

## 四桥臂三相四线制并联型 APF-STATCOM

刘海波, 毛承雄, 陆继明, 王丹

(华中科技大学电力安全与高效湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 通过增加畸变相位闭环控制环节准确锁定基波正序电压初相角, 提出了一种能在电网电压不平衡或畸变时准确检测出基波正序有功电流和无功电流的谐波和无功电流检测算法, 且可直接适用于三相三线或四线系统; 给出了一种能在电网电压不平衡或畸变时对基波正序无功功率进行独立补偿的解耦控制方案。基于所提检测方法与控制方案, 四桥臂三相四线制并联型 APF-STATCOM 能在电网电压不理想和负载不对称且非线性的条件下实现用同一原理同时实现谐波抑制、无功和负载不平衡补偿这几种功能。理论推导验证了所提检测方法的正确性, 基于 Matlab/Simulink 的仿真结果证明了所提检测方法与控制方案的有效性, 并且具有良好的动态特性和快捷的无功阶跃响应。

**关键词:** 检测; 谐波、无功和负载不平衡补偿; 有源滤波器; 静止同步补偿器

### Three-phase four-wire shunt APF-STATCOM using a four-leg converter

LIU Hai-bo, MAO Cheng-xiong, LU Ji-ming, WANG Dan

(Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Lab, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** A new detection method for harmonic and reactive currents is proposed, which can detect positive fundamental active currents and reactive currents under non-ideal mains voltage conditions and can be used for three-phase three-wire or four-wire systems directly. The distortion phase control tache is included in the proposed method in order to lock positive fundamental voltage phase. A decoupling control strategy is also presented to compensate positive fundamental reactive power absolutely in the case of unbalanced or distorted voltage. On the basis of the proposed detection method and control strategy, the three-phase four-wire shunt APF-STATCOM using a four-leg converter can realize harmonic elimination, reactive power and load imbalance compensation simultaneously under unbalanced non-linear loads and non-ideal mains voltage conditions. The theoretical analysis verifies the correctness of the proposed detection method. Simulation results based on Matlab/Simulink show the feasibility, the excellent dynamic performance and the good reactive power response of the proposed detection method and control strategy.

**Key words:** detection; harmonic, reactive and load imbalance compensation; active power filter(APF); static synchronous compensator(STATCOM)

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)16-0011-07

## 0 引言

随着电力电子装置的广泛使用, 三相四线制配电网中存在大量单相非线性负载, 使得电网电流含有大量的谐波成分, 特别是各相零序谐波电流以及负载的不平衡引起的不平衡电流在中性线上的累积, 大大超过了电气规程的设计标准, 带来严重的安全隐患。因此, 电力系统的谐波和不对称问题日益严重, 对电网污染的治理, 尤其是对谐波和无功的治理, 越来越受到人们的重视<sup>[1]</sup>。

目前, 三相三线制有源滤波器<sup>[2]</sup> (APF) 和静

止同步补偿器<sup>[3]</sup> (STATCOM) 等装置, 因其良好的补偿性能, 已得到广泛的重视和研究; 而对三相四线制 APF 和 STATCOM 的研究近年来也变得越来越多<sup>[4-7]</sup>。有源滤波器主要用来抑制非线性负载和变压器等装置所产生的谐波, 而静止同步补偿器则可以通过对无功的补偿提高电网和负载的功率因素、稳定受电端及电网的电压、抑制闪变和实现对电网潮流的控制等。而对三相四线制系统不平衡的零线电流的补偿也需要专门的控制和采用合适的主电路拓扑。

文献[6]对三相三线制并联 APF-STATCOM 装置同时实现无功补偿和谐波抑制这两种功能进行了理论分析和试验验证。文献[7]对以三桥臂变换器构成

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划资助

的并联型 APF 装置同时实现谐波抑制、无功和负载不平衡补偿进行了仿真研究。本文试着对以四桥臂变换器构成的三相四线并联型 APF-STATCOM 装置同时实现谐波抑制、无功和负载不平衡补偿进行研究。作为装置的重要部分，谐波、无功和不平衡电流的实时检测效果直接关系到整个装置的补偿性能。

在电网电压不平衡且含有畸变时对补偿对象的谐波、无功和不平衡电流进行准确检测是进行补偿的关键。目前研究和应用较多的检测方法是基于瞬时无功功率理论的 p-q 法<sup>[8]</sup>和  $i_p-i_q$  法<sup>[9]</sup>。这两种方法在电网电压对称无畸变时，均能实现对谐波和无功电流的准确检测，而在电网电压不平衡或畸变时 p-q 法的检测结果会有较大的误差； $i_p-i_q$  法能在电网电压不平衡或畸变时准确地检测出基波正序电流，但检测出的有功和无功电流存在误差<sup>[10]</sup>。

