

# 三相四线有源电力滤波器控制算法仿真研究

常鹏飞, 王彤, 曾继伦

(国电自动化研究院, 江苏 南京 210003)

摘要: 对三相四线有源电力滤波器控制算法进行研究, 在电流检测部分针对三相四线制系统中零线的存在, 首先提取出零序电流分量, 然后利用三相三线制系统中基于瞬时无功功率理论的  $i_b$ 、 $i_q$  检测法进行检测, 即可实现三相四线制系统中的电流检测; 在补偿电流控制部分采用新型的 3D-SVPWM 技术。在 3D-SVPWM 技术中, 零矢量变为零轴上的正向和负向电压矢量, 对逆变器的输出有影响。3D-SVPWM 技术合理利用两个零矢量对输出的影响, 解决了三相四线制系统中的中线电流问题, 实现了对不平衡电流的补偿。文中给出了仿真实验的结果, 验证了该方法的正确性, 并且达到了较好的补偿效果, 有效地提高了电能质量。

关键词: 三相四线; 有源电力滤波器; 瞬时无功功率; 3D-SVPWM; 电能质量

中图分类号: TM477 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)09-0043-07

## 0 引言

有源电力滤波器 (Active Power Filter, 简称 APF) 是一种新型的谐波抑制和无功补偿的电力电子装置, 它采用大功率、高开关频率的开关器件, 具有功率换流器的高度可控性和快速响应性, 其最大特点是能迅速的动态跟踪补偿随机的谐波电流, 可有效克服传统 LC 无源滤波器在谐波抑制和无功补偿中存在的问题, 具有众多优点<sup>[1]</sup>, 是一种新型的谐波和无功的综合补偿系统, 具有良好的应用前景。

以往的有源电力滤波器研究大多建立在三相三线制系统的基础上, 并取得了许多研究成果, 已在实际系统中得到应用。在三相四线制系统中如何使用有源电力滤波器, 是近年来许多国内外研究者所关心的问题。由于三相四线制系统在电力系统中应用的广泛性, 其中的谐波和三相不平衡问题越来越引起人们的重视。根据调查, 办公及家用电器所产生的谐波占整个谐波源的 25% 左右<sup>[1]</sup>, 而且其所占的谐波比重还有逐年上升的趋势, 因此三相四线有源电力滤波器的研究具有十分重要的现实意义。

## 1 系统结构及工作原理

应用于三相四线制系统的并联型有源电力滤波器系统结构如图 1 所示。其基本工作原理是检测补偿对象 (即图中负载) 的电压和电流, 经指令电流运算电路计算出补偿电流的指令信号, 再经补偿电流生成电路放大, 得出补偿电流。补偿电流与负载电流中要补偿的谐波及无功等电流相抵消, 最终得到期望的电源电流。

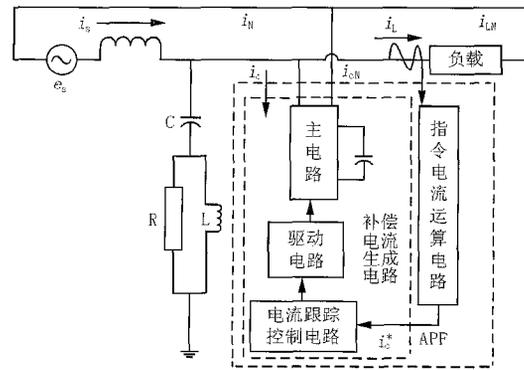


图 1 有源电力滤波器系统结构图

Fig 1 System structure of active power filter

三相四线制与三相三线制系统的区别在于存在零线, 因而三相四线制系统中的有源电力滤波器与三相三线制中的相比, 根本区别在于对三相电流中零序分量的处理。

## 2 电流检测方法概述

目前, 有源电力滤波器电流检测方法主要有: 基于频域分析的傅里叶分析方法, 谐波和无功电流的自适应检测方法, 基于小波变换的谐波检测方法, 基于补偿电流最小原理的谐波和无功电流检测方法, 基于瞬时无功功率理论的谐波、无功和负序电流检测方法等, 这些方法各有其优缺点<sup>[2]</sup>, 相比较而言, 由于瞬时无功功率理论检测方法的突出优点<sup>[1]</sup>, 使之成为当前应用较广的一种检测方法。在三相三线制系统中, 电流检测一般采用基于瞬时无功功率理论的  $i_b$ 、 $i_q$  检测法, 这种方法要求三相电流之和为零。由于三相四线制系统中零线的存在, 三相电流

