

文章编号:1671-251X(2013)11-0045-05

DOI:

刘艳英, 张晓, 王珂, 等. 有源电力滤波器无功补偿影响因素分析[J]. 工矿自动化, 2013, 39(11): 45-49.

有源电力滤波器无功补偿影响因素分析

刘艳英¹, 张晓¹, 王珂², 房康宁¹

(1. 中国矿业大学 信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221116;

2. 江苏省电力传动与自动控制工程技术研究中心, 江苏 徐州 221116)

摘要:在分析有源电力滤波器拓扑结构的基础上,研究了直流母线电压和进线电抗器的选择对有源电力滤波器无功补偿效果的影响,提出了基于电压平均值的电抗器改进选择策略。实验结果表明,直流母线电压为 720 V、APF 侧电抗器值为 1.5 mH 时,电网电流畸变率小,系统动态性能良好。

关键词:有源电力滤波器; 无功补偿; 谐波跟踪; 直流母线电压; 电抗器

中图分类号:TD611 文献标志码:A 网络出版时间:

网络出版地址:

Analysis of influencing factors on reactive compensation for active power filter

LIU Yan-ying¹, ZHANG Xiao¹, WANG Ke², FANG Kang-ning¹

(1. School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. Jiangsu Engineering Research Center for Electrical Drive and Control, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The paper studied influence of DC bus voltage and line reactors on reactive compensation effect of active power filter based on analysis of its topology, and proposed improved selection strategy of reactor based on average voltage. The experimental results show that grid current distortion is small, and system dynamic performance is good under the condition of DC bus voltage of 720 V and APF side reactor of 1.5 mH.

Key words: active power filter; reactive compensation; harmonic tracking; DC bus voltage; reactor

0 引言

随着自动化技术的发展,煤矿采用了很多大功率设备,如可控硅牵引装置、电力变压器等。非线性设备会产生大量电流谐波。随着功率的增大,谐波电流也递增,最大达到上千安培,致使电网电流的畸变率超过 50%。谐波电流不仅增加了矿用主变压器的发热现象,造成了大量电力损耗,缩短了电压器寿命,而且可能引起保护系统二次设备误动作,造成安全隐患。

采用并联型有源电力滤波器(Active Power Filter, APF)对谐波电流和无功进行彻底补偿,可使

网侧电流的畸变率控制在 5% 以内,不仅能耗低且不存在欠补和过补的情况。APF 可以对特征次谐波进行单独补偿,动态性能好,所以,被广泛应用于煤矿等工业领域,提高了煤矿电网环境的稳定性和安全性。要提高 APF 的稳定性和快速补偿性,进线电抗器和直流母线电压的选取至关重要。本文在分析 APF 拓扑结构的基础上,研究了进线电抗器和直流母线电压的变化对 APF 的影响。

1 APF 拓扑结构

两电平并联型 APF 的拓扑结构如图 1 所示,其中 e_a, e_b, e_c 为三相交流电源, R 为等效电路阻抗(一

收稿日期:2013-07-10。

基金项目:江苏省科技成果转化专项引导资金项目(BA2008029);科技部中小企业创新基金重点项目(11C26213204616)。

作者简介:刘艳英(1989—),女,山西太原人,硕士研究生,研究方向为谐波抑制及无功补偿, E-mail: liuyanyingcumt@163.com。

般很小,可以忽略), C_0 为高通滤波电容。

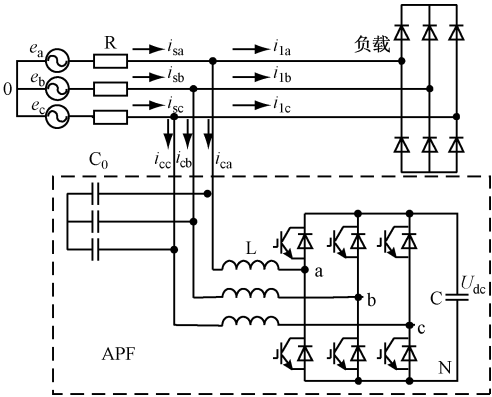


图1 两电平并联型 APF 拓扑结构

设三相输出电感均为 L , 直流侧电容为 C , 负载为非线性负载。定义两电平桥臂的开关函数为 $s_k(k=1,2,3)$ 。当 $s_k=1$ 时, 开关闭合; 当 $s_k=0$ 时, 开关断开。对于三相对称电路, $e_a+e_b+e_c=0, i_{ca}+i_{cb}+i_{cc}=0$ 。因此, 由图1可得 APF 回路的数学表达式^[1]:

