

四桥臂有源滤波器电流控制新方法

提出了一种基于空间电压矢量的四桥臂有源电力滤波器 (APF) 电流控制方法。方法将三维电压空间矢量统一划分成四个对等的平行六面体, 每个平行六面体空间代表一组相间电流控制对象, 通过控制该组电流可简单实现电流解耦控制。通过一组外滞环比较器, 快速判定参考电压所在六面体区域; 通过一组三角波和内滞环比较器组成的混合控制器控制相应平行六面体区域内相应相间误差电流, 实现准定频控制。最后运用PSCAD/EMTDC电力暂态仿真软件验证, 结果表明了方法的有效性。

曾 江 陈浩平/华南理工大学电力学院

0 引言

我国380 V系统均为三相四线制, 存在零序电流, 三相四线制设备给系统带来的谐波、三相不平衡日益严重, 此时采用三相三线制的有源电力滤波器 (APF) 无法消除线路中的零序基波、谐波分量, 治理这些谐波问题最好的途径是采用三相四线制APF^[1-2]。

四桥臂三相四线 APF如图1所示。这种电路拓扑易于实现, 控制简单, 具有较高的直流利用率, 直流输入电容较小, 并已相应出现了多种控制方法^[3-6]。



曾 江/副教授

关键词/Keywords

四桥臂·
有源电力滤波器·
空间矢量·
电流控制·

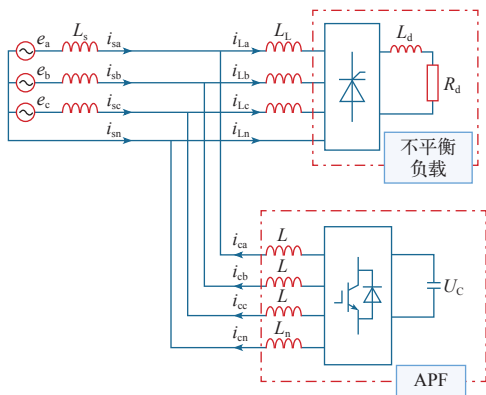


图1 三相四线制四桥臂APF接入系统图

三维空间矢量脉宽调制 (SVPWM) 技术具有开关频率固定、直流电压利用率高以及控制准确度高等优点。近年不少文献提出基于空间矢量的电流控制方法。文献[7]利用 γ 分量单独控制电压第四桥臂, 文献[8]对前三桥臂采用传统二维空间矢量控制, 第四桥臂采用三角波比较控制, 都需检测三相电压和电流且考虑三相电流与中线电流解耦。文献[9]提出一种解耦控制策略, 把滤波电感看作是电源的内部阻抗, 通过引入变量及变换控制的方式, 将零线相阻抗值等效变换为零, 控制系统相对复杂。

文献[10]提出了一种采用两个三电平滞环比较器和一个两电平滞环比较器相结合的内环电流调节方案, 没有利用零矢量。

文献[11]提出了一种基于三电平和多电平滞环比较器的空间矢量电流调节方案, 文献[12]在 $\alpha\beta\gamma$ 坐标下利用三个最高开关频率受限的三电平比较器输出对电流直接控制, 但其设计和参数调整较复杂, 比较器输出模态有冗余。

文献[13]提出一种利用相间电流实现三相解耦进行定频控制的方法, 但只研究了在三相三线制上应用。本文在此基础上, 提出一种基于空间电压矢量的三相四桥臂APF电流控制新方法。该方法将三维电压空间矢量统一划分成四个对等的平行六面体, 每个平行六面体空间代表一组相间电流控制对象, 通过控制该组电流可简单实现电流解耦控制。通过一组外滞环比较器, 快速判定参考电压所在六面体区域; 通过一组三角波

和内滞环比较器组成的混合控制器控制相应平行六面体区域内相应相间误差电流，实现准定频控制。最后运用PSCAD/EMTDC电力暂态仿真软件验证，结果表明了本方法的有效性。