之和不为零,因而不能直接采用基于瞬时无功功率理论的  $i_p$ 、 $i_q$  检测法。其解决方法是首先求出其零序电流分量,将零序分量从各项电流中剔除,除去零序分量后的三相电流之和等于零,此时即可利用三相三线制情况下的检测方法进行检测,最终得到三相四线制系统中的谐波、基波负序及包括零序在内的补偿电流指令信号。电流检测方法原理图如图 2 所示。此检测方法与三相三线制系统中基于瞬时无功功率理论的  $i_p$ 、 $i_q$  检测法相似,因篇幅所限,其详细运算过程参见文献 [3],本文不再赘述。

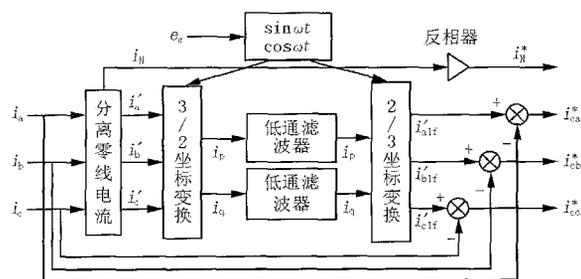


图 2 电流检测方法原理图

Fig 2 Theory of current detection method

### 3 补偿电流控制方法研究

有源电力滤波器补偿电流生成电路的作用是根据检测电路得到的补偿电流指令信号,得出控制补偿电流生成电路中主电路各电力电子器件通断的 PWM 信号,同时控制结果还要求补偿电流能跟踪指令信号的变化。

目前,有源电力滤波器补偿电流控制方法主要有:滞环比较,三角波比较,电压矢量脉宽调制等,这些方法各有特点,其中电压矢量脉宽调制方法采用固定的开关频率,能得到固定的开关时间,其补偿效果显然要优于前两种方法<sup>[2]</sup>。

#### 3.1 电压矢量脉宽调制

电压矢量脉宽调制的基本原理是在检测出谐波电流之后,根据有源电力滤波器的数学模型计算产生补偿电流所需的逆变器各桥臂中点的三相电压,计算此三相电压所构成的空间矢量的幅值,进而得到各电压矢量的开关时间,最后 PWM 生成电路据此产生相应的控制信号控制开关器件的通断,产生补偿电流抵消谐波达到抑制谐波的目的。其特点是采用固定的开关频率,算法简单,易于通过数字方法实现。

#### 3.2 三维空间矢量脉宽调制

在三相三线制系统中,补偿方法一般采用二维空间矢量脉宽调制(2D-SVPWM)技术,但它无法解决三相四线制系统的中线电流问题,这使得三维空间矢量脉宽调制 3D-SVPWM(Three Dimensional Space Vector Pulse Width Modulation)技术应运而生。二维与三维电压矢量脉宽调制最主要的区别在于零矢量的应用。在传统的二维空间矢量调制技术中,零矢量并不产生输出,其作用是优化开关顺序,减少开关损耗,两个零矢量是等效的,因而对于 8 种开关模式实际只有 7 种不同的空间矢量存在。而在三维电压矢量调制中,这两个矢量变为零轴上的正向和负向电压矢量,即有 8 个不同的空间矢量,此时零矢量对输出有影响。正由于这个原因,才可以合理利用这种影响来解决三相四线制系统的中线电流问题。本文将就此种补偿电流控制方法进行研究。

