

混合型有源滤波器在衡钢供电系统的应用研究及参数设计

陈艳¹, 王赛英²

(1. 湖南工学院, 湖南 衡阳 421008; 2. 衡阳钢管有限公司, 湖南 衡阳 421002)

摘要: 衡钢供电系统中主要为炼钢电弧炉、大功率整流设备及轧制机械等非线性谐波源负载, 产生大量的谐波电流, 并引起系统中电压畸变, 针对衡钢供电系统谐波治理现状, 利用现有的无源滤波器(PF), 提出了一种适合于衡钢供电系统谐波治理的并联混合型有源滤波器(APF)的拓扑结构, 并对其无源滤波部分和有源滤波部分的参数进行了设计。仿真结果表明并联混合型APF能够很好地滤除母线电流中的谐波分量, 具有较好的动态补偿和抑制谐波的能力, 具有重要的理论意义和工程实用价值

关键词: 有源滤波器; 供电系统; 谐波

Application research and design parameters of hybrid active power filter on the Hengyang steel electric power system

CHEN Yan¹, WANG Sai-ying²

(1. Hunan Institute of Technology, Hengyang 421008, China; 2. Hengyang Steel Tube Corporation, Hengyang 421002, China)

Abstract: The Hengyang steel electric power system mainly consists of the arc furnace, high power rectifier machinery and equipment for rolling, which are nonlinear harmonic sources, causing a great number of harmonic current and voltage distortion in the system. In view of the status of harmonic manage of the HengYang steel electric power system, using existing passive power filter (PF), put up with a suitable for harmonic manage of the HengYang steel electric power system topology of parallel hybrid harmonic active filter (APF), and design the parameters of its passive power filter segment and part of the active filter. The simulation results show that the hybrid-type filter APF is able to do well in the filtering harmonic of bus current, having good dynamic compensation and harmonic suppression capability, have important theory meaning and practical value of project..

Key words: active power filter; electric power system; harmonic

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)24-0051-07

0 引言

在供电系统中, 由于大量非线性负载向电网注入了大量的谐波电流, 严重污染了企业配电网和附近其他电力用户的安全用电环境, 治理电网谐波既是依法用电的强制要求, 也是电网安全经济运行的客观需要。装设谐波补偿装置最传统的方法是采用LC调谐无源滤波器PPF(Passive Power Filter)。随着电力电子技术的发展, 谐波治理的一个重要趋势是采用有源电力滤波器APF(Active Power Filter)。特别是混合型有源电力滤波器对系统电压或负荷电流进行谐波补偿是目前电力系统的重点研究课题。

1 衡钢供电系统的主要谐波源及现状分析

衡钢供电系统中设备主要为炼钢电弧炉、大功率整流设备及轧制机械。分为35 kV和6.3 kV供电系统, 负荷容量以35 kV系统为主, 二总降有

120 MVA主变压器各一台, 互为备用, 变压器一次连接方式为Y形, 二次连接方式为 Δ 形, 整个供电系统只对部分用电线路(35 kV)进行了LC无源滤波。

其中炼钢分厂建成于1991年7月, 有两台100吨高功率电弧炉(1#容量70 MVA, 2#容量18 MVA), 年产14万吨合格连铸坯。其供电是由220 kV变电站经35 kV II段母线送出。电弧炉变压器为70 MVA(+10%), 一次侧额定电压为35 kV, 一次侧额定电流为1154 A, 功率因数为0.8(估算值)。精炼炉变压器为18 MVA(+20%), 一次侧额定电压为35 kV, 一次侧额定电流为297 A, 功率因数为0.81^[1]。

炼钢区供电系统经常发生高压保险丝熔断、母线短路、电压互感器损坏、高压电缆被击穿、移相电容器“鼓肚子”、制氧站继电保护误动作等故障。产生上述故障主要原因是由于两台电弧炉炼钢时在熔化期经常发生工作短路, 产生很大的冲击电流, 引起电网电压剧烈波动, 又由于电弧本身为非正弦

形, 因此电弧炉产生了高次谐波电流, 引起电网电压波形畸变等^[2,3]。为了解决上述问题, 我们首先进行谐波等电能指标测试, 结果表明, 炼钢分厂 2 座电弧炉为主要谐波源, 其电压总畸变率、电压波动值和 2 次到 5 次谐波电流都超过“国际标准”, 谐波