1.1 主电路及其三维空间电压矢量

三相四线制四桥臂APF主电路拓扑等效电路如图2所示。

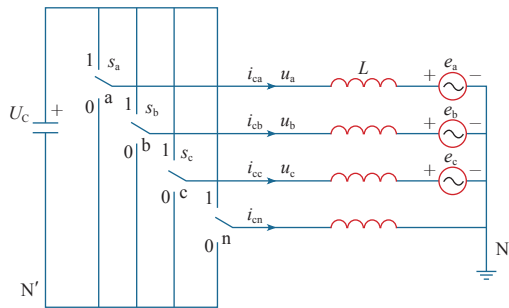


图2 三相四线制四桥臂APF主电路拓扑

逆变器桥臂开关状态可分别用开关函数 S_a 、 S_b 、 S_c 和 S_n 表示， S 取值为1或0，1表示上桥臂导通下桥臂关断，0则相反。则APF桥臂交流输出电压为

$$\begin{cases} u_{ab} = U_{dc}(S_a - S_b) \\ u_{bc} = U_{dc}(S_b - S_c) \\ u_{ca} = U_{dc}(S_c - S_a) \\ u_{an} = U_{dc}(S_a - S_n) \\ u_{bn} = U_{dc}(S_b - S_n) \\ u_{cn} = U_{dc}(S_c - S_n) \end{cases} \quad (1)$$

四桥臂APF电压空间矢量为三维空间分布。三相静止abc坐标系转换到三相静止 $\alpha\beta\gamma$ 空间坐标系的逆变器输出电压的转换公式为

$$\begin{pmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \\ U_\gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_{an} \\ U_{bn} \\ U_{cn} \end{pmatrix} \quad (2)$$

根据式（1）和式（2），得到如表1所示的16种开关状对应的 u_{an} 、 u_{bn} 、 u_{cn} 和 $\alpha\beta\gamma$ 下的坐标值，其中 U_{dc} 为直流电压。由表1得到APF桥臂交流电压输出在 $\alpha\beta\gamma$ 坐标下16个空间电压矢量分布图如图3所示。

表1 三相四桥臂开关状态

序号	开关状态 ($S_a S_b S_c S_n$)	abc对n点电压 ($U_{an} U_{bn} U_{cn}$) 值1表示 U_{dc}	空间矢量电压		
			U_α	U_β	U_γ
0	(0000)	(0, 0, 0)	0	0	0
1	(0001)	(-1, -1, -1)	0	0	$-U_{dc}$
2	(0010)	(0, 0, 1)	$-1/3U_{dc}$	$-\sqrt{3}/3U_{dc}$	$1/3U_{dc}$
3	(0011)	(-1, -1, 0)	$-1/3U_{dc}$	$-\sqrt{3}/3U_{dc}$	$-2/3U_{dc}$
4	(0100)	(0, 1, 0)	$-1/3U_{dc}$	$\sqrt{3}/3U_{dc}$	$1/3U_{dc}$
5	(0101)	(-1, 0, -1)	$-1/3U_{dc}$	$\sqrt{3}/3U_{dc}$	$-2/3U_{dc}$
6	(0110)	(0, 1, 1)	$-2/3U_{dc}$	0	$2/3U_{dc}$
7	(0111)	(-1, 0, 0)	$-2/3U_{dc}$	0	$-1/3U_{dc}$
8	(1000)	(1, 0, 0)	$2/3U_{dc}$	0	$1/3U_{dc}$
9	(1001)	(0, -1, -1)	$2/3U_{dc}$	0	$-2/3U_{dc}$
10	(1010)	(1, 0, 1)	$1/3U_{dc}$	$-\sqrt{3}/3U_{dc}$	$2/3U_{dc}$
11	(1011)	(0, -1, 0)	$1/3U_{dc}$	$-\sqrt{3}/3U_{dc}$	$-1/3U_{dc}$
12	(1100)	(1, 1, 0)	$1/3U_{dc}$	$\sqrt{3}/3U_{dc}$	$2/3U_{dc}$
13	(1101)	(0, 0, -1)	$1/3U_{dc}$	$\sqrt{3}/3U_{dc}$	$-1/3U_{dc}$
14	(1110)	(1, 1, 1)	0	0	U_{dc}
15	(1111)	(0, 0, 0)	0	0	0