#### 3.3 3D-SVPWM 的实现

图 3 是一个并联在三相四线制系统中的有源电力滤波器,其主电路采用三相逆变器,并且直流侧零线与系统中线相连接。

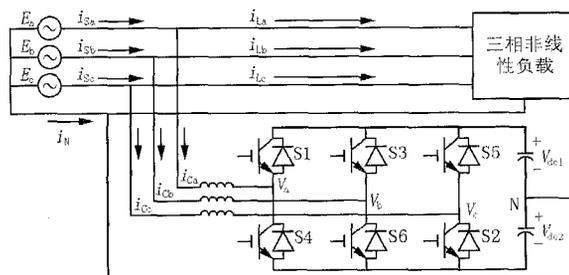


图 3 有源电力滤波器电路图

Fig 3 Circuit of active power filter

假定上半桥臂和下半桥臂直流电压值相等,且  $V_{dc1} = V_{dc2} = V_{dc}$ 。由于系统直流侧零线与系统中线相连接,则某相桥臂导通时,该相桥臂中点电压即为  $V_{dc}$ ;若该相下半桥臂导通,则该相桥臂中点电压即为  $-V_{dc}$ ,依此可定义开关函数为:

$$S_j = \begin{cases} 1 & \text{上桥臂导通} \\ -1 & \text{下桥臂导通} \end{cases} \quad j = a, b, c \quad (1)$$

桥臂中点电压即为:

$$V_j = V_{dc} S_j \quad j = a, b, c \quad (2)$$

此时利用  $-0$  变换:

$$\begin{bmatrix} V \\ V \\ V_{\alpha} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

并将式(2)代入,可得  $\alpha-\beta$  坐标下的瞬时电压矢量为<sup>[4]</sup>:

$$V_s = V_{dc} \left( \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} S_a n + \frac{1}{\sqrt{2}} S_b n + \frac{1}{\sqrt{3}} S_0 n_0 \right) \quad (4)$$

其中:

$$\begin{cases} S_a = S_a - \frac{1}{2} S_b - \frac{1}{2} S_c \\ S_b = S_b - S_c \\ S_0 = S_a + S_b + S_c \end{cases} \quad (5)$$

由式(1)、(5)可列出三维空间电压矢量的开关参数如表1所示。

表1 三维空间电压矢量开关参数表

电压矢量	开关参数					
	$S_a$	$S_b$	$S_c$	$S$	$S$	$S_0$
$V_1$	1	-1	-1	2	0	-1
$V_2$	1	1	-1	1	2	1
$V_3$	-1	1	-1	-1	2	-1
$V_4$	-1	1	1	-2	0	1
$V_5$	-1	-1	1	-1	-2	-1
$V_6$	1	-1	1	1	-2	1
$V_{0p}$	1	1	1	0	0	3
$V_{0n}$	-1	-1	-1	0	0	-3

由以上开关参数表可画出电压矢量在  $\alpha-\beta$  坐标系中的分布图,如图4所示。显然,在  $\alpha-\beta$  坐标系中,  $V_{0p}(1,1,1)$  和  $V_{0n}(-1,-1,-1)$  两个零矢量分别指向零轴的正向和负向,即8种不同的开关模式对应有8个不同的空间矢量;而在二维空间中,8种不同的开关模式实际上只对应7个不同的空间矢量。将三维空间矢量在  $\alpha-\beta$  平面上投影如图5所示,可知它与二维空间矢量的分布是相同的<sup>[4]</sup>,同样分为6个区间,只是两个原处于零轴正负方向的零矢量现处于  $\alpha-\beta$  平面上的原点。

在二维空间矢量中,参考电压矢量  $V_{ref}$  以及调制周期  $T_s$  可表示为:

$$V_{ref} T_s = V_x t_x + V_y t_y + V_{z_{z10}} t_{z_{z10}} \quad (6)$$

$$T_s = t_x + t_y + t_{z_{z10}} \quad (7)$$

其中:  $V_x, V_y$  是参考电压矢量所在不同区间上相邻两个空间矢量;  $t_x, t_y$  是它们所作用时间;  $t_{z_{z10}}$  是矢量

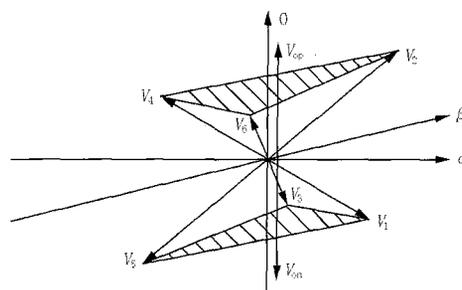


图4 三维空间电压矢量分布图

Fig 4 3D voltage vectors allocation

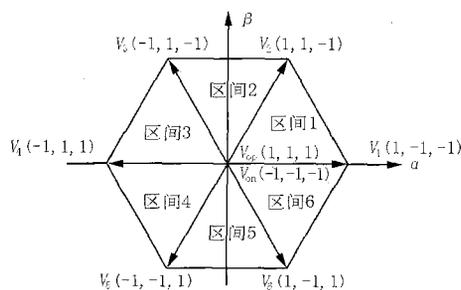


图5 三维空间电压矢量在  $\alpha-\beta$  平面的投影

Fig 5 3D voltage vectors projection in  $\alpha-\beta$  plane

所作用时间。

在三维空间矢量中,由于两个零矢量  $V_{0p}$  和  $V_{0n}$  的作用,参考电压矢量  $V_{ref}$  以及调制周期  $T_s$  可表示为:

$$V_{ref} T_s = V_x t_x + V_y t_y + V_0 t_0 + V_{z_{z10}} t_{z_{z10}} \quad (8)$$

$$T_s = t_x + t_y + t_0 + t_{z_{z10}} \quad (9)$$

其中:

$$V_0 t_0 = V_{0p} t_{0p} + V_{0n} t_{0n} \quad (10)$$

电压矢量  $V_x, V_y$  与二维空间矢量系统中相同,即根据参考电压矢量  $V_{ref}$  在  $\alpha-\beta$  平面上投影所在区间,从  $V_1$  到  $V_6$  中选择与参考电压矢量相邻的两个空间矢量分别作为  $V_x$  和  $V_y$ ;  $V_0$  是根据零轴分量即中线电流的补偿要求来确定究竟是选择  $V_{0p}$  还是  $V_{0n}$ ;比较二维和三维空间矢量的表示方式,可以看出与三维系统中不同的是,在二维脉宽调制中,由于不须考虑中线电流的补偿问题,因此并不存在  $V_0 t_0$  这个分量,所有零矢量都包含在  $V_{z_{z10}} t_{z_{z10}}$  分量中,但是  $V_{z_{z10}} t_{z_{z10}}$  分量对补偿并不产生任何作用,可以认为  $V_{z_{z10}} t_{z_{z10}} = 0$ 。在三维  $\alpha-\beta-0$  坐标系中,由于  $V_{ref}$  是由  $V_x, V_y$  以及  $V_0$  三个矢量共同作用而成,因此  $V_{ref}$  也可表示为此三个矢量的矢量和,即有:

$$V_{ref} = V_x n_x + V_y n_y + V_0 n_0 \quad (11)$$

由式(4)以及表1中的电压矢量参数,在图5所示区间1中,

$$\begin{cases} V_1 = V_{dc} \left( 2 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} n - \frac{\sqrt{1}}{\sqrt{3}} n_0 \right) \\ V_2 = V_{dc} \left( \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} n + \sqrt{2} n + \frac{1}{\sqrt{3}} n_0 \right) \\ V_0 = V_{dc} \left( \pm \sqrt{3} n_0 \right) \end{cases} \quad (12)$$

上式中  $V_0$  由于零轴分量补偿要求的不同, 可有两种形式, 即

$$\begin{cases} V_0 = V_{dc} (\sqrt{3} n_0) & \text{正向补偿选择 } V_{0p} \\ V_0 = V_{dc} (-\sqrt{3} n_0) & \text{负向补偿选择 } V_{0n} \end{cases} \quad (13)$$

则由式 (8)、(12) 可有:

$$V_{ref} = \frac{V_{dc}}{T_s} (T n + T n + T_0 n_0) \quad (14)$$

式中:

$$\begin{cases} T = 2 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} t_1 + \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} t_2 \\ V = \sqrt{2} t_2 \\ T_0 = -\frac{1}{\sqrt{3}} t_1 + \frac{1}{\sqrt{3}} t_2 + (\pm \sqrt{3} t_3) \end{cases} \quad (15)$$

比较式 (11)、(14) 可得:

$$\begin{cases} V = \frac{V_{dc}}{T_s} \left( 2 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} t_1 + \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} t_2 \right) \\ V = \frac{V_{dc}}{T_s} (\sqrt{2} t_2) \\ V_0 = \frac{V_{dc}}{T_s} \left( -\frac{1}{\sqrt{3}} t_1 + \frac{1}{\sqrt{3}} t_2 + (\pm \sqrt{3} t_3) \right) \end{cases} \quad (16)$$