本文提出了一种基于瞬时无功功率理论的  $i_p-i_q$  改进的谐波和无功电流检测方法并对其进行了理论分析，它能在电网电压不平衡或畸变时准确检测出基波正序有功电流和无功电流。基于所提的检测方法，给出了一种闭环反馈解耦控制方案。文章最后通过仿真对所提检测方法与控制方案的有效性进行了验证。

### 1 三相四线 APF-STATCOM

在三相四线系统中，APF-STATCOM 除了要对谐波进行抑制和无功进行补偿外，还要对零线电流进行抑制，以消除电源侧零线电流，使三相电流对称。图 1 给出了三相四线 APF-STATCOM 与负载连接的原理图。

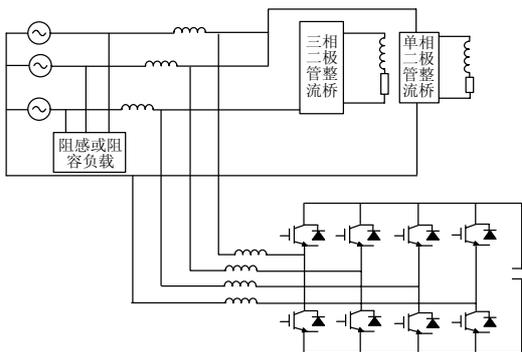


图 1 三相四线 APF-STATCOM 原理图  
Fig.1 Power circuit of the three-phase four-wire APF-STATCOM

图 1 中的四相变换器电路中，四对桥臂分别产生用于 A、B、C 三相及零线的补偿电流。这里，第四对桥臂专门用于对中性线电流的补偿。图 1 中负载由三相二极管不控整流负载、单相二极管不控

整流负载以及阻感负载或阻容负载组成。

### 2 检测原理及其实现方法

三相电网电压不对称且畸变时，电压中将包含负序分量和零序分量。由 PLL 及正余弦发生电路得到的实际正余弦信号的相位与期望的基波正序分量的正余弦信号之间就有相位差。这个相位差会引起检测出的基波正序有功电流和基波正序无功电流存在误差<sup>[10]</sup>。而要使 APF-STATCOM 用同一原理同时实现谐波抑制、无功和负载不平衡补偿，则必须实时准确检测出负荷电流中的基波正序有功电流和无功电流。因此，要消除这个误差，就必须消除实际的正余弦信号和期望的正余弦信号之间的相位差，设这个相位差为  $\varphi$ 。为此，这里在检测原理框图中引入畸变相位闭环控制环节，如图 2 所示。其中， $i_{La}$ 、 $i_{Lb}$  和  $i_{Lc}$  为三相负载电流， $i_{ha}$ 、 $i_{hb}$  和  $i_{hc}$  为负载电流中的谐波分量和基波负序分量。

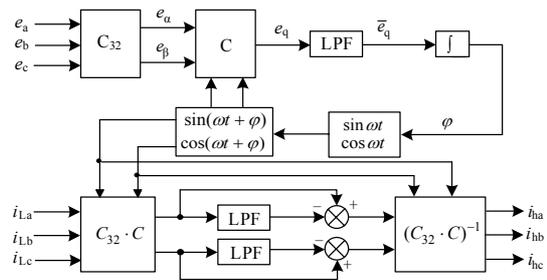


图 2 检测原理框图

Fig.2 Schematic diagram of proposed detection method

图 2 中：

$$C_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$C = \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \varphi) & -\cos(\omega t + \varphi) \\ -\cos(\omega t + \varphi) & -\sin(\omega t + \varphi) \end{bmatrix} \quad (2)$$

考虑三相电网电压不对称或畸变的一般性，设三相电压  $e_a$ 、 $e_b$  和  $e_c$  包含基波和各次谐波的正序、负序和零序分量，分别为：

$$e_a = \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ E_{1n} \sin(n\omega t + \varphi_{1n}) + E_{2n} \sin(n\omega t + \varphi_{2n}) + E_{0n} \sin(n\omega t + \varphi_{0n}) \right] \quad (3)$$

$$e_b = \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ E_{1n} \sin(n\omega t + \varphi_{1n} - 2\pi/3) + E_{2n} \sin(n\omega t + \varphi_{2n} + 2\pi/3) + E_{0n} \sin(n\omega t + \varphi_{0n}) \right] \quad (4)$$

$$e_c = \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ E_{1n} \sin(n\omega t + \varphi_{1n} + 2\pi/3) + E_{2n} \sin(n\omega t + \varphi_{2n} - 2\pi/3) + E_{0n} \sin(n\omega t + \varphi_{0n}) \right] \quad (5)$$