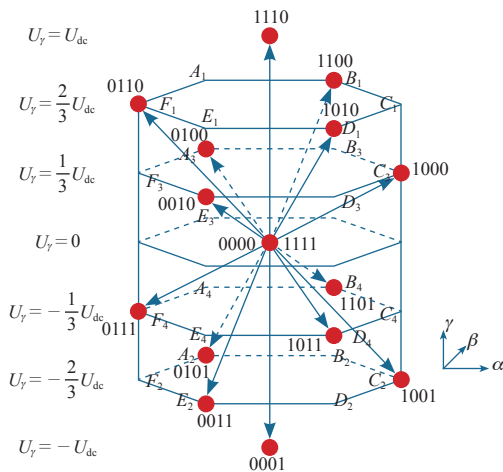


图3 三相四桥臂APF三维空间电压矢量图

1.2 利用两相开关控制相间电流实现解耦控制

图2为三相四线APF的主电路，由图2可得到电路的瞬时值方程

$$\begin{cases} L di_{ca} / dt = u_{aN} - e_a \\ L di_{cb} / dt = u_{bN} - e_b \\ L di_{cc} / dt = u_{cN} - e_c \\ L_n di_{cn} / dt = u_{nN} - 0 \end{cases} \quad (3)$$

桥臂输出相电压为

$$\begin{cases} u_{aN'} = S_a U_{dc} \\ u_{bN'} = S_b U_{dc} \\ u_{cN'} = S_c U_{dc} \\ u_{nN'} = S_n U_{dc} \end{cases} \quad (4)$$

中性点电压不为零，有

$$\begin{cases} u_{aN} = u_{aN'} - u_{nN'} \\ u_{bN} = u_{bN'} - u_{nN'} \\ u_{cN} = u_{cN'} - u_{nN'} \\ u_{nN} = u_{nN'} - u_{nN'} \end{cases} \quad (5)$$

电流约束

$$i_a + i_b + i_c + i_n = 0 \quad (6)$$

零序电压

$$E_0 = \frac{e_a + e_b + e_c}{3} \quad (7)$$

结合式(1)、式(3)~式(7)，假设电压源是没有畸变的正弦电压，忽略零序电压，即 E_0 等于0，得中点电压差

$$u_{nN'} = \frac{L_n}{3L_n + L} U_{dc} \left(S_a + S_b + S_c + \frac{L}{L_n} S_n \right) \quad (8)$$

式(4)、式(8)代入式(5)得四桥臂各相输出电压

$$\begin{cases} u_{aN} = U_{dc} \frac{L_n}{3L_n + L} \left(\frac{2L_n + L}{L_n} S_a - S_b - S_c - \frac{L}{L_n} S_n \right) \\ u_{bN} = U_{dc} \frac{L_n}{3L_n + L} \left(\frac{2L_n + L}{L_n} S_b - S_c - S_a - \frac{L}{L_n} S_n \right) \\ u_{cN} = U_{dc} \frac{L_n}{3L_n + L} \left(\frac{2L_n + L}{L_n} S_c - S_a - S_b - \frac{L}{L_n} S_n \right) \\ u_{nN} = U_{dc} \frac{L_n}{3L_n + L} (3S_n - S_a - S_b - S_c) \end{cases} \quad (9)$$

由推导结果可知，四桥臂各相输出电压互相影响，即各相电流之间是互相影响的，单独控制某相电流时会受到其他相开关的影响。为实现准确控制和准定频控制，需要对电流进行解耦。文献[13]提出可应用在三相三线制上的相间电流解耦方法，无须预估系统阻抗，本文将其应用在三相四线制APF控制，增加中性线电流的解耦控制，对四桥臂逆变器的四个桥臂及其相间电流进行统一分析，提出新的四桥臂统一电流解耦方法。

令 $S_b = 0$ ，当参考电压 $u_{ab}^* > 0$ 时，逆变器的a、b的相间电压 $u_{ab} = (s_a - s_b)^* U_{dc}$ ，由电路式(3)可知，其相间电流误差方程为

$$L d\Delta i_{ab} / dt = (S_a - 0) U_{dc} - u_{ab}^* \quad (10)$$

此时相间电流误差 Δi_{ab} 的控制仅与a相开关状态有关。

同理，当 $u_{bc}^* < 0$ 时，c相开关亦可独立控制相间电流 i_{bc} 。其方程为

$$L d\Delta i_{bc} / dt = (0 - S_c) U_{dc} - u_{bc}^* \quad (11)$$

同理，当 $u_{bn}^* < 0$ 时，n相开关也可以单独调控相间电流 i_{bn} 。其方程为

$$L d\Delta i_{bn} / dt = (0 - S_n) U_{dc} - u_{bn}^* \quad (12)$$

因此当 $u_{ab}^* > 0$ ， $u_{bc}^* > 0$ 且 $u_{bn}^* < 0$ 时，如果b相开关固定不动，即 $S_b = 0$ 时，a、c和n相可分别单独地对相间电流 i_{ab} 、 i_{bc} 和 i_{bn} 进行控制，如此实现电流解耦后可对三相电流进行单相控制而不必考虑耦合影响。