电流详见表 1。两台电弧炉 35 kV 母线侧电压波动值为 16%, 远大于国家标准 2%, 35 kV 母线电压畸变率为 4.83%, 远大于国标 3%, 220 kV 母线电压波动值为 2.06%, 远大于国家标准 1.6%(GB 12326-90)。

表 1 电弧炉谐波电流实测超标情况

Tab.1 Situation of harmonic current of arc furnace exceeding the allowed figure

谐波次数	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
第一台电炉谐波电流 (35 kV 侧)/A	57.7	69.2	34.6	46.2	17.3	23.1	11.5	11.5	3.0	2.1
第二台电炉谐波电流 (35 kV 侧)/A	2.7	14.3	7.7	8.9	2.9	3.2	1.5	2.6	0.7	0.8
二台电炉谐波电流均 方根值/A	58	72	36	47	18	24	13	12	3	3
折算到 220 kV 谐波电 流值/A	9.3	11.5	5.8	7.5	2.9	3.9	2.1	1.9	0.9	0.9

衡钢供电系统已有的治理装置为一 2、3、4、5 次 LC 无源电力滤波器组, 可对其 35 kV 线路中谐波及无功进行治理, 提高系统的功率因数, 运行中滤波装置和电力系统中的谐波源并联。

但由于按 90 年代初检测的数据设计而成, 现有系统中的负荷已发生了很大的改变, 而且只能对部分线路(35 kV)进行补偿, 由于无源电力滤波器本身的不足等原因, 造成衡钢供电系统现在谐波污染仍然比较严重, 常引起通讯不正常, 变压器及线路发热严重, 电能计量不准, 有时会引起控制系统失控等, 需采用更合理的治理方式对该系统进行改进。

2 衡钢供电系统谐波治理方案选择

为了弥补衡阳钢管厂供电系统现有治理装置对谐波治理的不足, 改善现有无源补偿装置(PF)补偿效果, 又因所研究的供电系统中的谐波源主要为炼钢分厂电弧炉系统, 它向供电系统注入谐波电流, 因此谐波源在性质上属于电流型谐波源。所以选择适合电流源型谐波源的并联型有源电力滤波器, 利用原有的 LC 滤波器, 组成并联型有源滤波器(APF)与 PF 混合使用方式。此种方法中, 谐波和无功率主要由 LC 滤波器补偿, 而有源电力滤波器的作用是改善 LC 滤波器的滤波特性, 克服 LC 滤波器易受电网阻抗的影响、易与电网阻抗发生谐振等缺点。这种方式中有源电力滤波器不承受交流电源的基波电压, 因此装置容量较小。由于 LC 滤波器的存在避免了电源基波电压直接加在有源电力滤波器的逆变桥上, 这种方法可以充分利用装置已配接的 PF, 非常适用于大容量的谐波抑制。因此这种方法

也应是在现有治理的基础上非常适用的方法^[4-6]。

3 衡钢供电系统并联混合型有源电力滤波器的设计

3.1 并联混合型有源电力滤波器的拓扑结构

根据上述所选择的谐波治理方案, 下面给出了并联混合型有源电力滤波器(HAPF)的拓扑结构。见图 1。

图 1 针对非线性负荷的主要谐波分量分别设计相应次数的无源滤波器(如图 1 中单调谐滤波器分别构成 2、3、4、5 次滤波器)。

以电压型逆变器作为主要的有源部分, 采用基于 IGBT 模块的脉宽调制 PWM(Pulse Width Modulation)逆变器, 直流端为一大电容, 输出端接有输出滤波器, 以此来滤除开关器件通断造成的高频毛刺。有源部分通过耦合变压器与以多组单调谐滤波器组成的无源滤波器(PF)串联一起并联接入电网。逆变器只承受很小的基波电压, 因此装置有效地克服了有源滤波器的容量限制^[7]。