式中: 下标中的 1 表示正序, 2 表示负序, 0 表示零序,  $n$  表示谐波次数( $n=1$  时表示基波);  $\varphi$  表示初相角;  $E$  表示电网相电压有效值。将  $e_a$ 、 $e_b$  和  $e_c$  变换至  $\alpha-\beta$  两相, 得式 (6)。

$$\begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3} \sum_{n=1}^{\infty} [E_{1n} \sin(n\omega t + \varphi_{1n}) + E_{2n} \sin(n\omega t + \varphi_{2n})] \\ \sqrt{3} \sum_{n=1}^{\infty} [-E_{1n} \cos(n\omega t + \varphi_{1n}) + E_{2n} \cos(n\omega t + \varphi_{2n})] \end{bmatrix} \quad (6)$$

据式 (7)

$$\begin{bmatrix} e_p \\ e_q \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} \quad (7)$$

可求出  $e_p$ 、 $e_q$  如下

$$\begin{bmatrix} e_p \\ e_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3} \sum_{n=1}^{\infty} E_{1n} \cos[(n-1)\omega t + \varphi_{1n} - \varphi] - \sqrt{3} \sum_{n=1}^{\infty} E_{2n} \cos[(n+1)\omega t + \varphi_{2n} + \varphi] \\ -\sqrt{3} \sum_{n=1}^{\infty} E_{1n} \sin[(n-1)\omega t + \varphi_{1n} - \varphi] - \sqrt{3} \sum_{n=1}^{\infty} E_{2n} \sin[(n+1)\omega t + \varphi_{2n} + \varphi] \end{bmatrix} \quad (8)$$

它们的直流分量为

$$\begin{bmatrix} \overline{e_p} \\ \overline{e_q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3} E_{11} \cos(\varphi_{11} - \varphi) \\ -\sqrt{3} E_{11} \sin(\varphi_{11} - \varphi) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中:  $\varphi_{11}$  为基波电压正序分量的初相角。由上述推导得到的无功电压直流分量表达式  $\overline{e_q}$  可知, 要使  $\overline{e_q}$  为零, 则  $\varphi = \varphi_{11}$ 。如  $\overline{e_q}$  不为零, 说明  $\varphi \neq \varphi_{11}$ , 即存在相位差。由图 2 可知, 只要相差存在, 就要对其积分, 反过来调整正余弦信号的相位, 使  $\overline{e_q}$  为零, 从而达到锁定电网基波电压正序分量初相角的目的, 也就消除了实际的正余弦信号和期望的正余弦信号之间的相位差。

由图 2 可知, 该检测方法无需对三相电压进行锁相, 自然就可避免锁相误差对检测结果的影响。这是因为三相基波电压正序分量的初相角的确定是以标准的正余弦函数为基准的, 而不是以实际的三相电网电压为基准的。而且, 实际电力系统中频率相对稳定, 即使电网电压频率发生偏移, 也可像文献[11]中所述那样消除频偏的影响。

在对基于瞬时无功功率理论  $i_p-i_q$  电流检测算法作进一步分析后发现, 在对三相负载电流  $i_{La}$ 、 $i_{Lb}$  和  $i_{Lc}$  变换为  $i_\alpha$  和  $i_\beta$  时, 三相电流中的零序分量相互抵消[12], 所以三相负载电流中的零序分量不影响该检测算法在三相四线系统中的应用, 也就无需像文献[10]所提增加零序电流预处理环节。

因此, 本文提出的基于上述检测原理的改进的  $i_p-i_q$  检测方法, 在电网电压不平衡或畸变时, 通过增加畸变相位闭环控制环节准确锁定基波正序电压

初相角, 从而能够准确检测出基波正序有功电流和无功电流, 而且可直接适用于三相三线和四线系统。

### 3 控制方案

图 3 为本文所提 APF-STATCOM 装置的控制系統结构图。该控制系统完成四个功能: 直流侧电压恒定控制, 谐波抑制控制, 无功功率补偿控制, 负载不平衡补偿控制。直流电压指令  $V_{dc}^*$  与直流电压反馈  $V_{dcf}$  的差值经 PI 调节器后生成有功电流指令之一  $i_{cd1}^*$ , 对流入装置的这一有功电流进行控制可以起到稳定直流电压的目的。