从空间上看，图3中面 $E_1 E_2 B_2 B_1$ 、 $A_1 A_2 D_2 D_1$ 、 $F_1 F_2 C_2 C_1$ 分别为 $u_{ab}^* = 0$ 、 $u_{bc}^* = 0$ 及 $u_{ca}^* = 0$ 分界面，面 $F_1 A_3 B_4 C_2 D_4 E_3$ 、 $B_1 A_3 F_4 E_2 D_4 C_3$ 、 $D_1 C_3 B_4 A_2 F_4 E_3$ 分别

为 $u_{an}^* = 0$ 、 $u_{bn}^* = 0$ 及 $u_{cn}^* = 0$ 的分界面，当 $u_{ab}^* < 0$ 、 $u_{bc}^* > 0$ 且 $u_{bn}^* < 0$ 时，参考电压所在区域如图4b所示，即红色线框所示的平行六面体区域内，电压矢量 $u(0)$ 、 $u(1)$ 、 $u(2)$ 、 $u(3)$ 、 $u(8)$ 、 $u(9)$ 、 $u(10)$ 和 $u(11)$ ，位于该平行六面体的顶点，可完全控制住电流误差。而这八个电压矢量的共同点即b相开关合于下臂，即 $S_b = 0$ ，与上文分析一致。a相开关动作时，电压矢量在 $u(1) \sim u(9)$ 之间、 $u(0) \sim u(8)$ 之间相互切换，逆变器的相间输出电压 u_{bc} 、 u_{nb} 不变，相间电流误差 Δi_{bc} 、 Δi_{nb} 不受任何影响，即a相开关可独立控制 Δi_{ab} 而对 Δi_{bc} 、 Δi_{nb} 无影响。同理可说明，c相开关动作时亦可独立控制 Δi_{bc} 而对 Δi_{ab} 、 Δi_{nb} 无影响，n相开关动作时亦可独立控制 Δi_{nb} 而对 Δi_{ab} 、 Δi_{bc} 无影响。这与式(10)~式(12)得出的结论一致。

据此，可将三维空间矢量所在区域划分成四个平行六面体。如图4所示，分别为I、II、III、IV区域，具体分区及对应的开关控制状态如表2所示。只要确定了 u^* 位于哪一个平行六面体内，就可以得到相应的控制方程，对适当的三相采用独立的三角波滞环定频控制，而不存在三相之间的相互干扰问题。

