿需要即装置的最大补偿容量能够使所有超出国家标准的各次谐波补偿到低于国家标准和装置的补偿容量不足两种情况。

### 1.1 装置的补偿容量能够满足补偿需要

若APF的补偿容量能够满足补偿的需要，应尽量使补偿后电网的谐波含量最小，补偿方案可分为只补偿超标次数的谐波和优化补偿各次谐波。

#### a) 只补偿超标次数的谐波

方案1：依据实际工程中，无源滤波器对各次谐波补偿容量的分配原则，按实际电网所含谐波电流的大小分配补偿容量，即某次谐波含量越大，应补偿的越多：

$$I_{ic} = \frac{I_{ie}}{\sum I_{je}} \times I_{hN} \quad (1)$$

其中： $I_{ie}$  为第*i*次超标的谐波电流； $I_{ic}$  为补偿的谐波电流； $I_{hN}$  为装置输出的补偿电流。

方案2：按国家标准允许的谐波电流值的大小分配补偿容量。如果标准允许的谐波电流值越小，则同样含量的情况下，实际补偿的谐波电流应该越多。所以补偿第*i*次超标的谐波电流应该按式（2）进行补偿：

$$I_{ic} = \left(1 - \frac{I_{iep}}{\sum I_{jep}}\right) \times \frac{I_{hN}}{j-1} \quad (2)$$

其中： $I_{iep}$  为超标的*i*次谐波电流的国家标准允许值。

方案3：综合考虑方案1、2的影响，将两个目标函数加权求和，取加权系数 $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 各为 $\frac{1}{2}$ ，分配补偿容量：

$$I_{ic} = \left(\omega_1 \frac{I_{ie}}{\sum I_{je}} + \omega_2 \frac{\sum I_{jep} - I_{iep}}{\sum I_{jep}} \times \frac{1}{j-1}\right) \times I_{hN} \quad (3)$$

根据上述三种补偿方案分配各次谐波的补偿容量，所得的数据如表3所示。

表3 三种补偿方案所得的数据  
Tab.3 Data of three kinds of compensation strategies

超标的 谐波次 数	方案1		方案2		方案3	
	补偿值 $I_{ic}/A$	补偿后 $I_i/A$	补偿值 $I_{ic}/A$	补偿后 $I_i/A$	补偿值 $I_{ic}/A$	补偿后 $I_i/A$
5	11.61	7.23	8.21	10.63	9.91	8.93
7	10.97	6.82	9.91	7.88	10.44	7.35
11	7.42	4.62	11.88	0.16	9.65	2.39
$THD_j$	4.84%		5.47%		5.07%	

比较三种补偿方案，方案1和方案2均存在不合理之处，两种方案都会出现对某次谐波补偿后仍然无法满足国家限制标准的情况。方案3综合考虑了实际谐波含量和国标允许值的影响，所得数据均满足要求，补偿效果较为理想。

#### b) 优化补偿各次谐波

该补偿方案是根据装置所能补偿的最大容量，以电流总畸变率最小化为目标函数，在满足补偿后各次谐波含量均不超标的情况下，合理地对各次谐

波进行补偿。为了对各次谐波多个补偿量找到最优解, 本文将遗传算法应用到有源滤波器的补偿策略中, 进行多变量寻优求解。

遗传算法是模拟达尔文的遗传选择和自然淘汰的生物进化过程的一种新的全局优化搜索算法, 它具有并行机制, 可对解空间进行多点、并行搜索, 适用于多变量的优化问题。

本文利用遗传算法对各次谐波电流的补偿容量进行分配, 具体的步骤为:

1) 将算法的决策变量即各次谐波电流的补偿值  $X = [I_{3c}, I_{5c}, \dots, I_{nc}]$ , 进行二进制编码。根据实测的各次谐波电流大小和表2中国标允许的各次谐波电流的大小, 同时满足不能过补偿的条件来确定各个决策变量的上下限。谐波电流补偿的上限为各次谐波电流的实测值  $I_i$ , 下限为谐波电流的实测值和国标允许值做差后与零比较, 两者中的较大值, 即  $\max\{I_i - I_{ip}, 0\}$ 。然后根据各个变量的上下限及搜索精度确定表示各决策变量的二进制串的长度, 这样就可以随机产生一个初始种群。