在电网电压不对称且畸变和负载不平衡且非线性的条件下, 常规的 STATCOM 控制是无法实现对无功电流的全补偿。不过, 对于 STATCOM 装置而言, 并不是用其对接入点的无功电流进行全补偿, 而是用来通过对无功功率的控制来实现维持系统电压、阻尼系统振荡、提高系统静态稳定和暂态稳定等目标, 因而它主要是针对系统基波正序分量起作用[13]。为了在这种情况下实现 APF-STATCOM 对基波正序无功功率的补偿, 对图 2 中靠近电源侧的阻感或阻容负载的电流  $i_{L1a}$ 、 $i_{L1b}$  和  $i_{L1c}$  与非线性负载电流  $i_{uLa}$ 、 $i_{uLb}$  和  $i_{uLc}$  先分别作对应的加法处理, 再经 abc-dq 变换为对应的有功电流  $i_d$  和无功电流  $i_q$  后, 再经 LPF 后得到相应的有功电流基波分量  $\overline{i_d}$  和无功电流基波分量  $\overline{i_q}$ , 有功电流及其基波分量的差值作为有功电流指令之二  $i_{cd2}^*$ , 无功电流及其基波分量的差值作为无功电流指令之二  $i_{cq2}^*$ , 对流入装置的这两部分指令电流进行控制不但可以抑制非线性负载所产生的谐波电流, 而且可以抑制因电网电压不对称且畸变引起的阻感或阻容负载电流中的谐波成分, 如图 3 所示。

无功电流基波分量  $\overline{i_q}$  经比例增益  $k$  后生成基波无功电流指令  $i_{cq1}^*$ , 对流入装置的这一基波无功电流进行控制可以实现对基波正序无功功率的独立补偿。当  $k=1$  时, 实现对基波正序无功的全补偿, 当  $k \neq 1$  时, 实现对不同基波功率因数的补偿。与文献[13]中提到的, 在电网电压不对称和负载不对称条件下, 通过采样滤波分解出系统基波正序分量, 再利用赤木的理论的瞬时无功功率法计算瞬时无功功率来实现 STATCOM 对基波正序无功功率的补偿相比较而言, 本文所提的方法巧妙地利用了谐波检测中已经检测出来的基波无功电流并对其进行比例控制从而实现对基波正序无功功率的独立补偿。

图 3 中,  $i_{cd}^*$ 、 $i_{cq}^*$  为装置总有功电流补偿指令和总无功电流补偿指令, 它们分别和装置实际输出的有功电流和无功电流比较后再经 PI 调节、状态反馈解耦和电压前馈补偿后, 得到装置输出电压的有功分量  $v_{cd}$  和无功分量  $v_{cq}$ , 再经 abc-dq 反变换后生成三相调制波电压  $V_{c-abc}$ 。这个调制波与三角载波比较后生成的三相 PWM 脉冲信号用以控制四桥臂变换器中的前三对桥臂的通断。

图 3 中  $i_{c0}^*$ 、 $i_{c0}$  分别为三相不平衡电流补偿指令和装置实际输出的瞬时不平衡电流, 它们的差值经 PI 调节生成单相调制波信号, 再经三角波比较后生成四桥臂变换器中的第四对桥臂的开关信号。通过这种控制可以有效实现对负载不平衡电流的补偿。

图 3 中,  $i_{ca}$ 、 $i_{cb}$  和  $i_{cc}$  为装置输出的电流,  $i_{cd}$ 、 $i_{cq}$  为其相应的有功分量和无功分量;  $v_{La}$ 、 $v_{Lb}$  和  $v_{Lc}$  为装置接入点电压,  $v_{Ld}$ 、 $v_{Lq}$  为其相应的有功分量和无功分量。