3.2 单调谐滤波器的设计

(1) 该 HAPF 中的无源电力滤波器主要起三种作用

- ①给电网谐波电流提供低阻抗通道, 分流大部分电网谐波电流;
- ②阻隔电网电压, 减小有源滤波器的耐压要求;
- ③有源电力滤波器谐波补偿电压转换成谐波补偿电流的媒介。

(2) LC 的数值

在实际工程中, 无源电力滤波器的电容容量决

定了滤波器的投资, 在根据谐波治理对象的谐波含量特点确定单调谐无源滤波器的具体滤波次数后, 为了达到相应的滤波效果, 并使投资最小, 通常采

用最小滤波电容安装容量法来确定滤波器的电容参数, 再计算电感参数, 其方法如下

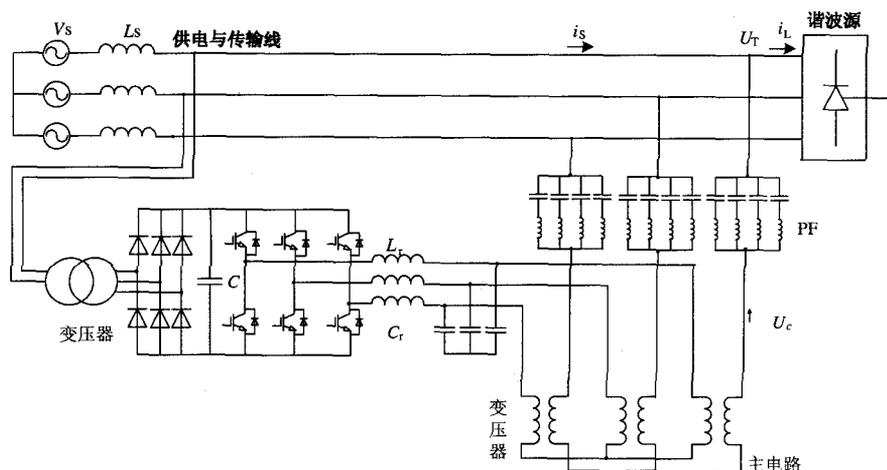


图1 并联混合型有源电力滤波器结构图

Fig.1 Parallel hybrid structure of the APF

调谐在第 \$n\$ 次谐波频率的单调谐滤波器有如下关系

$$n\omega_s L = \frac{1}{n\omega_s C} \quad (1)$$

在系统中由于谐波电压最终要被限制在很小的数值内, 可予以忽略, 因此滤波支路主要流过基波电压 \$U_{(1)}\$ 引起的基波电流 \$I_{f(1)}\$ 和 \$n\$ 次谐波电流 \$I_{f(n)}\$。结合式(1)可知

$$I_{f(1)} = \frac{U_{(1)}}{\frac{1}{\omega_s C} - \omega_s L} = \omega_s C \frac{n^2}{n^2 - 1} U_{(1)} \quad (2)$$

滤波电容器的安装容量 \$S_{(n)}\$ 应为基波无功容量 \$Q_{(1)}\$ 与 \$n\$ 次谐波无功容量 \$Q_{(n)}\$ 之和, 即

$$S_{(n)} = Q_{(1)} + Q_{(n)} = \frac{1}{\omega_s C} I_{f(1)}^2 + \frac{1}{n\omega_s C} I_{f(n)}^2 \quad (3)$$

滤波支路输出的基波无功容量为

$$Q_1 = U_{(1)} I_{f(1)} = \omega_s C \frac{n^2}{n^2 - 1} U_{(1)}^2 \quad (4)$$

由式(2) ~ (4), 将式(3)改写为

$$S_{(n)} = \frac{n^2}{n^2 - 1} \left(Q_1 + \frac{U_{(1)}^2 I_{f(n)}^2}{nQ_1} \right) \quad (5)$$

令 \$S'_{(n)}|_{Q_1} = 0\$ 可得到最小的安装容量, 相应得

输出基波无功容量为

$$Q_{L\min} = \frac{1}{\sqrt{n}} U_{(1)} I_{f(n)} = \omega_s C_{\min} \frac{n^2}{n^2 - 1} U_{(1)}^2 \quad (6)$$

因此, 得出最小电容器安装容量所对应的电容量为

$$C_{\min} = \frac{I_{f(n)}}{U_{(1)} \omega_s} * \frac{n^2 - 1}{\sqrt{nn^2}} \quad (7)$$