2 参考电压区域判定

参考电压 u^* 所在区域的判定采用一组六个外滞环比较器，分别将误差电流 Δi_{ab} 、 Δi_{bc} 、 Δi_{ca} 、 Δi_{an} 、

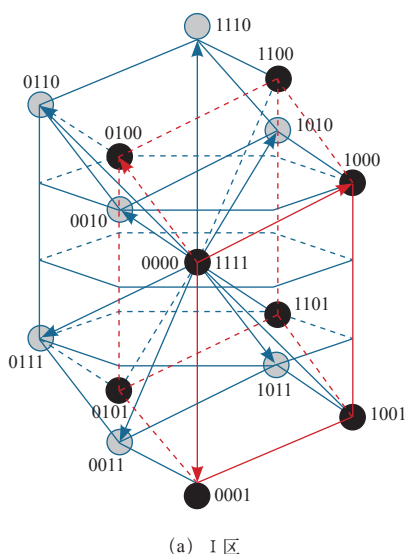
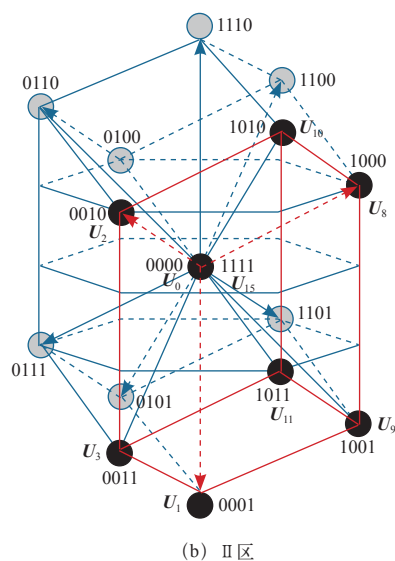
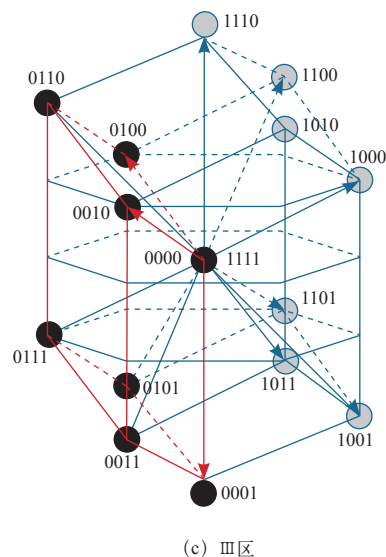
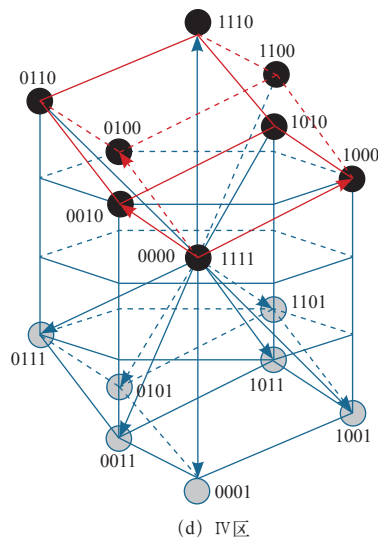


图4 三维空间电压矢量区域划分

表2 空间电压矢量分区及对应的开关控制状态

区间	I	II	III	IV
参考电压范围	$u_{ab}^* < 0$ $u_{ca}^* > 0$ $u_{an}^* < 0$	$u_{ab}^* > 0$ $u_{bc}^* < 0$ $u_{bn}^* < 0$	$u_{bc}^* > 0$ $u_{ca}^* < 0$ $u_{cn}^* < 0$	$u_{an}^* > 0$ $u_{bn}^* > 0$ $u_{cn}^* > 0$
恒定相	a相恒为0	b相恒为0	c相恒为0	n相恒为0
受控相及其误差电流	b相 Δi_{ab}	c相 Δi_{bc}	a相 Δi_{ca}	a相 Δi_{an}
受控相及其误差电流	c相 Δi_{ca}	a相 Δi_{ab}	b相 Δi_{bc}	b相 Δi_{bn}
受控相及其误差电流	n相 Δi_{an}	n相 Δi_{bn}	n相 Δi_{cn}	c相 Δi_{cn}

Δi_{bn} 及 Δi_{cn} 输入六个外滞环比较器，根据输出信号确定参考电压区域，如图5所示。可以证明， S_{ab}^e 为1时说明 $u_{ab}^* < 0$ ，反之则 $u_{ab}^* > 0$ 。知道了 $S^e = (S_{ab}^e, S_{bc}^e, S_{ca}^e, S_{na}^e, S_{nb}^e, S_{nc}^e)$ ，就知道了 u^* 所在区域。其对应关系如表3所示，表3中的x表示与其值无关。

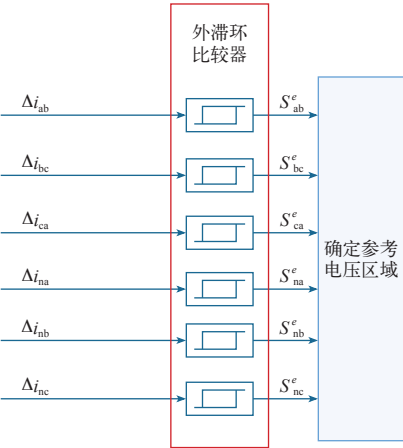


图5 参考电压区域判定

表3 u^* 所在区域与 S^e 关系

S_{ab}^e	S_{bc}^e	S_{ca}^e	S_{na}^e	S_{nb}^e	S_{nc}^e	u^* 所在区域
0	x	1	0	x	x	I
1	0	x	x	0	x	II
0	x	1	x	x	0	III
x	x	x	1	1	1	IV