$$\begin{cases} L \frac{di_{ca}}{dt} = (s_a - \frac{1}{3} \sum_{k=a,b,c} s_k) U_{dc} - e_a \\ L \frac{di_{cb}}{dt} = (s_b - \frac{1}{3} \sum_{k=a,b,c} s_k) U_{dc} - e_b \\ L \frac{di_{cc}}{dt} = (s_c - \frac{1}{3} \sum_{k=a,b,c} s_k) U_{dc} - e_c \\ C \frac{dU_{dc}}{dt} = - \sum_{k=a,b,c} s_k i_k \end{cases} \quad (1)$$

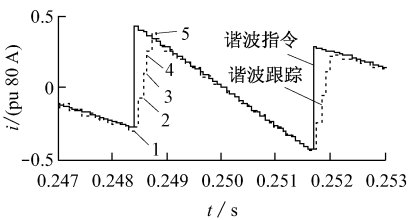
式中: i_{ca}, i_{cb}, i_{cc} 为 APF 输出三相电流; U_{dc} 为 APF 直流侧电容电压; s_a, s_b, s_c 分别表示 a, b, c 3 个桥臂的开关状态函数, 当对应桥臂上管导通时, $s_x=1$ (其中 $x=a, b$ 或 c), 当对应桥臂下管导通时, $s_x=0$ (其中 $x=a, b$ 或 c)。

由于电抗器 L 具有阻止电流变化的作用, 所以其取值会对 APF 的电流跟踪性能产生影响。电容在 APF 中起储能作用, 电容值越大, 电压波动越小, 但成本越大。直流母线电压的大小对补偿性能同样有着重要影响。

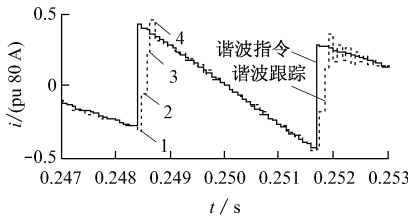
2 直流母线电压对 APF 的影响

对于式(1), 假设电网电压和电抗器 L 的值不变, 则直流母线电压 V_{dc} 越大, 电流变化能力越大, 补偿效果也就越好^[2-3]。直流母线电压为 1 020 V 和 720 V 时, 电流跟踪效果如图2所示。从图2可以看出, 直流母线电压为 720 V 时, 电流完全跟踪需要 5 个采样周期, 而 1 020 V 时则需要 4 个采样周期, 可见直流母线电压越大, 电流跟踪越快, 但其超

调量会增加。



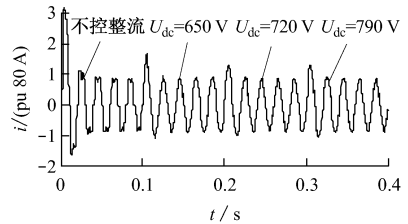
(a) 720 V 时的跟踪波形



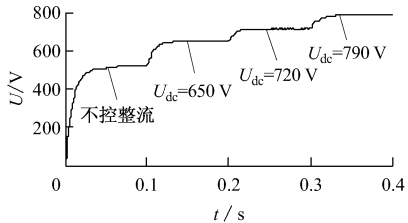
(b) 1 020 V 时的跟踪波形

图2 直流母线电压对电流跟踪的影响

通过 Matlab 仿真讨论直流母线电压对补偿效果的影响。设采样频率和开关频率为 12.5 kHz, 进线电抗器的值为 1.5 mH, 电网电压有效值为 360 V, 母线电压给定分别为 650, 720, 780 V, 对典型 6k±1 次谐波的补偿效果如图3所示。



(a) 补偿后电流波形



(b) 直流母线电压

图3 改变直流母线电压后的补偿效果

对图3中各补偿效果进行傅里叶分析, 结果见表1。从表1可以看出, 720 V 母线电压对应的补偿效果最好, 说明母线电压的选择对 APF 的补偿性能有着至关重要的影响。

表1 改变直流母线电压后的补偿电流畸变率

直流母线 电压/V	畸变率/%					电网电流/ (pu 80 A)
	5次	7次	11次	13次	总	
650	1.52	1.41	1.42	0.85	3.88	0.874 3
720	1.19	1.29	1.29	1.16	3.58	0.615 6
790	1.31	1.31	1.32	1.25	3.74	0.614 4