电感值 \$L\$ 由式(1)可知为

$$L = \frac{X_0}{n\omega_s} = \frac{1}{n^2 \omega_s^2 C_{\min}} \quad (8)$$

若此参数值还不能满足无功补偿容量的要求, 则可考虑加装并联电容器, 这样不但经济合理而且对滤波效果不会产生较大影响。

(3) 品质因素 \$Q\$

定义品质因素为谐振频率 \$\omega_n\$ 下 \$L\$ 或 \$C\$ 的电抗与 \$R_{f_n}\$ 的比值

$$Q = \frac{\omega_n L}{R_{f_n}} = \frac{1}{\omega_n R_{f_n} C} \quad (9)$$

滤波器的品质因素不能取得太大, 也不能取得太小。在工程上, 可采用如下的方法确定最佳 \$Q\$ 值

$$Q = \frac{\cos e + 1}{2t \sin e} \quad (10)$$

式中: \$e\$ 为电网系统的最大阻抗角; \$t\$ 为电网的最大频偏。\$Q\$ 值确定之后即可根据式(9)得到 \$R_{f_n}\$ 的大小。若电感器内存在的内阻还不够大, 可考虑添加外接

电阻器^[8]。

根据衡阳钢管厂的具体谐波状况, 结合上述原则, 即可设计出无源滤波器的具体参数, 见表 2。

表 2 LC 滤波器参数

Tab.2 LC filter parameters

2 次	$L=105.5 \text{ mH}/235 \text{ A}$	$C=24 \text{ }\mu\text{F}/16 \text{ kV}$	$R=1.325 \text{ }\Omega$	$Q=50$
3 次	$L=37.6 \text{ mH}/260 \text{ A}$	$C=30 \text{ }\mu\text{F}/16 \text{ kV}$	$R=0.708 \text{ }\Omega$	
4 次	$L=19.258 \text{ mH}/245 \text{ A}$	$C=32.9 \text{ }\mu\text{F}/16 \text{ kV}$	$R=0.484 \text{ }\Omega$	
5 次	$L=10.564 \text{ mH}/270 \text{ A}$	$C=38.4 \text{ }\mu\text{F}/16 \text{ kV}$	$R=0.332 \text{ }\Omega$	

3.3 有源部分的设计

有源部分的设计除电压型逆变器外, 主要还包括逆变器直流侧电容电压和容值、输出滤波器电感和电容参数和耦合变压器变比的设计。如果这些参数的设计不当, 将直接影响 APF 的滤波性能, 严重时还将导致 APF 因过流、过压而不能正常工作, 甚至毁坏。

(1) 输出滤波器的设计

有源逆变器输出电压中除了含有所需的补偿电压外, 还含有因功率器件的开断所带来的高频毛刺。如果将有源逆变器的输出电压直接加于注入电路, 显然会给电网带来新的高频谐波污染, 因此必须用输出滤波器将逆变器工作引起的高频毛刺滤除^[9]。上述结构 HAPF 中输出滤波器的单向等效电路如图 2 所示。

由图 2 可知, 耦合变压器一次侧的端电压等于电容 C_r 两端的电压, 因此, 设计输出滤波器, 主要是解决好电感 L_r 和电容 C_r 之间的分压问题。在 PWM 载波频率附近, L_r 和 C_r 应满足下列两个条件

① X_{Cr} 远小于 X_{Lr} , 目的是使有源逆变器输出的高频(开关频率)电压成分大部分降落在电感 L_r 上, 而电容 C_r 两端的电压近似为零。

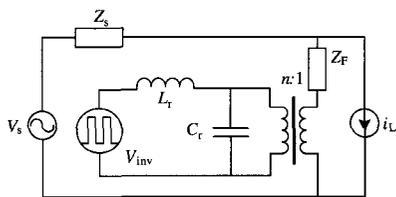


图 2 输出滤波器的单向等效电路

Fig.2 One-way filter output equivalent circuit

② X_{Cr} 、 X_{Lr} 远小于 $Z_{\text{sys(primary)}}$, $Z_{\text{sys(primary)}}$ 为系统在 PWM 载波频率下折合到耦合变压器一次侧的等效阻抗, 该条件的目的是保证分压是在电感 L_r 和