整理可有:

$$\begin{bmatrix} V \\ V \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{T_s} \begin{bmatrix} 2 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} & \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} & 0 \\ 0 & \sqrt{2} & 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \pm \sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} \quad (17)$$

令  $K = \frac{V_{dc}}{T_s}$ , 同理可得每一个区间的计算公式, 式

(17) 可写为如下通用形式:

$$V_{ref} = K A_p t_{y0} \quad (p = 1, 2, 3, \dots, 12) \quad (18)$$

其中: 矩阵  $A_p$  根据参考电压矢量所属区间位置 (position) 的不同来选择, 共有 12 种不同的表达式, 分别列出如下:

$$A_{1,7} = \begin{bmatrix} 2 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} & \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} & 0 \\ 0 & \sqrt{2} & 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \pm \sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (\text{position} = 1, 7)$$

$$A_{2,8} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} & -\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} & 0 \\ \sqrt{2} & \sqrt{2} & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} & \pm \sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (\text{position} = 2, 8)$$

$$A_{3,9} = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} & -2 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} & 0 \\ \sqrt{2} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \pm \sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (\text{position} = 3, 9)$$

$$A_{4,10} = \begin{bmatrix} -2 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} & -\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} & 0 \\ 0 & -\sqrt{2} & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} & \pm \sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (\text{position} = 4, 10)$$

$$A_{5,11} = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} & \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} & 0 \\ -\sqrt{2} & -\sqrt{2} & 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \pm \sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (\text{position} = 5, 11)$$

$$A_{6,12} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} & 2 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} & 0 \\ -\sqrt{2} & 0 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} & \pm \sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (\text{position} = 6, 12)$$

根据式 (18) 求出  $t_x$ ,  $t_y$  和  $t_0$  后, 按照欠调制和过调制两种情况分别计算式 (8) 中各个矢量作用的时间  $t_{kx}$ ,  $t_{ky}$  以及  $t_{k0p}$  和  $t_{k0n}$ 。由于  $V_{ze10}$ ,  $t_{ze10}$  分量对补偿不产生任何影响, 则可将其分解为  $V_{ze10}$ ,  $t_{ze10} = V_{0p} \cdot \frac{t_{ze10}}{2} + V_{0n} \cdot \frac{t_{ze10}}{2}$ 。显然, 在二维系统中,  $V_{0p}$  与  $V_{0n}$  作用时

间相同均为  $\frac{t_{ze10}}{2}$ , 且两个零矢量大小相同方向相反, 对补偿不产生作用; 而在三维系统中, 由于零矢量的作用,  $V_{0p}$  与  $V_{0n}$  的作用时间  $t_{k0p}$  和  $t_{k0n}$  并不相等; 由上分析式 (8) 即可变为:

$$V_{ref} T_s = V_x t_x + V_y t_y + V_0 t_0 + V_{0p} \frac{t_{ze10}}{2} + V_{0n} \frac{t_{ze10}}{2} \quad (19)$$

同时, 式 (8) 还可表示为

$$V_{ref} T_s = V_x t_{kx} + V_y t_{ky} + V_{0p} t_{k0p} + V_{0n} t_{k0n} \quad (20)$$

在欠调制情况下:  $t_{ze10} = T_s - t_x - t_y - t_0$  且  $t_{kx} = t_x$ ,  $t_{ky} = t_y$ ,

则当需要正向的零轴补偿矢量时, 此时  $t_{0p} = t_0$ ,

$t_n = 0$ ,故有

$$\begin{cases} t_{k0p} = t_0 + \frac{t_{zeD}}{2} \\ t_{k0n} = \frac{t_{zeD}}{2} \end{cases}$$

当需要负向的零轴补偿矢量时,此时  $t_p = 0$ ,

$t_n = t_0$ ,故有

$$\begin{cases} t_{k0p} = \frac{t_{zeD}}{2} \\ t_{k0n} = t_0 + \frac{t_{zeD}}{2} \end{cases}$$

在过调制情况下:  $T_s < t_x + t_y + t_0$ ,同时取  $t_{zeD} = 0$ ,此时需按照欠调制情况下的时间比例,重新分配每个矢量的作用时间,则

$$\begin{cases} t_{kx} = \frac{t_x}{t_x + t_y + t_0} T_s \\ t_{ky} = \frac{t_y}{t_x + t_y + t_0} T_s \end{cases}$$

