

# 差拍控制在有源电力滤波器中的应用

彭晓涛, 程时杰, 宁联辉, 罗成, 孙海顺

(华中科技大学电子与电气工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 有源滤波器因可以实现谐波、无功、不平衡分量补偿等多种功能, 所以已成为谐波抑制的主要技术。而且随着脉宽调制技术和微机技术的不断发展, 使得基于微机的数字脉宽调制方法在有源滤波器中的应用成为可能。无差拍控制就是其中一种在预测控制基础上发展起来的全数字化脉宽调制方法, 该方法的优点是能够预测谐波电流的变化趋势并跟踪补偿, 缺点是控制算法复杂, 对预测模型依赖性较大, 使其在具体实现过程中存在困难。针对这一不足, 提出了一种改进的、易于实现的差拍控制方法, 并结合定脉宽调制技术, 以单相并联型有源滤波器为对象进行仿真, 仿真结果表明它具有和无差拍控制法相同的谐波补偿效果。

**关键词:** 有源滤波器; 无差拍控制; 差拍控制

中图分类号: TM76; TN714

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2004)08-0040-05

## 0 引言

随着电力电子装置的应用日益广泛, 它们在实现功率和电压、电流变换的同时, 都不可避免地会使电气量的波形发生畸变, 向电网注入大量的谐波电流, 并且随着它们容量的不断增大、使用数量的迅速上升和控制方式的多样, 其对电网谐波污染也日益严重, 因此消除谐波污染, 已成为电力系统, 尤其是电力电子技术中的一个重大课题。

20 世纪 80 年代以来新型电力半导体器件的出现, PWM 技术的发展, 以及瞬时无功功率理论<sup>[1, 2]</sup>的提出, 针对无源滤波器的缺陷, 人们提出了用大功率晶体管构成的逆变器, 结合 PWM 技术进行电网谐波治理的思想, 并将实现这种功能的装置称为有源电力滤波器 APF(Active Power Filter)。为了保证有源滤波器对电网中的谐波电流实行动态补偿, 在实时准确地检测电网谐波电流的同时, 如何进行有效的 PWM 控制已成为 APF 研究领域的一个重要方向。目前 APF 的控制方法主要有三角波调制法、滞环控制法、无差拍控制法等<sup>[3~5]</sup>。其中无差拍控制法是在预测控制基础上发展起来的数字 PWM 技术, 它虽然具有谐波分量的预测能力, 但也存在不足<sup>[6]</sup>, 如控制过程的计算量较大等。这使得其对被补偿量的预测周期增大, 并易引起较大的预测误差, 最终影响补偿特性。

针对这一问题, 本文提出了改进的差拍控制方法, 并以单相并联型有源滤波器为对象, 进行了仿真。在相同条件下对上述两种方法的补偿特性进行了比较, 结果表明该控制方法行之有效, 同时还具有