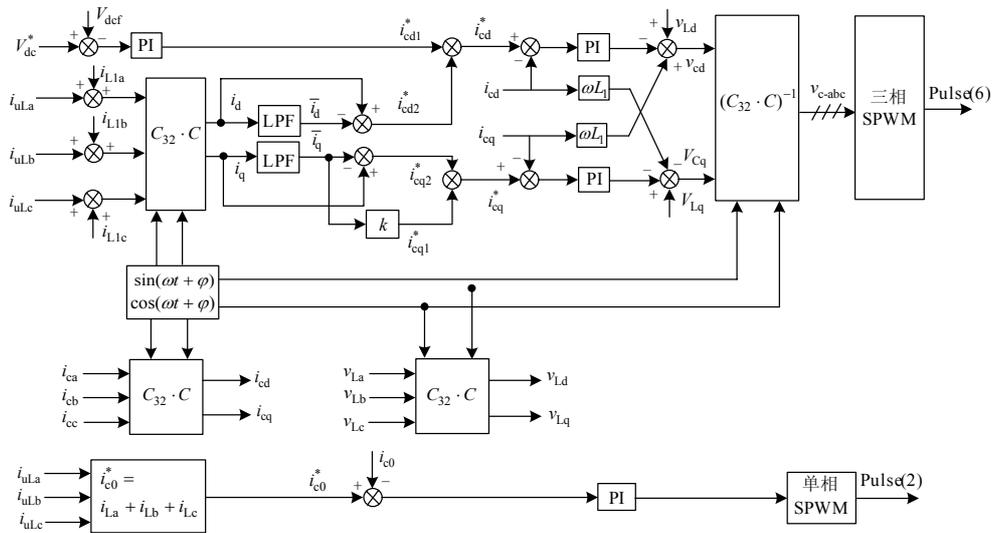


图 3 APF-STATCOM 控制系统结构框图

Fig.3 Block diagram of the proposed control strategy

### 4 仿真研究

为了验证上文提出的检测算法及控制方案的可行性, 下面将在 Matlab 时域环境下利用 Simulink 工具进行仿真分析。仿真参数如下: 图 1 中四桥臂变换器侧的电感为 2.6 mH, 电源侧的电感和电阻分别为 0.5 mH 和 0.12 Ω, 直流侧电容为 3 620 μF, 直流电压基准值为 1 kV, 三相二极管整流负载的电感和电阻分别为 5 mH 和 8 Ω, 单相二极管整流负载的电感和电阻分别为 1 mH 和 7 Ω, 电源侧阻感负载有功功率和感性无功功率分别为 50 kW 和 50 kVar, 阻容负载有功功率和容性无功功率分别为 30 kW 和 50 kVar, 器件工作频率为 10 kHz。

为了验证本文所提检测方法与控制方案的动态特性和无功阶跃特性, 仿真时间设置如下: 0 < t < 0.1 s, 0.2 < t < 0.3 s, 0.4 < t < 0.5 s, 装置只对非线性负载(由三相二极管整流负载和单相二极管整流负载组成)进行补偿; 0.1 < t < 0.2 s, 投入阻感性负载; 0.3 < t < 0.4 s, 投入阻容性负载。

图 4 为不平衡的电源电压(三相相电压正序 220 V, 负序 40 V)条件下仿真波形, 表 1 为此时负载电流和源电流的 THD 值。图 4 中,  $v_s$  为电源电压,  $I_{nl}$  为非线性负载电流,  $I_{L1}$  为阻感或阻容负载电流,  $I_{ca}$  为装置产生的 a 相补偿电流,  $I_{nl}$  为零线电流,  $I_s$  为源电流,  $I_{ns}$  为补偿后零线电流,  $Q_c$  为装置产生的无功功率,  $Q_1$  为装置产生的基波正序无功功率。表 1 为负载电流和源电流的总谐波畸变率 (THD) 值, 其中, I、II 和 III 分别对应时间区域为: 0 < t < 0.1 s、0.1 < t < 0.2 s 和 0.2 < t < 0.3 s。

表 1 电源电压不平衡时, 负载电流和源电流的 THD 值  
Tab.1 THD values of load currents and mains currents under unbalanced mains voltage condition

		非线性负载电流			源电流		
		I	II	III	I	II	III
THD/%	A	17.5	18.4	17.9	3.5	3.1	2.9
	B	24.9	26.3	25.5	3.6	2.9	3.3
	C	36.2	38.4	37.1	3.2	2.6	2.5

由表 1 可知,三相负载电流  $THD$  值由 17.5% 到 38.4% 不等,经谐波补偿后,源电流  $THD$  值不大于 4%。由图 4 可知,零线电流峰值接近 50 A,经不平衡补偿后,这个值稳态时已不到 3 A;源电流和电源电压相位趋于一致;无功阶跃响应时间不到 20 ms;负载投切时的动态响应时间在一个周波以内。

这说明,在电源电压不平衡的情况下,所提检测方法及其控制方案具备很好的谐波抑制、无功和负载不平衡补偿效果、良好的动态特性和快捷的无功阶跃响应;并且实现了对基波正序无功功率的全补偿,电源侧功率因数接近 1。