电容 C_r 之间进行, 受 $Z_{\text{sys(primary)}}$ 的影响不大。

$$Z_{\text{sys(primary)}} = n^2 * Z_{\text{sys(secondary)}} \quad (11)$$

式中: n 为耦合变压器的变比。

对于电网基波频率, 应有 X_{Cr} 、 $X_{Lr} < Z_{\text{sys}}$, 这是为降低有源滤波器容量而必须设计的。同时, 电容 C_r 的大小又会影响到有源电力滤波器的跟踪速度, 有源电力滤波器的跟踪速度是一个很重要的性能指标, 决定了在动态情况下, 有源电力滤波器的补偿效果。电容 C_r 越大, 有源电力滤波器的跟踪速度越慢, 因此, 电容 C_r 又不应该很大。

输出滤波器的截止频率应远离负载谐波电流的最高次频率。而且开关频率一般为几千赫兹或十几千赫兹以上, 所以高频开关纹波很容易被滤除。一般选输出滤波器的截止频率为 30 次谐波频率, 即 $f_0=1.5 \text{ kHz}$ 。

本文设计的 PWM 载波频率为 18 kHz, 选输出滤波器的截止频率为 30 次谐波频率, 参考无源滤波器的参数, 本文设计的输出滤波器的参数为

$$C_r = 40 \text{ }\mu\text{F}/1 \text{ kV}, L_r = 0.28 \text{ mH}/500 \text{ A}$$

忽略 Z_{sys} 的影响, 在不同频率下, L_r 和 C_r 的分压比如表 3 所示。

表 3 不同频率下, L_r 和 C_r 的分压比

Tab.3 Different frequencies, the voltage ratio between L_r and C_r

	18 kHz	50 Hz	2×50 Hz
U_{L_r}/U_{C_r}	143.11	0.0011	0.0044
	3×50 Hz	4×50 Hz	5×50 Hz
U_{L_r}/U_{C_r}	0.00994	0.0177	0.0276

由上表可知, 所设参数满足上述要求。

(2) 耦合变压器的设计

在 HAPF 中, 耦合变压器不仅可用来匹配有源部分的电压和电流, 而且可以起到电气隔离的作用, 使得逆变器的维护和绝缘都比较容易。在设计耦合变压器时, 应着重考虑变压器的变比, 变比的选择将决定后面逆变电路的电压和电流额定值。

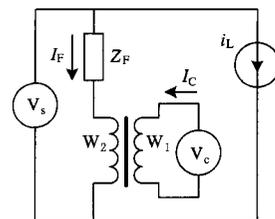


图 3 有源电力滤波器中耦合变压器的单相等效电路

Fig.3 APF in the single-phase transformer coupled equivalent circuit

图 3 给出了耦合变压器与系统的单相等效电路(输出滤波器未画出), 受控电压源 V_c 表示有源滤波器, 电压源 V_s 表示电网, 电流源 i_L 表示谐波源负载, Z_F 表示无源滤波器^[10]。

由图 3 可知, 耦合变压器二次侧 W_2 绕组承受的基波电压为

$$U_{W_2} = U_s \frac{Z_{r(\text{secondary})}}{Z_{r(\text{secondary})} + Z_F} \quad (12)$$

耦合变压器一次侧 W_1 绕组承受的基波电压为

$$U_{W_1} = nU_{W_2} \quad (13)$$

其中: U_s 为母线电压, $Z_{r(\text{secondary})}$ 为耦合变压器二次侧的等效阻抗。

$$Z_{r(\text{secondary})} = \frac{1}{n^2} Z_{r(\text{primary})} = \frac{1}{n^2} \frac{1}{\frac{1}{R + j\omega_1 L_r} + j\omega_1 C_r} \quad (14)$$

$$Z_F = \frac{1}{\sum_{k=2}^s \frac{1}{R_k + j\omega_1 L_k} + \frac{1}{j\omega_1 C_k}} \quad (15)$$