易于实现的优点。

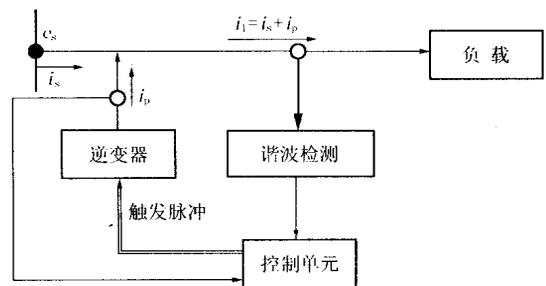


图 1 并联型 APF 结构图

Fig. 1 Schematic diagram of parallel APF

## 1 并联型 APF 的无差拍控制

为了分析问题方便本文以单相并联型 APF 作为研究对象, 如无特别强调, 文中涉及的 APF 均指单相并联型 APF, 但所采用的分析方法同样适用于三相有源滤波器。图 1 为 APF 的工作原理图, 它主要由 3 部分组成: 谐波检测、控制单元、逆变器。此系统中, 由于非线性负载的存在, 必然会引起电源输出电流的畸变, 使得电源输出电流  $i_1$  除了包含基波电流  $i_s$ , 还含有谐波电流  $i_h$ 。谐波检测部分用于检测线路上的谐波电流, 控制单元依据检测到的谐波电流和所使用的 PWM 控制策略, 产生出一系列的触发脉冲, 以控制逆变器各桥臂开关器件的导通顺序, 产生一个和谐波电流  $i_h$  相等的补偿电流  $i_p$ , 将它注入电网, 补偿负载电流中的谐波分量, 从而保证电源输出电流为基波分量。通过不断检测谐波电流, 并根据检测到的谐波电流发出逆变器触发信号, 最终达到实时

跟踪和补偿谐波电流的目的。因此实时跟踪检测负载电流中的谐波分量的变化至关重要。

为了实现这一目标,常用的方法是将预测控制理论和数字脉宽调制技术结合起来,其中一种有效的方法是\*\*无差拍控制法\*\*。无差拍控制法的原理框图如图 2 所示<sup>[7]</sup>。其基本工作过程是:在  $k$  时刻利用预测模型,根据  $i_h(k), i_h(k-1), \dots, i_h(k-n)$  等不同历史时刻检测到的实际  $i_h$ , 预测出  $i_h(k+1)$ 。在已知  $i_p(k)$  的情况下,利用逆变器输出电流预测公式,预测出  $k+1$  时刻逆变器在不同开关模式下可能输出的补偿值  $i_p(k+1)$ 。选取其中与  $i_h(k+1)$  最接近的  $i_p(k+1)$  所对应的开关模式作为  $k+1$  时刻逆变器的开关器件工作模式,并在  $k+1$  时刻执行。这样就可以在控制节拍上实现无差拍补偿,并保证逆变器的实时最优开关模式(假设预测的  $i_h$  具有足够的精度)。

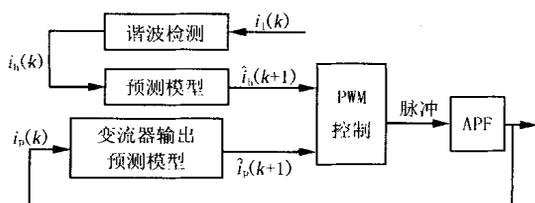


图 2 无差拍控制的原理框图

Fig. 2 Block diagram of deadbeat control

这里,将  $k$  时刻到  $k+1$  时刻的时间间隔视为补偿周期  $T_s$ ,也等于预测量的预测周期。如果采用定脉宽 PWM,它实际上也是逆变器开关器件的动作周期。通常预测精度取决于所使用的预测模型,高精度预测模型的算法一般都比较复杂,因此在实现过程中,就会以增大预测周期作为代价。我们对基于灰色 GM(1,1) 模型<sup>[7]</sup>的无差拍控制器在不同的预测周期下进行了仿真研究。发现预测精度随着预测周期的增加而明显下降,同时补偿周期的增加也会直接影响到 APF 的谐波补偿效果。针对这个问题,本文在文献[7]所提方法的基础上提出了一种改进 APF 控制方法——差拍控制法。

## 2 并联型 APF 的差拍控制

在图 2 所示的无差拍控制方法中,巨大的计算量来自于  $i_h(k+1)$  的计算。如果将  $i_h(k+1)$  预测环节取消,从而使 APF 在下一时刻输出的实际补偿电流跟踪  $k$  时刻检测到的实际谐波电流,并在  $k+1$