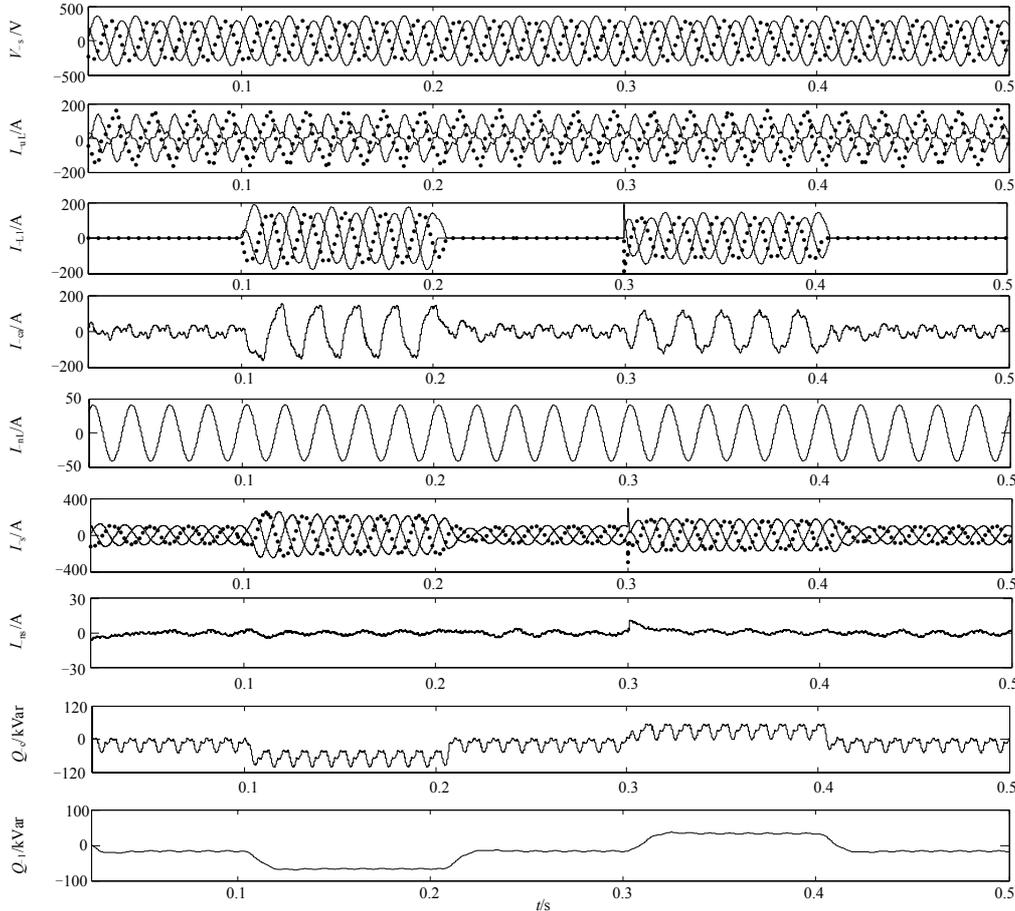


图 4 电源电压不平衡时,电压、电流和无功功率仿真波形  
Fig.4 Unbalanced mains voltage simulation results

图 5 为畸变电源电压(三相基波 220 V, 谐波 5 次 22 V, 7 次 15 V)条件下仿真波形,表 2 为此时负载电流和源电流的  $THD$  值。

表 2 电源电压畸变时,负载电流和源电流的  $THD$  值  
Tab.2 THD values of load currents and mains currents under distorted mains voltage condition

		非线性负载电流			源电流		
		I	II	III	I	II	III
$THD/\%$	A	16.2	15.7	14.6	3.5	2.1	3.2
	B	18.6	19.3	17.8	3.6	2.5	2.5
	C	17.4	18.1	16.7	3.2	1.9	2.1

图 6 为不平衡且畸变的电源电压(三相基波 220 V, 谐波 5 次 22 V, 7 次 15 V, 负序 22 V)条件下仿真波形,表 3 为此时负载电流和源电流的  $THD$  值。

表 3 电源电压不平衡且畸变时,负载电流和源电流的  $THD$  值

Tab.3 THD values of load currents and mains currents under unbalanced-distorted mains voltage condition

		非线性负载电流			源电流		
		I	II	III	I	II	III
$THD/\%$	A	15.6	16.3	15.9	3.8	2.9	3.2
	B	22.8	23.6	21.7	3.7	3.3	2.5
	C	26.5	27.4	25.8	3.6	2.7	2.3

图 5 和图 6 显示,在电源电压畸变和电源电压不平衡且畸变这两种情况下,所提检测方法及其控制方案同样具备很好的谐波抑制、无功补偿和不平衡补偿效果,而且动态特性良好、无功阶跃响应快捷。