式中: R 为耦合变压器一次侧电路的等效电阻, 由于 R 很小, 可忽略之。

$$n = \frac{w_1}{w_2} \text{ 为耦合变压器的变比。}$$

混合有源电力滤波器在正常工作时, 耦合变压器的副边 W_2 绕组主要流过全部负载谐波电流和少量的基波电流, 显然, 电流的大小主要决定于负载谐波电流的大小。原边 W_1 绕组两端的谐波电压即为有源逆变器的输出电压, 该部分电压的大小主要决定于电网残余谐波电流的大小。经过补偿后, 电网残余谐波电流很小, 因此, 原边 W_1 绕组两端的谐波电压并不大。补偿前, 由表 1 可知, 电网总的电流畸变率最大可达 9.67%, 完全补偿时, 滤波器支路应流过全部负载谐波电流, 即耦合变压器的副边 W_2 绕组中流过最小 $I_1 \times 9.67\% = 115.23$ A 的谐波电流, 其中, $I_1 = 1191.6$ A 为负载基波电流有效值。经过混合有源电力滤波器补偿后, 电网总的电流谐波畸变率应小于 3% (目标值为 3%), 即最大仍残余有 3% 的谐波, 有源逆变器将施加大约 $K \cdot (I_1 \cdot 3\%)$ 的电压于耦合变压器的原边 W_1 绕组两端, 假设 $K=10$, 那么 $K \cdot (I_1 \cdot 3\%) = 357.48$ V。由于功率开关器件是分等级的, 比如说 IGBT, 就分 600 V/20 A、1200 V/600 A

等。并不是任何电压和电流的都有, 所以在有源逆变器容量为定额时, 还需要通过耦合变压器按上述参数来进行匹配, 使功率开关器件的容量得到充分的利用。根据有源逆变器开关器件耐压、耐流的要求, 就可选择适当的变比, 本文中耦合变压器的变比选为 $n=W_1:W_2=1:3, 1000$ V/2000 V, 容量为 200 kVA。

当母线电压为 35 kV 时, $n=W_1:W_2=1:3$ 时, 耦合变压器原副边的基波电压可通过式(12)~(13)求出。

(3) 逆变器直流侧电容的设计

有源逆变电路中的电容的作用是稳定电压, 理论上电容值越大越有利于电压的稳定, 但大电容成本高, 体积大, 不利于现场应用。工程实践中确定电容量的主要依据是限制逆变器工作在最低输出频率和额定输出电流时直流电压的低频脉动率。所需滤波电容量可按工程经验公式计算。

$$C = \frac{I}{afU_d} H \quad (16)$$

式中: I 为逆变器的额定输出电流方均根值; U_d 为直流电压平均值; f 为逆变器的最低输出频率; a 为允许的直流电压频率低峰值纹波因数; H 是与负载位移因数角有关的系数。

在有源电力滤波器的控制中, 若需要调制的信号是指令电压信号 $u_c^* = Ki_{sh}^*$, 则根据 PWM 调制原则有源电力滤波器的直流侧电容电压 $2U_{CD}$ 应满足下列关系式

$$2U_{CD} = 2u_{cmax}^* / \eta = 2Ki_{shmax}^* / \eta \quad (17)$$

式中: i_{shmax}^* 为有源逆变器指令电流信号的最大幅值; K 为增益; η 为 PWM 调制的调制度。根据三角波调制法的定义, $0 \leq \eta < 1$ 。通常为了取得最佳的 PWM 调制的效果, 令 $\eta=0.8$, 代入上式得