时刻执行,就可以实现本文提出的差拍控制方法。其控制原理如图 3 所示。

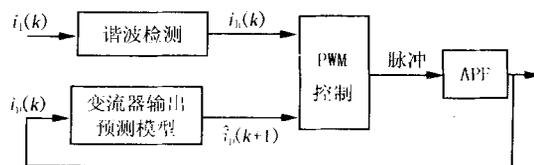


图 3 差拍控制的原理框图

Fig. 3 Block diagram of beat control

### 2.1 谐波电流检测

将文献[8]所述的  $i_p - i_q$  谐波电流检测方法应用于单相电路,使电源电流分别和与电网电压同频的单位正、余弦信号直接相乘,经两个低通滤波器截止频率低于 2 倍电流基波频率且对直流分量的增益为 2 滤波后,再分别与上述单位正、余弦信号相乘,就可得到电源电流中的瞬时基波有功电流和瞬时基波无功电流。用检测到的瞬时电源电流减去瞬时基波有功电流和瞬时基波无功电流,便可得瞬时谐波电流<sup>[9]</sup>。检测原理框图见图 4,图中单位正弦和余弦信号的初始相位角可以任意。

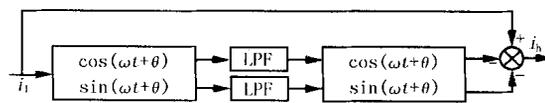


图 4 单相谐波电流检测原理框图

Fig. 4 Block diagram of single-phase harmonic current detection

### 2.2 逆变器输出电流 $i_p(k+1)$ 的预测

图 5 为有源滤波器逆变器的拓扑结构图。开关器件采用全控型开关器件 IGBT,  $L$  代表连接变压器的等效漏感和其它电感的总和,  $i_p(k)$  为  $k$  时刻逆变器输出补偿电流,  $u_s(k)$  为  $k$  时刻逆变器交流侧电压瞬时值,交流侧为工频 50 Hz 的单相交流电源  $u_s = U_m \sin(\omega t)$ ,  $V_{dc}$  为逆变器直流侧母线电压,近似为恒定值。

用  $S_A$  和  $S_B$  分别表示从左至右两个桥臂上开关器件的工作状态,  $S_i = 1 (i = A, B)$  表示相应桥臂上方开关器件处于导通状态。假设开关器件为理想开关,采用定脉宽调制方法(调制周期为  $T_s$ ),则当  $(S_A, S_B) = (1, 0)$  时,由图 4 知:

$$L \frac{di_p}{dt} = V_{dc} - u_s(k+1) \quad (1)$$

$$di_p = i_p(k+1) - i_p(k) \quad (2)$$

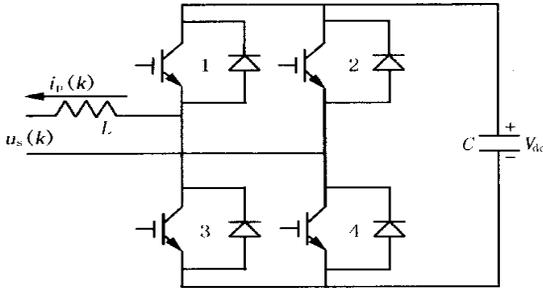


图5 APF 逆变器回路结构图

Fig.5 Convert configuration of APF

$$dt = T_s \tag{3}$$

将式(2)、式(3)依次代入式(1),得:

$$i_p(k+1) = i_p(k) + \frac{L V_{dc} - u_s(k+1) / T_s}{L} \tag{4}$$

按照上述方法,可以得到当  $S_A$  和  $S_B$  分别取不同值时,  $k+1$  时刻逆变器输出补偿电流  $i_p(k+1)$  的通用表达式:

$$i_{pm}(k+1) = i_p(k) + \frac{L(S_A - S_B) V_{dc} - u_s(k+1) / T_s}{L} \tag{5}$$

( $m = 1, 2, 3$ )

但式(5)等号右边存在  $k$  时刻未知量  $u_s(k+1)$ , 所以无法在  $k$  时刻利用该式预测  $i_p(k+1)$ 。

设  $u_s(k+1) = U_m \sin(\omega(k+1)T_s + \phi)$ ,  $U_m$  为交流电压的幅值,  $\phi$  为电压初始相位。利用和差三角公式对其分解得:

$$U_m \sin(\omega k T_s + \phi + \omega T_s) = U_m [\sin(\omega k T_s + \phi) \cdot \cos(\omega T_s) + \cos(\omega k T_s + \phi) \sin(\omega T_s)] \tag{6}$$