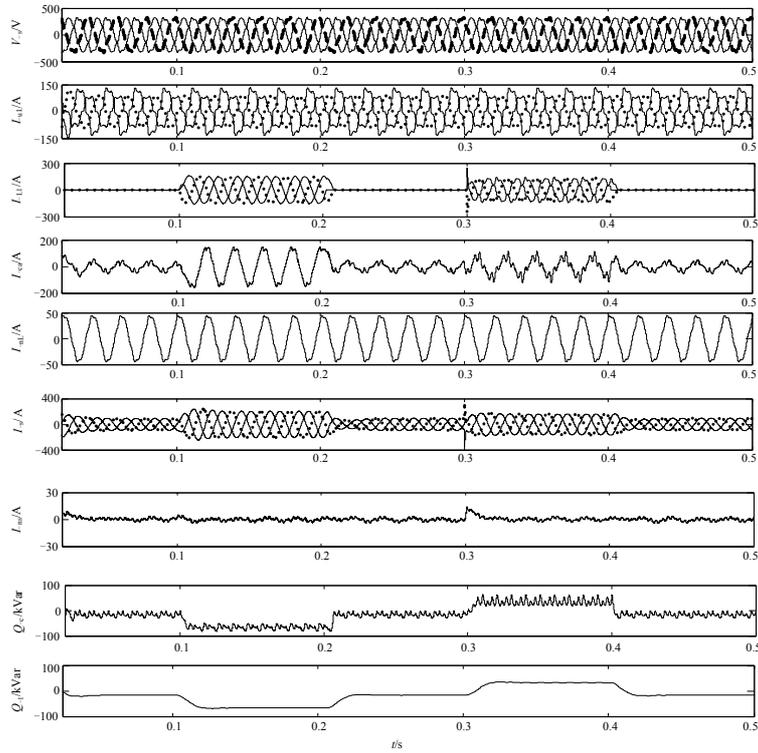


图 5 电源电压畸变时，电压、电流和无功功率仿真波形  
Fig.5 Distorted mains voltage simulation results

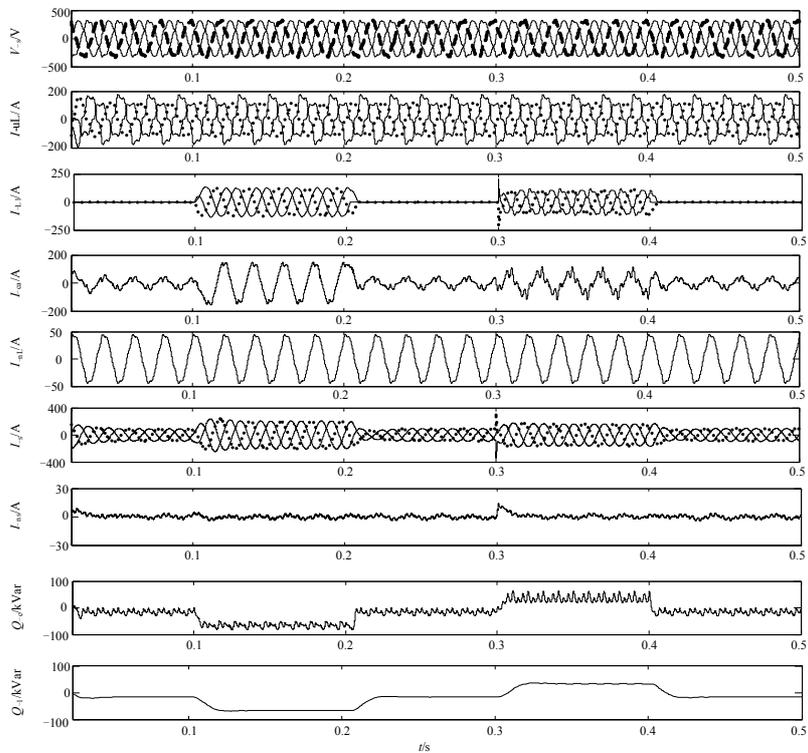


图 6 电源电压不平衡且畸变时，电压、电流和无功功率仿真波形  
Fig.6 Unbalanced-distorted mains voltage simulation results

## 5 结论

本文提出了一种适合于四桥臂三相四线并联型 APF-STATCOM 装置的谐波、无功和不平衡电流的检测方法, 它能在电网电压不平衡或畸变时准确检测出基波正序有功电流和无功电流; 并以此方法为基础, 给出了一种能在电网电压不理想和负载不对称且非线性的条件下对基波正序无功功率进行独立补偿的控制方案。仿真结果验证了本文所提检测方法与控制方案能在同一装置上用同一原理同时实现谐波抑制、无功和负载不平衡补偿这几种功能, 而且具备良好的动态特性和快捷的无功阶跃响应。