3 电抗器对 APF 的影响及其选择

3.1 电抗器对 APF 的影响

APF 在工业中主要补偿对象为晶闸管投切等非线性负载,其产生的电流谐波类似于二极管不控整流负载。为分析的方便和统一性,假设桥式整流触发角为 0° ,负载为阻感负载,电流波形接近正负交替的方波,三相各差 120° 。通过傅里叶分析^[3-4]得到 A 相非线性负载电流 i_a 的近似数学表达式:

$$i_a = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \sin \omega t + \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \sum_{\substack{n=6k\pm1 \\ k=1,2,3,\dots}} (-1)^k \frac{1}{n} \sin n\omega t \quad (2)$$

式中: I_d 为整流侧输出电流有效值; ω 为角频率, $\omega = 2\pi f$, 其中 f 为基频, $f = 50$ Hz。

i_a 除去 50 Hz 基频分量后即得到 APF 补偿电流, 设为 i_c 。假设电流补偿能力为 25 次谐波, 对傅里叶展开式进一步近似, 并对 APF 补偿电流求导可得电流变化率:

$$\frac{di_c}{dt} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \omega I_d (\cos 5\omega t + \cos 7\omega t - \cos 11\omega t - \cos 13\omega t + \cos 17\omega t + \cos 19\omega t - \cos 23\omega t + \cos 25\omega t) \quad (3)$$

负载电流变化率曲线如图 4 所示。从图 4 可以看出, 每个功率周期内电流变化率共有 8 次巨大跳变, 幅值约为 7.0。这些跳变是因为晶闸管投切瞬间负载电流不连续造成的。如果负载线路电抗很小, 则该跳变是不可避免的。

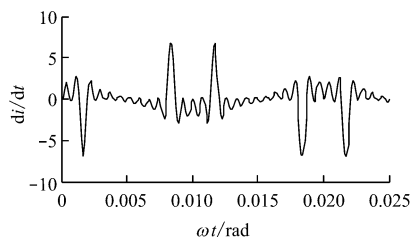


图 4 负载电流变化率曲线

分析 APF 主回路可得

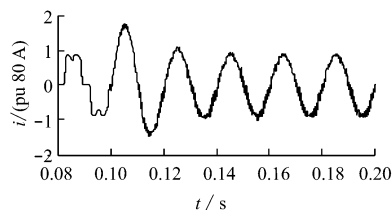
$$L \frac{di_c}{dt} = KU_{dc} - e_s \quad (4)$$

式中: K 为开关系数; U_{dc} 为直流母线电压; e_s 为电网电势。

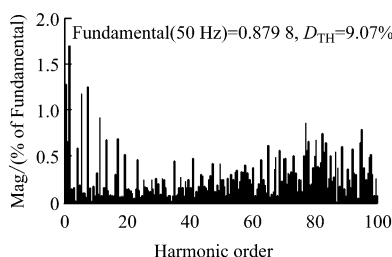
从式 (4) 可以看出, 开关系数 K 只可能在 $-2/3, 2/3, -1/3, 1/3$ 中取值, 直流母线电压 U_{dc} 在 APF 运行期间要保持恒定, 电网电势 e_s 是规律变化的。假设当等式右方取值不变时, 可以认为等式左边也为恒定, L 和电流变化率 di_c/dt 之间成反比。

即当 L 过大时, 电流变化率变小, 此时电感滤波效果增加, 补偿电流变化能力变小, 动态性能减弱, 无法快速跟踪陡变的负载电流。当 L 过小时, 补偿电流能够快速跟踪突变的谐波电流, 有很好的动态性能, 但补偿敏感, 在电流非突变区波动较大, 从而使得输出纹波增加, 补偿电流中含有大量的高次谐波。

对输出电抗器值为 1, 1.5, 3 mH 的情况进行仿真研究, 分别得到补偿后的网侧电流波形和频谱, 如图 5—图 7 所示。其中网侧电流波形先为不控整流波形, 0.1 s 切入 APF。