当需要正向的零轴补偿矢量时,此时  $t_p = t_0$ ,

$t_n = 0$ ,故有

$$\begin{cases} t_{k0p} = \frac{t_0}{t_x + t_y + t_0} T_s \\ t_{k0n} = 0 \end{cases}$$

当需要负向的零轴补偿矢量时,此时  $t_p = 0$ ,

$t_n = t_0$ ,故有

$$\begin{cases} t_{k0p} = 0 \\ t_{k0n} = \frac{t_0}{t_x + t_y + t_0} T_s \end{cases}$$

由以上进而得到系统 a, b, c三相在每个区间各相作用时间  $t_a, t_b, t_c$ ,如下:

$$\begin{cases} \begin{cases} t_a = t_{kx} + t_{ky} + t_{k0p} \\ t_b = t_{ky} + t_{k0p} \\ t_c = t_{k0p} \end{cases} & (position = 1, 7) \\ \begin{cases} t_a = t_{kx} + t_{k0p} \\ t_b = t_{kx} + t_{ky} + t_{k0p} \\ t_c = t_{k0p} \end{cases} & (position = 2, 8) \\ \begin{cases} t_a = t_{k0p} \\ t_b = t_{kx} + t_{ky} + t_{k0p} \\ t_c = t_{ky} + t_{k0p} \end{cases} & (position = 3, 9) \\ \begin{cases} t_a = t_{k0p} \\ t_b = t_{kx} + t_{k0p} \\ t_c = t_{kx} + t_{ky} + t_{k0p} \end{cases} & (position = 4, 10) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \begin{cases} t_a = t_{ky} + t_{k0p} \\ t_b = t_{k0p} \\ t_c = t_{kx} + t_{ky} + t_{k0p} \end{cases} & (position = 5, 11) \\ \begin{cases} t_a = t_{kx} + t_{ky} + t_{k0p} \\ t_b = t_{k0p} \\ t_c = t_{kx} + t_{k0p} \end{cases} & (position = 6, 12) \end{cases}$$

由以上各相作用时间来控制逆变器输出,即可实现对三相不平衡电流以及谐波和中线电流的补偿。

#### 4 仿真验证

通过以上对三相四线有源电力滤波器控制算法的研究,利用三相四线制系统中基于瞬时无功功率理论的  $i_p, i_q$  检测法进行电流检测,同时利用 3D-SVPWM技术来控制逆变器的输出,建立如图 6所示仿真模型,运用 Matlab进行仿真。

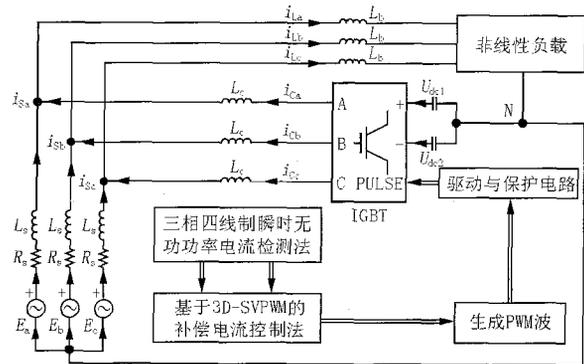


图 6 三相四线有源电力滤波器仿真模型简图

Fig 6 Simulation model of three-phase four-wire active power filters

主要仿真条件为:电源电压为 380 V,工频 50 Hz;电源侧电阻为 0.01,电感为  $1e-6$  H;负载侧电感为  $5e-3$  H;直流侧连接电感为  $1e-3$  H;两个直流侧等值电容为 27 200  $\mu$ F;电容运行电压为 700 V; IGBT开关频率为 10 kHz等。

图 7和图 8是有源电力滤波器对三相不平衡电流进行补偿的情况,其中图 7是补偿前的负载侧三相不平衡电流波形和中线电流,可以看出 C相电流很小而中线电流则过大。图 8是补偿后电源侧的三相电流波形及中线电流。

比较图 7和图 8显然可以看出,图 6中的三相不平衡电流通过仿真后在图 8中已基本达到三相平衡,而中线电流经过补偿后也接近于零,仿真表明本文所提控制算法能很好地实现对三相不平衡电流以