若  $T_s$  很小, 则  $\omega T_s \rightarrow 0$ ,  $\sin(\omega T_s) \approx \omega T_s$ ,  $\cos(\omega T_s) \approx 1$ , 式(6)可近似为:

$$u_s(k+1) \approx U_m \sin(\omega k T_s + \phi) + \omega T_s U_m \cos(\omega k T_s + \phi) \tag{7}$$

那么式(5)也可以改写为:

$$i_{pm}(k+1) = i_p(k) + \frac{L(S_A - S_B) V_{dc} - u_s(k) / T_s}{L} \tag{8}$$

( $m = 1, 2, 3$ )

这样就可以在  $k$  时刻, 利用实际测量的  $i_p(k)$  和  $u_s(k)$ , 按照式(8)预测  $k+1$  时刻逆变器不同开关器件状态下输出的3种补偿电流值  $i_p(k+1)$ 。

### 2.3 APF 的差拍控制

在  $k$  时刻得到  $k+1$  时刻不同的  $i_p(k+1)$  后, 按式(9)所示的目标函数, 选择使  $J_m$  值最小的电力电子器件开关模式作为  $k+1$  时刻逆变器的触发脉冲, 并在  $k+1$  时触发相应的开关器件, 就可以实现本文提出的差拍控制方法。

$$J_m = \min \left\{ |i_h(k) - i_{pm}(k+1)| \right\} \tag{9}$$

### 3 仿真结果

用 MATLAB 的 Simulink 软件包和 PSB 工具箱按图 1 所示原理建立单相并联型 APF 仿真系统, 并对其仿真研究。仿真系统的参数: 交流电源电压幅值为 250 V, 初始相角为零, 供电线路等效阻抗  $Z_{l1} = 2 + j0.007 \omega$ , 负载为单相不控全桥整流器, 整流器负载等效阻抗为  $Z_{l2} = 10 + j0.036 \omega$ , 其中  $\omega = 100$ , 逆变器交流侧等效电感  $L = 25$  mH, 直流侧母线电压假设为恒定 300 V。

图 6 是未接入 APFDC 时该仿真系统线路上的电流波形, 图 7 为图 6 所示电流中基波和主要低次谐波分量的幅值频谱。不难看出, 由于负载非线性特性的存在, 电源输出电流发生了严重畸变。