$$2U_{CD} = 2.5Ki_{shmax}^* \quad (18)$$

不过, 实际应用时, 考虑到逆变器死区效应的影响, 直流电容电压取值应比计算值略大一点^[11~13]。

(4) PWM 逆变器主电路的设计

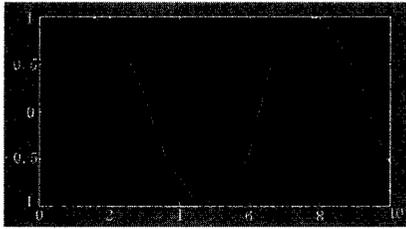


图 4 未投入并联混合有源滤波器时母线电流波形

Fig.4 Waveforms of having not input parallel hybrid bus at the APF current



图 5 投入无源滤波器后母线电流波形

Fig.5 Waveforms of bus current after the no source electric power filter input

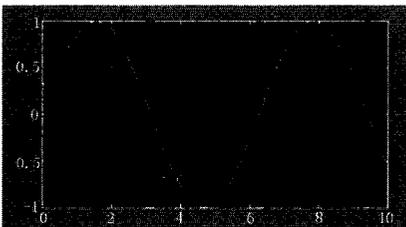


图 6 投入并联混合有源滤波器时母线电流波形

Fig.6 Waveforms of current bus after the hybrid APF input

大功率的逆变屏是整个有源滤波器的关键技术难点所在。其中 IGBT 选用了日本三菱公司生产的智能 IGBT 模块——PM600HSA120, 其内部集成了驱动电路和多种传感器, 具有多种保护功能, 如驱动欠压保护、过流保护、桥臂短路保护及过热保护等, 使用时, 只需提供 IGBT 的驱动电源和开关控制信号即可, 从而使得可靠性大大提高, 并有助于促成系统硬件结构的紧凑性。PM600HSA120 的额定工作电流为 600 A, 电压耐量为 1 200 V, 开关时间分别为 $t_{on} = 2.5 \mu s$ 、 $t_{off} = 4 \mu s$, 最大开关频率为 20 kHz, 是整套系统最重要器件。

利用 Matlab 软件中的 Simulink 模块对混合有源电力滤波器系统进行建模仿真, 仿真模型中的 POWERGUI 模块能够很方便地对并联混合型有源电力滤波器投入前后系统电流的谐波含量情况进行仿真分析, 图 4~6 是用 Scope 检测到的投入并联混合有源电力滤波器前后的电网电流波形。通过图 4~6 比较可以看出, 所设计的并联混合有源电力滤波器能够有效地抑制电网谐波, 使得电网谐波电流大大

降低^[14,15]。

4 结论

在配电网中应用有源电力滤波器(APF)特别是混合型有源电力滤波器对系统电压或负荷电流进行谐波补偿是目前电力系统的重点研究课题。

本文针对衡钢供电系统谐波治理现状, 提出了一种适合于衡钢供电系统谐波治理的并联混合型 APF 的拓扑结构, 并对无源滤波部分和有源滤波部分的部分参数进行了设计。利用 Matlab 仿真软件进行仿真实验, 仿真结果表明并联混合型 APF 能够很好地滤除母线电流中的谐波分量, 具有较好的动态补偿和抑制谐波的能力。

参考文献

- [1] 衡阳钢管有限责任公司 Φ100 无缝钢管机技改项目原料配套系统工程技术文件. 15-46. The Engineering Technical Documents of Hengyang Steel Tube Co., Ltd. Φ100 Seamless Steel Tubes For Technology Projects Supporting Materials Systems. 15-16.
- [2] 胡建中. 电弧炉的谐波治理及其效果 [J]. 冶金动力, 2005, 112(6): 33-36. HU Jian-zhong. The Governance and Effectiveness of the Arc Furnace Harmonic [J]. Metallurgical Power, 2005, 112(6): 33-36.
- [3] 邓霏, 周有庆, 李新平. 电弧炉谐波电流的产生和抑制 [J]. 电气开关, 2005, 43(01): 1-3. DENG Fei, ZHOU You-qing, LI Xin-ping. The Production and Inhibition of the Arc Furnace Harmonic Current [J]. Electric Switchgear, 2005, 43(01): 1-3.
- [4] 庄宏. 并联有源滤波装置选型方法 [J]. 电气技术, 2006(7): 42-45. ZHUANG Hong. The Selection Method of Parallel Active Filter Device [J]. Electrical Engineering, 2006(7): 42-45.
- [5] 丁洪发, 段献忠, 朱庆春. 并联型混合有源滤波器的新型控制策略 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(8): 55-58. DING Hong-fa, DUAN Xian-zhong, ZHU Qing-chun. The New Control Strategy of Parallel Hybrid Active Filter [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2006, 34(8): 55-58.
- [6] 黄慧群. 长钢四区供电系统分析与方案选择 [D]. 重庆: 重庆大学, 2005. HUANG Hui-qun. The Analysis and Options of Power System in the Forth Region of Chang Steel Group [D]. Chongqing: Chongqing University, 2005.
- [7] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿 [M].

- 北京: 北京机械工业出版社, 1998.
- WANG Zhao-an, YANG Jun, LIU Jin-jun. Harmonic Suppression and Compensation of the None Power[M]. Beijing: China Machine Press, 1998.
- [8] 范瑞祥, 罗安, 周柯, 等. 并联混合型有源电力滤波器的建模和控制策略分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 55-61.
- FAN Rui-xiang, LUO An, ZHOU Ke, et al. Modeling and Control Strategy Analysis of Parallel Hybrid Active Power Filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 55-61.
- [9] 赵勇, 韩春立, 李建华, 等. 兼顾降低网损和抑制谐波要求的配电系统优化运行[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 6-10.
- ZHAO Yong, HAN Chun-li, LI Jian-hua, et al. Balance to Reduce Net Loss and Harmonic Suppression Requirements of the Distribution System Optimized Operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 6-10.
- [10] 林琳. 企业供电系统有源滤波技术的研究和工程应用[D]. 长沙: 中南大学, 2004.
- LIN Lin. Technology Research and Engineering Applications of the Enterprise Power Supply System Active Filter[D]. Changsha: Central South University, 2004.
- [11] 张鹏鹰, 王向军, 曹跃云. 并联型电力有源滤波器直流侧电容电压控制的研究[J]. 电力电子技术. 2000 (3): 3-6.
- ZHANG Peng-ying, WANG Xiang-jun, CAO Yue-yun. Study of Parallel APF DC Bus Voltage Control[J]. Power Electronics. 2000 (3): 3-6.
- [12] 于瑞红. 并联混合型有源电力滤波器的研究[D]. 成都: 西华大学, 2006.
- YU Rui-hong. Study of Parallel Hybrid Type of APF[D]. Chengdu: Xihua University, 2006.
- [13] 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. Design Parameters and Applied Research of Parallel Hybrid Active Power Filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 106-111.
- [14] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [15] 黄永安, 马路, 刘慧敏. Matlab7.0/Simulink 6.0 建模仿真开发与高级工程应用. 北京: 清华大学出版社. 2005.

收稿日期: 2008-02-10; 修回日期: 2008-05-05

作者简介:

陈艳(1969-), 女, 硕士, 研究方向为电力系统谐波抑制与无功补偿. E-mail:chengyan1988@163.com

(上接第 44 页 continued from page 44)

- [12] Tiak Thakur & Jaswanti. Study and Characterization of Power Distribution System Network Reconfiguration[A]. In: IEEE PES Transmission and Distribution conference & Exposition[C]. Latin America: 2006.
- [13] ZHU Ji-zhong, XIONG Xiao-fu, et al. A Comprehensive Method for Reconfiguration of Electrical Distribution Network[A]. In: Power Engineering Society General Meeting[C]. 2007. 1-7.

收稿日期: 2008-03-01; 修回日期: 2008-04-03

作者简介:

戴伟华(1969-), 男, 副教授, 研究方向为电工与电力电子技术;

梅贱生(1982-), 男, 硕士, 研究方向为电网的优化调度;

熊宁(1975-), 男, 博士研究生, 研究方向是电网可靠性. E-mail:civilaviation@hotmail.com

(上接第 50 页 continued from page 50)

- YANG Li-xi, WANG Jin-feng, CHEN Gen-yong. GIS-Based Optimal Planning for Distribution System by Tabu Search[J]. Journal of Zhengzhou University, 2002, 23(3):75-77.
- [4] Boulaxis N G, Papadopoulos M P. Optimal Feeder Routing in Distribution System Planning Using Dynamic Programming Technique and GIS Facilities[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(1):242-247.

收稿日期: 2008-03-31; 修回日期: 2008-05-07

作者简介:

刘子俊(1980-), 男, 主要研究方向为继电保护及人工智能在电力系统中的应用; E-mail:tedljz@163.com

于德龙(1981-), 男, 主要研究方向为电力系统运行与规划等;

胡少强(1955-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统自动装置、故障检测等。