3 三角波-滞环控制

本文对解耦的相间误差电流采用三角波-滞环电流控制，采用三角波比较与一组内滞环比较器相结合的控制方法，既保持了开关频率的准定

频，又结合了滞环控制响应速度快的优点，电流控制逻辑电路如图6所示。当确定了控制对象后，依据三角波滞环比较输出信号，用三相开关对三个相间误差电流分别独立、互不干扰地控制。控制策略依据如表2所示的设计。

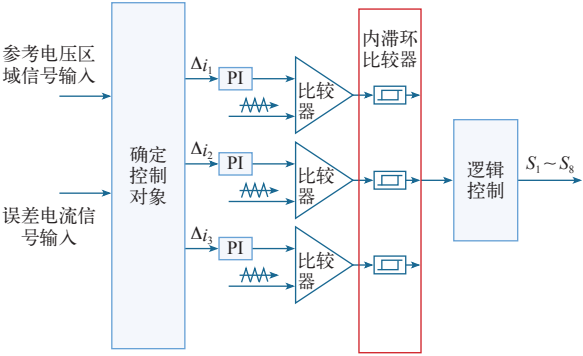


图6 电流控制逻辑电路

对于abc相间电流，其瞬时值满足 $\Delta i_{ab} = -(\Delta i_{bc} + \Delta i_{ca})$ ，因此只要保持两受控开关信号（如b、a相）相位相同，电流（如 Δi_{bc} 、 Δi_{ca} ）相位相反，便可达到减小 Δi_{ab} 幅值的目的，从而降低电流误差，这通过控制三角波信号即可简单做到，可有效提高其电流控制准确度。

而由上文分析的控制方式可知，对中性线电流的控制实际上是通过中性线与abc相电流之差的 i_{an} 、 i_{bn} 和 i_{cn} 的交替控制实现的。只要保持中线受控项开关相位与abc受控项开关相位同相，同样通过控制三角波信号即可简单做到，可有效降低中性线电流，提高电流控制准确度。

4 仿真实验

本文利用电磁暂态仿真程序PSCAD/EMTDC对上述理论分析和控制算法进行仿真验证。主电路仿真模型如图7所示。不平衡负载为一组单相直流感性负载和一组三相整流负载，等效电阻分别为 $R_a = 10 \Omega$ 、 $R_d = 37 \Omega$ ，等效电感分别为 $L_a = 15 \text{ mH}$ 、 $L_d = 15 \text{ mH}$ 。图1中其他系统参数为： U_s 线电压为380 V，整流桥等效电感 $L_L = 0.003 \text{ H}$ ，系统等效电感 $L_s = 0.0009 \text{ H}$ ，APF输出电感 $L = L_n$ 为0.0125 H，直流侧电容电压 $U_c = 800 \text{ V}$ 。三角波频率为7.5 kHz，幅值为1 V。