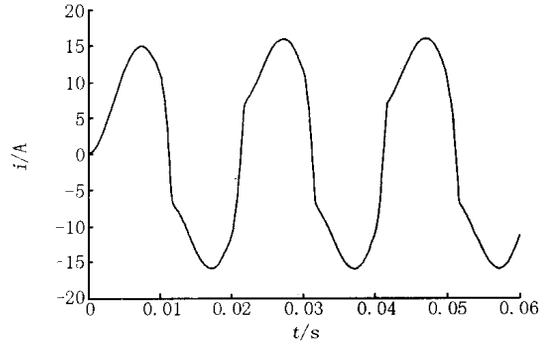


图6 未加入 APF 时电源电流曲线

Fig.6 Curve of source current without APF

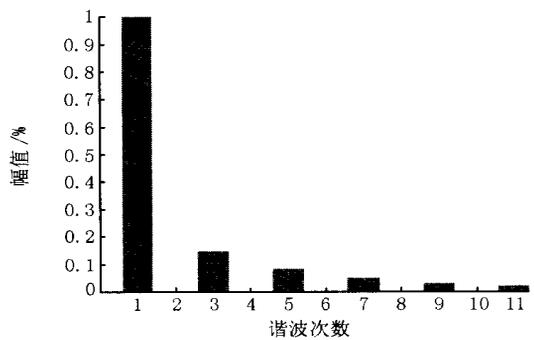


图7 未加入 APF 时电源电流的谐波频谱

Fig.7 Harmonic frequency spectrum of source current without ADF

图 8 是以灰色  $GM(1, 1)$  作为预测模型, 在补偿周期  $T_s$  为 100  $\mu$ s 时,  $k$  时刻所预测的  $k+1$  时刻谐波电流值  $i_h(k+1)$  与  $k+1$  时刻的实际谐波电流值  $i_h(k+1)$  的误差曲线, 图 9 是在补偿周期为 125  $\mu$ s 时的误差曲线。

如果以式

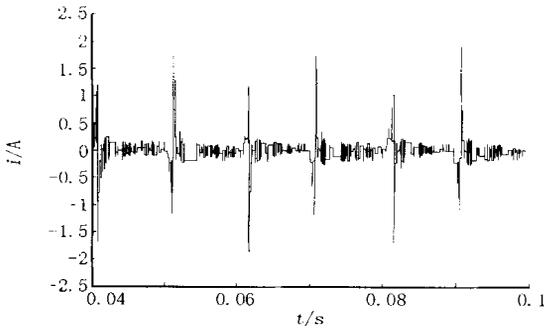


图8  $T_s = 100 \mu\text{s}$  时谐波电流预测误差曲线

Fig. 8 Curve of harmonic current prediction deviation when  $T_s = 100 \mu\text{s}$

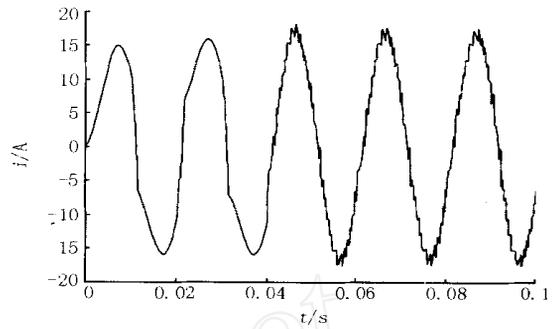


图10  $T_s = 100 \mu\text{s}$  时加入无差拍控制 APF 后电源电流曲线

Fig. 10 Curve of source current using deadbeat APF when  $T_s = 100 \mu\text{s}$

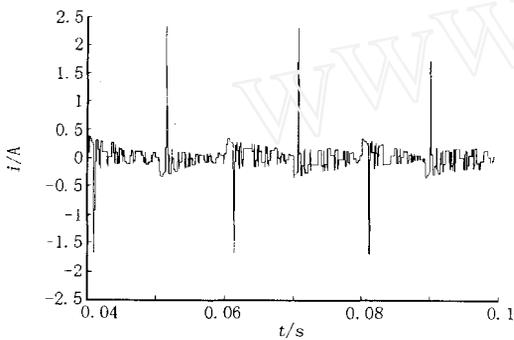


图9  $T_s = 125 \mu\text{s}$  时谐波电流预测误差曲线

Fig. 9 Curve of harmonic current prediction deviation when  $T_s = 125 \mu\text{s}$

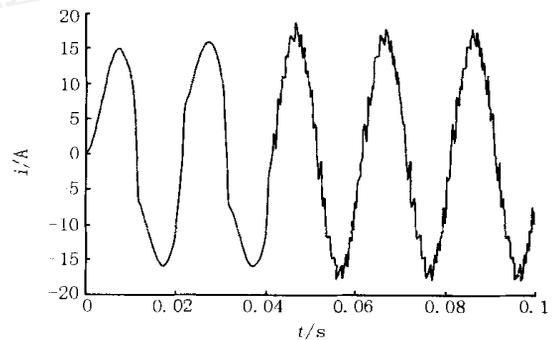


图11  $T_s = 125 \mu\text{s}$  时加入无差拍控制 APF 后电源电流曲线

Fig. 11 Curve of source current using deadbeat APF when  $T_s = 125 \mu\text{s}$

$$= \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{i}_h(k+1) - i_h(k+1))^2} \quad (10)$$