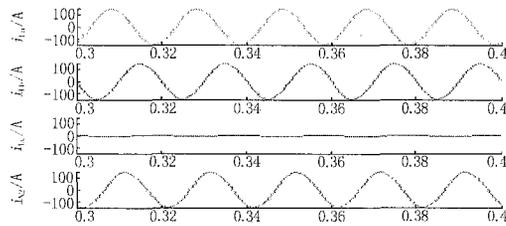


图 7 补偿前负载侧电流波形

Fig 7 Load current waveform before compensation

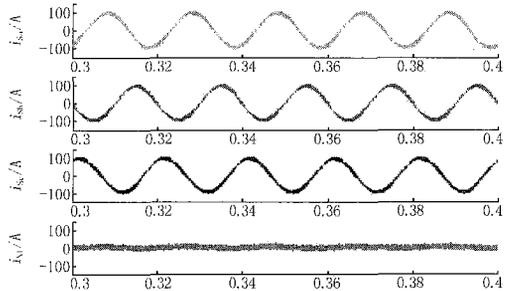


图 8 补偿后电源侧电流波形

Fig 8 Source current waveform after compensation

及中线电流的同时补偿。

图 9和图 10是有源电力滤波器对谐波电流进行补偿的情况,其中图 9是补偿前负载侧谐波电流波形和中线电流,可以看出 A、B、C三相均含有高次谐波,而中线电流则过大。图 10是补偿后电源侧的三相电流波形及中线电流。表 2是对高次谐波进行补偿的前后三相电流中所含主要谐波含量的比较。

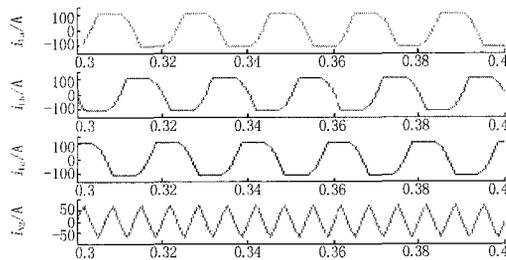


图 9 补偿前负载侧电流波形

Fig 9 Load current waveform before compensation

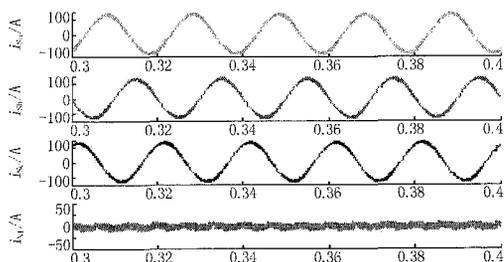


图 10 补偿后电源侧电流波形

Fig 10 Source current waveform after compensation

表 2 主要高次谐波含量比较

Tab 2 Primary higher harmonic contents comparison (%)					
谐波次数	3	5	7	9	11
补偿前	15.545	3.205	2.197	1.080	0.829
补偿后	1.307	0.239	0.773	0.516	0.306

比较图 9和图 10显然可以看出,图 9中所含谐波的三相电流通过仿真后在图 10中已基本消除了原先所含高次谐波,这在表 2所列补偿前后主要谐波含量的比较中得到了具体的验证,补偿后的谐波含量较之补偿前有了大幅下降。图 10所示中线电流经过补偿后也大幅减少,仿真表明本文所提控制算法能很好地实现对含高次谐波的三相电流以及中线电流同时进行补偿。

仿真中还发现,在其它条件保持不变的情况下,开关频率越高,补偿效果越好;直流侧电容容值增大,对中线电流的补偿效果越好。

## 5 结语

本文对三相四线制系统有源电力滤波器控制算法进行研究,在电流检测部分针对三相四线制系统中零线的存在,首先提取出零序电流分量,然后利用三相三线制系统中基于瞬时无功功率理论的  $i_f$ 、 $i_g$  检测法进行检测,即可实现三相四线制系统中的电流检测;在补偿电流控制部分采用新型的 3D-SVPWM 技术。在 3D-SVPWM 技术中,零矢量变为零轴上的正向和负向电压矢量,对逆变器的输出有影响。3D-SVPWM 技术合理利用两个零矢量对输出的影响,解决了三相四线制系统中的中线电流问题,实现了对不平衡电流、谐波电流和中线电流的补偿。利用三相四线制系统中基于瞬时无功功率理论的  $i_f$ 、 $i_g$  检测法进行电流检测,同时利用 3D-SVPWM 技术来控制逆变器的输出,仿真结果表明,所提方法达到了较好的补偿效果。