2) 将初始种群进行解码, 转换成由原问题空间的决策变量构成的种群, 便于计算相应的适应值。本文的适应度函数为总谐波电流畸变率函数:

$$fitness = \frac{\sqrt{\sum_{i=3}^n (I_i - I_{ic})^2}}{I_1} \quad (4)$$

然后根据选取的适应度函数评价每一个染色体的优劣作为遗传操作的依据。

3) 根据个体适应度的大小进行选择, 采用最优保存策略和比例选择法相结合的思路, 从当前种群中选出优良的染色体产生新的种群。对这个新的种群进行交叉和变异操作, 经过上述操作产生新的个体。

4) 对新的种群重复进行选择、交叉和变异操作, 经过一定次数的迭代以后, 把最好的染色体作为最优解, 即各次谐波电流的补偿值。

根据上述补偿方案分配各次谐波的补偿容量, 所得的结果如表4所示。

按照该方法进行补偿后, 所得电流总畸变率  $THD_I = 1.27\%$ , 和表3中的三种补偿方法相比, 由于该方法充分地利用了装置的补偿能力, 可显著降低  $THD_I$  值, 能够在不超过补偿容量的前提下, 达到最优的滤波效果。

表4 利用遗传算法寻优所得的谐波电流补偿结果

Tab.4 Compensation of harmonic currents by genetic algorithms optimization

谐波次数	3	5	7	9	11	13
补偿值 $I_{ic}/A$	3.30	17.97	15.94	1.32	10.72	0.78
补偿后电流值 $I_i/A$	0.32	0.87	1.85	0.35	1.32	0.49
谐波次数	15	17	19	21	23	25
补偿值 $I_{ic}/A$	0.59	0.86	1.65	0.05	0.99	0.32
补偿后电流值 $I_i/A$	0.41	0.33	0.06	0.28	0.07	0.78

## 1.2 装置的补偿容量不足

在谐波含量比较大的情况下, 若装置的补偿容量对补偿所有超标次数的谐波都无法满足时, 应尽量使电网谐波含量满足国家标准。

一种方法是首先对某次超标最严重的谐波进行补偿, 使其满足国家标准的情况下再去补偿另一次超标的谐波, 逐渐达到通过补偿使超标的谐波次数最少的目标。也可以通过遗传算法, 按照电网电流畸变率最小的原则对各次超标谐波的补偿量进行寻优, 确定对超标谐波的补偿大小。仍以该冶炼厂的谐波电流为例, 若装置能够输出的最大补偿电流为15 A, 无法满足通过补偿使所有超标的谐波符合国家的限制标准, 则按照上述两种补偿方案所得的结果如表5所示。

表5 两种补偿方案所得的数据

Tab.5 Data of two kinds of compensation strategies

超标的谐波次数	方案1		方案2	
	补偿值 $I_{ic}/A$	补偿后 $I_i/A$	补偿值 $I_{ic}/A$	补偿后 $I_i/A$
5	8.84	10.00	8.87	9.97
7	10.29	7.50	10.27	7.52
11	6.40	5.87	6.51	4.76
$THD_I$	5.64%		4.35%	

比较分析两种补偿方案, 由于装置的补偿能力有限, 按照方案1和方案2进行补偿都存在某次谐波无法满足国家限制标准的情况, 方案2在有限的补偿能力范围内, 合理地分配了各次谐波的补偿容量, 经过补偿, 电网的电流总畸变率比较小, 滤波效果更为理想。