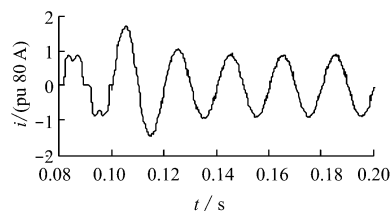


(a) 补偿后网侧电流波形

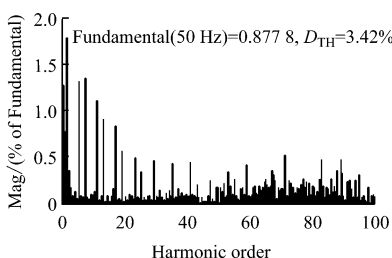


(b) 补偿后网侧电流频谱

图 5 电抗器值为 1 mH 时的补偿效果



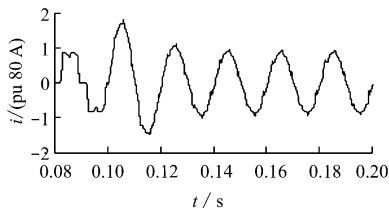
(a) 补偿后网侧电流波形



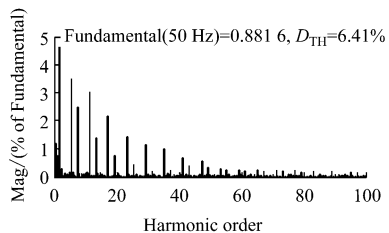
(b) 补偿后网侧电流频谱

图 6 电抗器值为 1.5 mH 时的补偿效果

从图 5—图 7 可以看出: ① 随着电抗器值的减小, 补偿后网侧电流纹波增大, 频谱上显示为高频成分明显增多, 这验证了上面的分析, 即电抗器增大后会滤除高频电流成分, 并使得跟踪减慢。② 当电抗

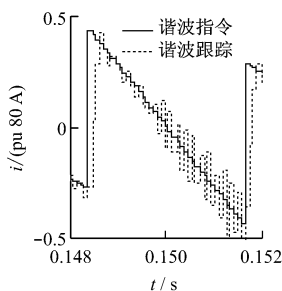


(a) 补偿后网侧电流波形

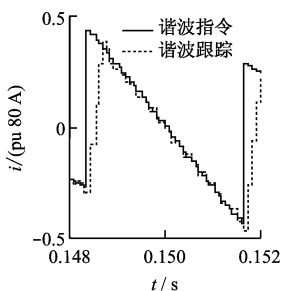


(b) 补偿后网侧电流频谱

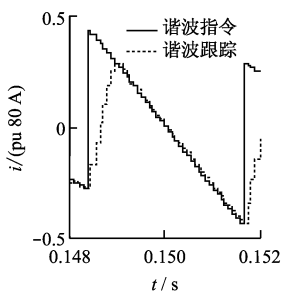
图 7 电抗器值为 3 mH 时的补偿效果



(a) 1 mH



(b) 1.5 mH



(c) 3 mH

图 8 电抗器取不同值时的电流跟踪效果

除此之外,电压最小值选择法的提出保证了 APF 的补偿能力,但仍不能兼顾各次谐波补偿效果。本文在电压最小值法基础上提出一种改进的方法,即平均电压值法。该方法能够兼顾各次谐波补偿效果,达到整体补偿跟踪的最佳效果。

当 APF 稳定运行时,有^[5]

$$L \leqslant 4U_{dc}/9 \left(\frac{di_c}{dt} \right)_{\max} \quad (5)$$

由参考文献[6]可知 $I_d = \sqrt{3/2}I_a$,从前面分析可知,负载电流变化率最大值为 7.0,结合式(2)及式(5)可得

$$L \leqslant 4U_{dc}/(9 \times 7.0 \times \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \omega \sqrt{3/2}I_a) \quad (6)$$

对于不控整流,负载电流 i_a 畸变率在 30% 左右,即有 $I_c = 0.3I_a$ 。假设补偿电流 I_c 为 20 A,直流母线电压为 720 V,带入式(6)可得输出电抗器值约为 1.5 mH。从前面的仿真可知,电抗为 1.5 mH 时系统补偿效果最佳,从而验证了本文电抗器选择方法的正确性。

器过大时,对陡变电流的跟踪能力下降,电流出现“猫耳朵”小尖峰,如图 5(a)所示。③ 当电抗器值取 1.5 mH 时,电流畸变率最小。

电抗器取不同值时的电流跟踪效果如图 8 所示。从图 8 可以进一步看出,电抗器值为 1 mH 时,陡变电流跟踪只用了 3 个单位周期,但其他区域跟踪的纹波增大。电抗器值为 3 mH 时,陡变电流跟踪效果明显下降,但其他区域跟踪效果最好。综合分析,电抗器值为 1.5 mH 时的电流跟踪效果最佳。