表示的方差均方根作为衡量指标,通过计算,前者均方根值为 0.185 A,后者是 0.213 A。对比结果可知,预测精度随着补偿周期的增大而明显变差。这也必然影响到 APF 的补偿效果,图 10、图 11 就是在上述不同补偿周期情况下,在  $t = 0.04 \text{ s}$  时加入基于  $GM(1,1)$  无差拍控制的 APF 后,电源输出电流曲线。表 1 所示数据说明补偿效果明显随着补偿周期的增大而变差。

表 1 各次谐波含量表

Tab. 1 Contents of harmonic wave in source current

谐波次数	3 次	5 次	7 次	9 次	11 次
未使用差拍控制 APF	14.43 %	7.91 %	4.78 %	2.95 %	1.82 %
使用无差拍控制 APF 后 ( $T_s = 125 \mu\text{s}$ )	1.72 %		1.57 %	1.44 %	1.42 %
使用无差拍控制 APF 后 ( $T_s = 100 \mu\text{s}$ )	1.70 %	0.62 %	0.35 %	0.90 %	0.72 %
使用差拍控制 APF 后 ( $T_s = 100 \mu\text{s}$ )	1.80 %	1.14 %	1.02 %	0.68 %	0.25 %
使用差拍控制 APF 后 ( $T_s = 50 \mu\text{s}$ )	1.09 %	0.63 %	0.57 %	0.40 %	0.43 %

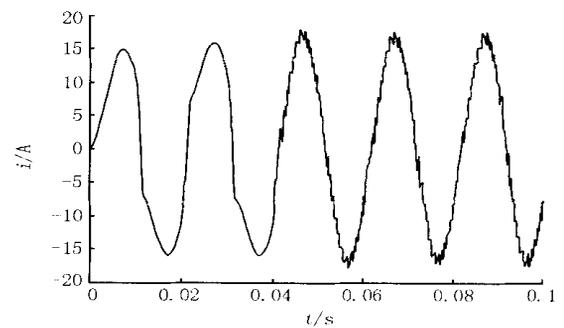


图12  $T_s = 100 \mu\text{s}$  时加入差拍控制 APF 后电源电流曲线

Fig. 12 Curve of source current using beat APF when  $T_s = 100 \mu\text{s}$

图 12 是补偿周期  $T_s$  为  $100 \mu\text{s}$ , 于  $t = 0.04 \text{ s}$  时投入本文提出的差拍控制 APF 后,电源输出电流曲线。其结果非常接近相同补偿周期下基于无差拍控制的 APF 的补偿结果,如图 10 所示。但值得指出的是,由于该方法控制算法大大简化,因此完全可以在逆变器开关频率允许范围内,将补偿频率提高一倍,得到更佳的补偿效果,图 13 所示就是  $T_s$  为  $50 \mu\text{s}$  时的补偿结果。

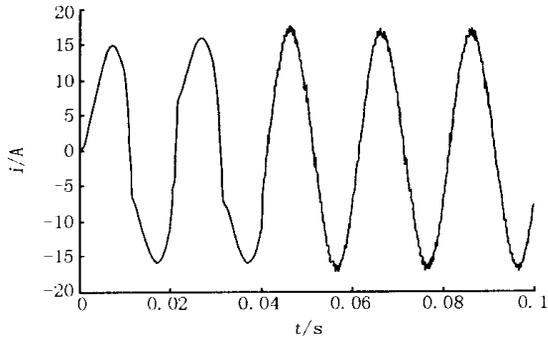


图 13  $T_s = 50 \mu\text{s}$  时加入差拍控制 APF 后电源电流曲线

Fig. 13 Curve of source current using beat APF when  $T_s = 50 \mu\text{s}$

表 1 还对比列出了图 6、图 10、图 11、图 12 和图 13 所示的未补偿前和补偿后的电源输出电流中各主要低次谐波电流幅值相对于基波电流幅值的百分比。表中数据说明在相同的补偿周期下,差拍控制法并不逊色于无差拍控制法。