## 参考文献:

- [1] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿 [M]. 北京:机械工业出版社,1998  
WANG Zhao-an, YANG Jun, LIU Jin-jun Harmonics Elimination and Reactive Power Compensation [M]. Beijing: China Machine Press, 1998
- [2] 高大威. 电力系统谐波、无功和负序电流综合补偿的研究(博士学位论文) [D]. 北京:华北电力大学, 2001.  
GAO Da-wei Study on the Integrated Compensation of Harmonic, Reactive and Negative Sequence Currents in

- Power System, Doctoral Dissertation [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2001.
- [3] 卓放,杨君,胡军飞,等. 三相四线制系统并联型有源电力滤波器实验研究 [J]. 电力电子技术, 1999, (12): 16-18  
ZHUO Fang, YANG Jun, HU Jun-fei, et al Study on Shunt Active Power Filter Device Used for Three-phase Fourwire[J]. Power Electronics, 1999, (12): 16-18
- [4] WONG Man-chung, ZHAO Zheng-yi, HAN Ying-duo, et al Three-dimensional Pulse-width Modulation Technique in Three-level Power Inverters for Three-phase Fourwired System [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2001, 16 (3): 418-427.

收稿日期: 2004-08-11; 修回日期: 2004-09-27

作者简介:

常鹏飞 (1980 - ),男,硕士研究生,研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用; Email: pfchang@nari-china.com

王彤 (1971 - ),男,硕士,工程师,主要研究方向为大功率电力电子变流器;

曾继伦 (1942 - ),男,硕士,教授级高级工程师,主要研究方向为电力系统运行与控制、水轮机调速以及电力电子在电力系统中的应用等。

### Simulation research on control method of three-phase four-wire active power filters

CHANG Peng-fei, WANG Tong, ZENG Ji-lun

(Nanjing Automation Research Institute, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** This paper studies on control method of three-phase four-wire active power filters, and introduces the  $i_p$  and  $i_q$  detecting method based on the theory of instantaneous reactive power. It introduces the space vectors' distribution and the realization of 3D-SVPWM in detail. At the current detecting part, because of the exist of the neutral line, it separates the null current at first, and then detects the three-phase current based on the theory of instantaneous reactive power which can realize the current detecting in three-phase four-wire system. It adopts the 3D-SVPWM technique at the compensation current control part. In the 3D-SVPWM technique, the null vectors which change into the positive vector and the negative vector influence the outputs of the converters. The 3D-SVPWM technique solves the problem of the neutral line current by this influence and realizes the compensation for the imbalance, harmonic and neutral currents. The simulation results show that the 3D-SVPWM technique is valid. It obtains better compensation effect and improves power quality.

**Key words:** three-phase four-wire; active power filter; instantaneous reactive power; three-dimensional space vector pulse width modulation (3D-SVPWM); power quality

(上接第 8 页 continued from page 8)

(School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Based on Zhejiang electricity market, the relation between average price and price cap in the different increase rates of bidding bid is analyzed with the relation curve of SCP and average generation price. From the view of the return rate of capital, the adequate price cap could be estimated in accordance with the increase rate of bidding bid and the average cost of electricity-generating.

**Key words:** price cap; electricity market; system surplus capacity percent (SCP); return rate of capital

(上接第 20 页 continued from page 20)

### Short-term load fast forecasting based on support vector regression

WANG Li-dong, LI Zhi-yu, WEN Jin-yu

(1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Liuzhou Hydropower Exploration and Design Institute, Liuzhou 545000, China)

**Abstract:** An online training algorithm for short-term load fast forecasting based on SVR (Support Vector Regression) method is presented. In order to provide the accurate forecasted load, the regression function is updated by inputting new load data in the proposed algorithm. The online training algorithm not only results in a smaller number of support vectors with the same accuracy preserved but also has a much faster convergence and a better generalization performance compared with the conventional SVR algorithms. The results obtained from experiments show that the algorithm can achieve great forecasting accuracy and high computing speed.

This project is supported by XJ Bounty of China Electricity Fund

**Key words:** short-term load forecasting; support vector machine; support vector regression