## 参考文献

- [1] Lamedica R, Esposito G. A survey on power quality cost in industrial loads[C].//IEEE Winter Power Meeting. 2001: 938-943.
- [2] 陈国柱, 吕征宇, 钱照明. 有源电力滤波器的一般原理及应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 17-21.  
CHEN Guo-zhu, Lü Zheng-yu, QIAN Zhao-ming. The general principle of active filter and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 17-21.
- [3] 栗春, 马晓军, 姜齐荣, 等. 用 STATCOM 改善系统电压调节特性的动模实验[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(9): 46-49.  
LI Chun, MA Xiao-jun, JIANG Qi-rong, et al. The experimental research on STATCOM to mitigate the voltage sag under load disturbance[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(9): 46-49.
- [4] Aredes M, Hafner I, Heumann K. Three-phase four-wire shunt active filter control strategies[J]. IEEE Trans Power Electron, 1997, 12(2): 311-318.
- [5] Peng F Z, Ott G W, Adams D J. Harmonic and reactive power compensation based on the generalized instantaneous reactive power theory for three-phase four-wire systems[J]. IEEE Trans Power Electron, 1998, 13(5): 1174-1181.
- [6] JIN Tao-tao, CHEN Xiao-fan, Smedley K M. A new one-cycle controlled FACTS element with the function of STATCOM and active power filter[C].//Industrial Electronics Society, 2003. IECON'03. The 29th Annual Conference of the IEEE. 2003: 2634-2638.
- [7] Ucar M, Ozdemir E, Kale M. An analysis of three-phase four-wire active power filter for harmonic elimination reactive power compensation and load balancing under non-ideal mains voltage[C]. // Proc of the 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference PESC. 2004:3089-3094.
- [8] Akagi H, Kanazawa Y, Nabae A. Instantaneous reactive power compensators compromising switching devices without energy storage components[J]. IEEE Trans on Ind Appl, 1984, 20(3): 625-630.
- [9] Takeda M, Ikeda K, Teramoto A, et al. Harmonic current and reactive power compensation with and active filter[C].//IEEE PESC'98. Fukuho-ka(Japan): 1998: 1174-1179.
- [10] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制与无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998: 216-230.
- [11] 孙驰, 魏光辉, 毕增军. 基于同步坐标变换的三相不对称系统的无功与谐波电流的检测[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 43-48.  
SUN Chi, WEI Guang-hui, BI Zeng-jun. Detection for reactive and harmonic currents of unbalanced three-phase systems based on synchronous reference frame transformation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 43-48.
- [12] 马惠, 刘静芳. 基于瞬时无功功率理论的三相电路谐波、无功和不平衡电流检测[J]. 四川电力技术, 2004 (4): 4-7.  
MA Hui, LIU Jing-fang. Detection for harmonic, reactive and unbalanced currents in three-phase systems based on instantaneous reactive power theory[J]. Sichuan Power Technology, 2004(4): 4-7.
- [13] 罗承廉, 纪勇, 刘遵义. 静止同步补偿器(STATCOM)的原理与实现[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

收稿日期: 2010-02-06; 修回日期: 2010-04-03

作者简介:

刘海波(1976-), 男, 博士, 工程师, 研究方向为风力发电技术及大功率电力电子技术在电力系统中的应用; E-mail: liucaifan@yahoo.com.cn

毛承雄(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 从事大型同步发电机最佳励磁控制、大功率电力电子技术在电力系统中的应用以及电力系统动态仿真方面的研究;

陆继明(1956-), 男, 教授, 主要研究领域为电力系统运行与控制。

(上接第 10 页 continued from page 10)

GE Yao-zhong. New types of protective of relaying and fault location their theory and technigues[M]. Second edition. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2007.

- [8] 陈皓. 微机保护原理及算法仿真[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

CHEN Hao. Microprocessor-based protection principle and simulation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.

- [9] 董新洲, 毕广见. 配电线路暂态行波的分析 and 接地选线研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (4): 1-6.

DONG Xin-zhou, BI Guang-jian. Analysis on transient traveling wave and study on fault line selection for distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (4): 1-6.

收稿日期: 2009-09-14; 修回日期: 2009-10-01

作者简介:

赵化时(1985-), 男, 助工, 主要研究方向为电力系统故障分析和诊断; E-mail: zhaohuashi@sgepri.sgcc.com.cn

姚李孝(1962-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为电力系统规划与运行。