#### 4 结语

本文在定量分析无差拍控制实际应用于 APF 时还存在不足的基础上,提出了一种改进的差拍控制方法。仿真结果表明采用该控制方法的 APF 不仅对谐波电流具有良好的动态补偿特性,而且具有控制算法简单,易于工程实现的优点。

#### 参考文献:

- [1] Akagi H, Kanazawa Y, Nabae A. Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-phase Circuits[A]. IEEE Proceedings IPEC. Tokyo:1983. 1375-1386.
- [2] Toshihiko T, Akagi H. A New Method of Harmonic Power Detection Based on the Instantaneous Active Power in Three-phase Circuits[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10(4): 1737-1742.
- [3] 唐中琦, 谢运祥 (TANG Zhong-qi, XIE Yun-xiang). 有源滤波器补偿电流的检测与控制 (Detection and Control of Compensation Currents for Active Filters) [J]. 电工电能新技术 (New Technology of Electrician and Electric), 1998, (4): 28-31.
- [4] Ross J G, Enslin J H R. Digital Adaptive Control of A Three-phase Dynamic Power Filter Under Unsymmetrical

- Loading Conditions[J]. IEEE PESC 1991, 323-329.
- [5] 李庚银, 王昕伟, 陈志业, 等 (LI Geng-yin, WANG Xin-wei, CHEN Zhi-ye, et al). 有源补偿器的 PWM 电流控制方法的研究 (PWM Current Control for APF) [A]. 全国高等学校电力系统及其自动化专业第 11 届学术年会论文集 (Proceedings of the 11th CUS - EPSA). 1995. 441- 446.
- [6] 余江, 段献忠 (YU Jiang, DUAN Xian-zhong). 旋转空间矢量在电压型 SMES 控制中的应用 (Rotating Space Vectors Control Algorithm of Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2002, 26(21): 39- 44.
- [7] 李江, 孙海顺, 程时杰, 等 (LI Jiang, SUN Hai-shun, CHENG Shi-jie, et al). 基于灰色系统理论的有源滤波器的预测控制 (Prediction Control of Active Power Filter Based on the Grey Theory) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2002, 22(2): 6-10.
- [8] 杨君, 王兆安 (YANG Jun, WANG Zhao-an). 三相电路谐波电流两种检测法的对比研究 (A Study on the Comparison of Two Methods Used to Detect the Harmonic Currents of Three-phase Circuits) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 1995, 10(2): 43- 48.
- [9] 蒋斌, 颜钢峰, 赵光宙 (JIANG Bin, YAN Gang-feng, ZHAO Guang-zhou). 单相电路瞬时谐波及无功电流实时检测新方法 (A New Method for Real-time Detecting Harmonic and Reactive Currents in Single-phase Circuit) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2000, 24(21): 35-39.

收稿日期: 2003-07-28; 修回日期: 2003-09-17

#### 作者简介:

彭晓涛 (1971 - ), 男, 博士研究生, 研究方向为超导磁储能装置在电力系统中运行与控制方面研究;

程时杰 (1945 - ), 男, 教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 主要从事电力系统的稳定分析与控制, 超导和 FACTS 技术在电力系统中的应用, 人工智能及其在电力系统中的应用, 电力线载波通信等方面研究;

宁联辉 (1978 - ), 男, 硕士研究生, 研究方向为 TCSC 控制和 FACTS 技术在电力系统中应用。

#### Application of beat control in shunt active power filter

PENG Xiao-tao, CHENG Shi-jie, NING Lian-hui, LUO Cheng, SUN Hai-shun

(Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

(下转第 55 页 continued on page 55)