## 2 仿真研究

根据表1的数据在PSCAD中建立该冶炼厂注入10 kV配电网系统的模型, 按照表3中不同的补偿策略

进行仿真，所得的系统电流波形如图1所示。

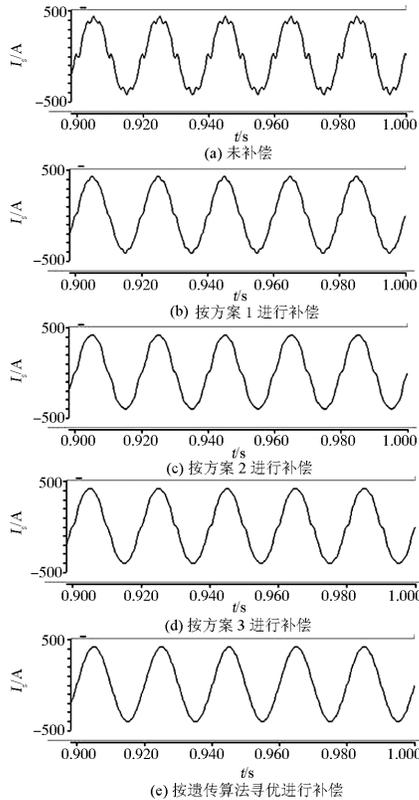


图1 注入点的电网电流波形

Fig.1 Current wave of distribution network at connection point

通过仿真可以看出，利用遗传算法合理地分配各次谐波的补偿容量，可以在装置补偿容量有限的情况下达到最优的补偿效果，是一种比较理想的补偿方法。

### 3 结语

本文将有源滤波器补偿策略的选择和装置的补偿能力相结合，进行了比较分析。将遗传算法应用到有源滤波器中，优化各次谐波的补偿容量，提出一种基于遗传算法的有源滤波器的补偿策略，并通过仿真，验证了该方法可以在装置的补偿能力范围内，达到最优的补偿效果。在实际应用中由于装置需要通过采样后按照遗传算法进行计算，分配补偿容量，再通过控制器驱动装置进行补偿，存在一定的时滞现象，并不适于在线计算，一般应用于谐波电流大小相对稳定的情况。

### 参考文献

[1] 肖湘宁，徐永海，刘昊. 混合型有源电力补偿技术与

实验研究[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(5):39-44.

XIAO Xiang-ning, XU Yong-hai, LIU Hao. Analysis of Hybrid Power Compensator and Its Experimental Study[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(5):39-44.

[2] 唐欣，罗安，涂春明. 一种电力有源滤波器电流控制的新方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (13) :36-39. TANG Xin, LUO An, TU Chun-ming. A New Method to Current Control of Active Power Filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004,28 (13): 36-39.

[3] 徐永海，肖湘宁，杨以涵. 低成本混合滤波方案及特性分析[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19 (12) :6-9,46. XU Yong-hai, XIAO Xiang-ning, YANG Yi-han. Research on Low Cost Hybrid Active Filter[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(12):6-9,46.

[4] 赵曙光，王宇平，等. 基于自适应遗传算法的无源滤波器综合优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(24).

ZHAO Shu-guang, WANG Yu-ping, et al. Adaptive Genetic Algorithm Based Optimal Design Approach for Passive Power Filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2007,27(24).

[5] 陈峻岭，蒋新建,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, 2006, 46 (1) : 5-8.

CHEN Jun-ling, JIANG Xin-jian, et al. Multi-object Optimization of Hybrid Active Power Filter Based on Genetic Algorithm[J]. J Tsinghua Univ: Sci &Tech,2006, 46(1): 5-8.

[6] 王莉娜. 厂矿企业配电网谐波治理控制策略和工程应用研究(博士学位论文)[D]. 武汉: 中南大学, 2003.

WANG Li-na. Research on Control Strategies and Engineering Application of Industrial Power Distribution Harmonic Eliminating, Doctoral Dissertation[D]. Wuhan: Central South University, 2003.

收稿日期: 2009-05-15; 修回日期: 2009-06-27

#### 作者简介:

徐永海(1966-), 男, 博士, 教授, 现从事电力系统谐波、电能质量方面的研究工作;

刘书铭(1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量分析与控制、电力系统谐波分析与综合治理; E-mail: losuwing@126.com

朱永强(1975-), 男, 博士, 讲师, 现从事电能质量和新能源方面的研究工作。