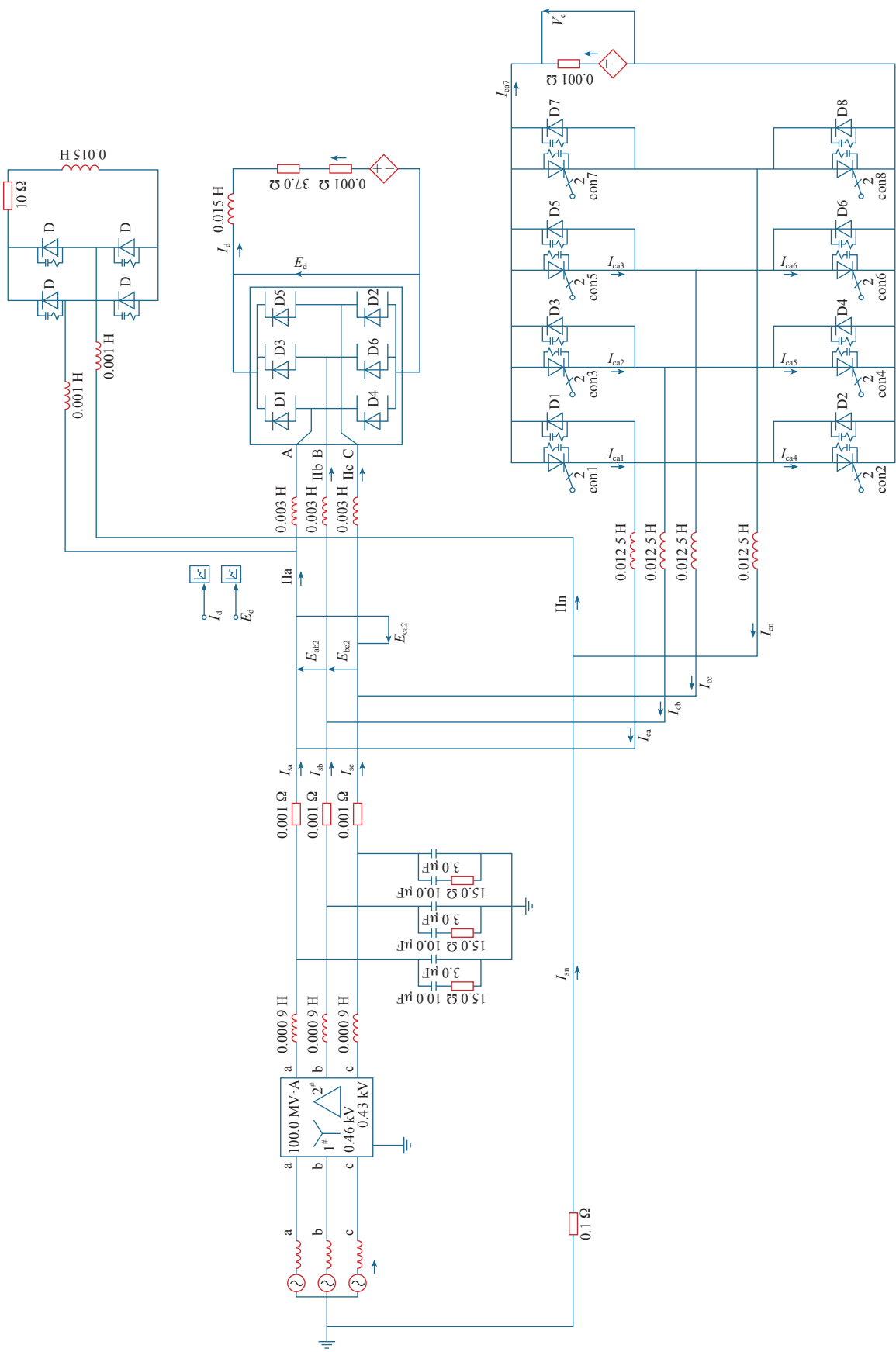


图7 仿真模型

如图8和图9所示,对比可知补偿前三相电流不平衡,中性线电流幅值接近30 A,本文提出的APF控制方法可以有效地补偿负荷侧的谐波电流,中性线电流大幅减小,抑制了三相不平衡。图10为a相误差电流,其范围基本在 $-1\sim 1$ A,图11为中性线误差电流,其范围基本在 $-0.5\sim 0.5$ A,有良好的跟踪性能。