表单的方式修改启动定值。Web Server 端接受到修改数据库表的命令后,隐藏的 ASP 文件将提交的数据库表单(修改后的定值表单)暂存到数据库中,由上层 Win32 应用程序读出新定值并校验该启动定值表单是否合法。校验通过后,该定值下传给下层采集站,修改后返回定值修改成功标志,若成功则新的启动定值写入数据库启动定值表,修改成功与否的标志将由 ASP 的 Response 对象返回到客户端浏览器。

#### 8) 远方启动故障录波

远方用户(Administrator 用户和 Guest 用户)发出启动命令传送至 Web 服务器端,Web 服务器端又将命令下达给上层监录系统,上层监录系统通过以太网使下层数据采集单元启动录波。

## 4 结语

基于 Web 的新型发变组微机监录系统采用 ASP、SQL Server 等技术实现。其适应性强、使用方便、能方便快捷实现录波数据的发布与共享、远程在线控制、设备调节与维护,其基于稳态数据记录的历史信息为未来电厂的设备状态检修提供了重要的依据。

### 参考文献:

[1] DL/T 553-94, 220 ~ 500 kV 电力系统故障动态记录技术准则 (Technology Standard of Fault Dynamic Record for 220 ~ 500 kV Power System) [S].

- [2] 中华人民共和国电力行业新标准——微机型发电机变压器组故障录波装置技术准则 (The Electric Power's New Criterion of PRC—the Technique Rule of Fault Data Record System for Generator-transformer Unit Based on PC) [S], 2002.
- [3] 张哲, 江雄杰, 杨军, 等 (ZHANG Zhe, JIANG Xiong-jie, YANG Jun, et al). 新型发电机——变压器组微机监录与分析系统的研究 (Development of an Integrative State Detection and Record System for Generator-transformer Unit) [J]. 继电器 (Relay), 2001, 29(3): 35-38.
- [4] 廖信彦 (LIAO Xin-yan). Active Server Pages 应用大全——ASP 与数据库的整合 (Active Server Pages General Application——ASP and Database's Conformity) [M]. 北京: 清华大学出版社 (Beijing: Tsinghua University Press), 1999.
- [5] 徐晖, 张晓霞, 陈立明, 等 (XU Hui, ZHANG Xiao-xia, Chen Li-ming, et al). 动态服务器网页在发电厂生产实时系统中的应用 (Application of Active Server Page to Real-time System of Power Stations) [J]. 广东电力 (Guangdong Electric Power), 2002, 15(6): 35-36, 45.

收稿日期: 2003-08-29; 修回日期: 2003-09-18

### 作者简介:

潘雪莉 (1980 -), 女, 硕士研究生, 主要从事故障录波装置与微机保护装置的研发工作;

张哲 (1962 -), 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统保护与控制方面的教学和科研工作。

## An integrated state detection and record system for generator-transformer unit based on Web

PAN Xue-li, ZHANG Zhe, YANG Jun

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** To meet the need of the new criterion of generator-transformer units fault recorder and to make the equipment developed well with Web, the paper puts forward a new scheme of integrated state detection and fault data record system for generator-transformer units based on Web. It details the main functions: information publication, device administration, set values coordination, data files download, etc.

**Key words:** generator-transformer unit; data record format; Web

(上接第 44 页 continued from page 44)

**Abstract:** The active power filter (APF) is considered as an effective approach to solve the problem of harmonic compensation as well as the reactive power and unbalanced compensation. Due to the development of pulse width modulation (PWM) and microcomputer technology, digital PWM in APF becomes possible. Among various PWM control methods, deadbeat control is a fully digital PWM control based on the prediction control theory. Though it has the advantage of precise harmonic prediction, its complex control algorithm and strongly relying on prediction model limit its actual application. Therefore an improved method——beat control which is easier to realize is proposed. The simulation result on a shunt single-phase APF shows that it has the compensation effects similar to that of deadbeat control.

**Key words:** active power filter; deadbeat control; beat control