3.2 电抗器的选择

电抗器的选择方法主要有在假设基础上的坐标变换法和最高次谐波决定法。通过这 2 种方法选择的电抗器值较为粗略,并且只对特种谐波具有良好的补偿效果,忽略了其他次谐波的动态补偿特性。

4 实验分析

实验设置:三相电网电压有效值为 380 V,APF 侧电抗器值为 1.5 mH,直流母线电压为 720 V,采样频率和开关频率均为 12.5 kHz。利用 8 Ω 电阻模拟非线性负载。采用 LEM 传感器测量电压电流,母线采用并联薄膜电容 4 800 μ F,充放电电阻为 100 Ω 。主回路采用 FF650R17IE4 功率开关器件和 2SP0320T 驱动,并采用 TMS320X2812 DSP 作为核心控制单元^[7]。

在不控整流状态下投切 APF,波形如图 9 所示,其中锁相角为 1 V/div,电网电压为 200 V/div,直流母线为 200 V/div,补偿电流为 100 A/div。从图 9 可以看到,经 APF 补偿后,电网电流畸变率明显下降,用 FLUKE 谐波分析仪分析,电网电流畸变率由 25% 下降为 3.9%,可见补偿效果良好。

突变负载实验波形如图 10 所示,其中直流母线电压为 200 V/div,补偿电流为 100 A/div。突加负载是指负载电阻由 16 Ω 切换到 8 Ω ,突减负载是指

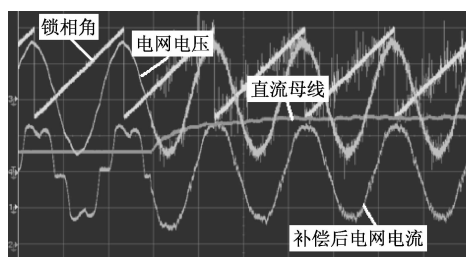
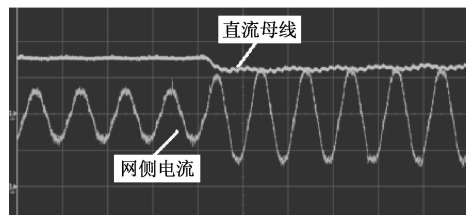
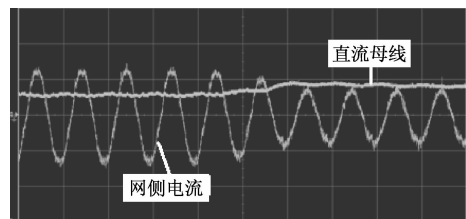


图 9 实测波形

负载电阻由 $8\ \Omega$ 切换到 $16\ \Omega$ 。从图 10 可以看出,系统响应时间小于 1 个工频周期,动态性能良好。



(a) 突加负载



(b) 突减负载

图 10 突变负载实验

5 结语

从 APF 主回路方程出发,对母线电压和电抗器

的补偿特性进行了深入分析和比较,并提出了母线电压和电抗器参数的选择方法。通过仿真对比和实验验证了该选择方法的准确性和可行性,该方法提高了 APF 的整体性能,对矿用 APF 系统参数选择具有指导意义。

参考文献:

- [1] 吴勇.有源电力滤波器若干关键技术研究[D].武汉:华中科技大学,2007.
- [2] 谢斌,戴珂,张树全,等.并联型有源电力滤波器直流侧电压优化控制[J].中国电机工程学报,2011,31(9):23-29.
- [3] 杨君,王兆安,邱关源.并联型电力有源滤波器直流侧电压的控制[J].电力电子技术,1996(4):48-50.
- [4] 魏学良,戴珂,谢斌,等.不平衡负载下并联有源电力滤波器的控制策略[J].中国电机工程学报,2008,28(24):64-69.
- [5] 刘聪,戴珂,张树全,等.并联型 APF 补偿电压源型非线性负载时谐波电流放大效应的研究[J].中国电机工程学报,2011,31(27):21-28.
- [6] 张国荣,齐国虎,苏建徽,等.并联型有源电力滤波器输出电感选择的新方法[J].中国电机工程学报,2010,30(6):22-27.
- [7] 郭鑫,袁海文,郑盾,等.独立电源系统有源滤波器输出电流相位对其补偿性能的影响[J].中国电机工程学报,2011,31(24):33-39.