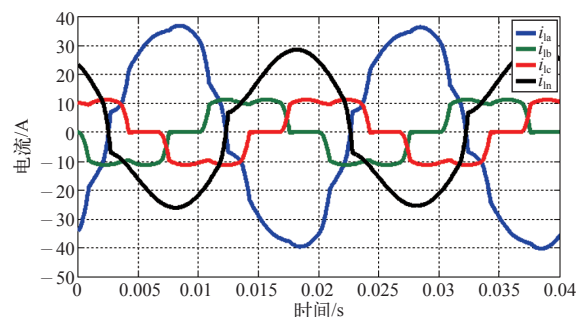


图8 负荷电流图

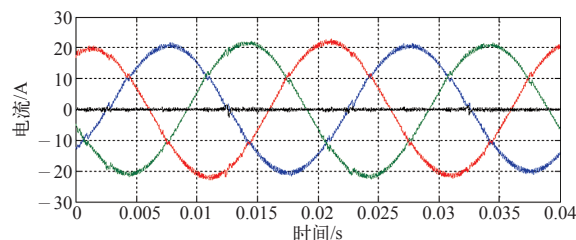


图9 补偿后的系统电流图

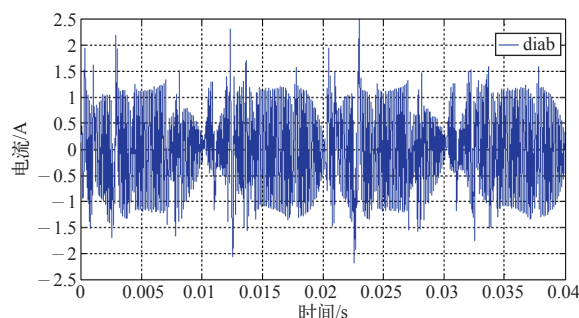


图10 a相电流误差

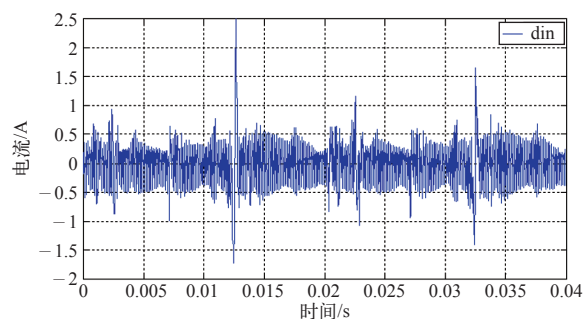


图11 n相电流误差

图12为区域II某时间段内的开关信号与误差电流关系图,可以看到开关频率基本固定,误差电流 Δi_{ca} 、 Δi_{in} 达到最优控制,与上节理论分析一致。

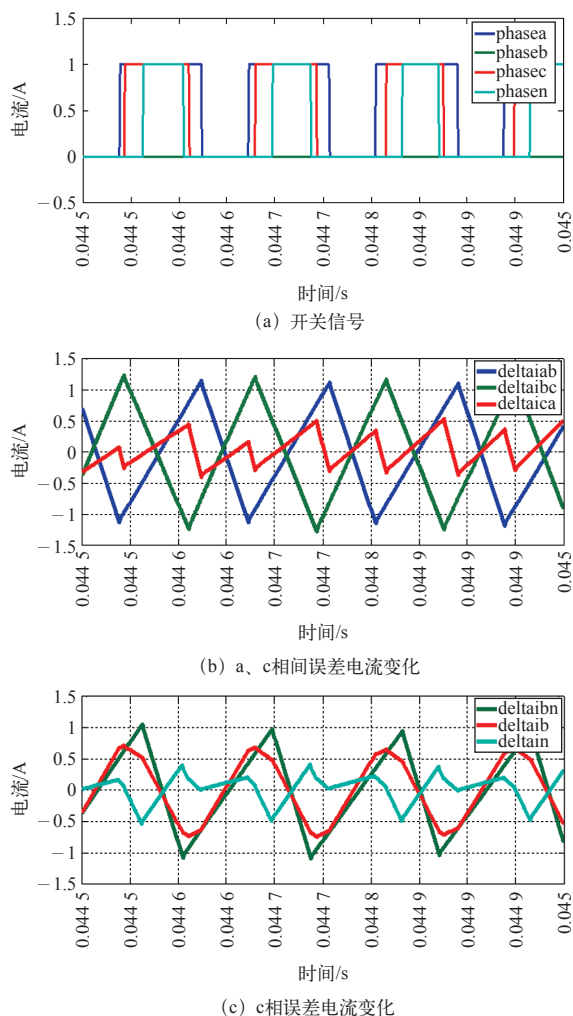


图12 开关信号与误差电流变化图

图13为各相开关次数图,由图13可知,开关频率基本恒定为7.5 kHz,且由于参考电压轨迹基本不经过IV区域,所以控制区域在I、II及III间切换,abc三相开关交替地有一相保持不动,降低了开关次数。

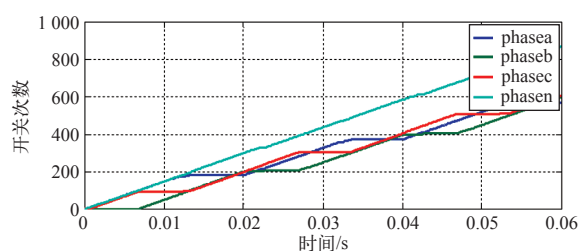


图13 开关频率

5 结束语

本文对四桥臂APF的空间电压矢量和相间电流进行深入分析后,提出了一种基于空间电压矢量的四桥臂APF电流控制新方法。该方法在 $\alpha\beta\gamma$ 坐标系下将三维电压矢量空间重新划分成四个对等的平行六面体区域,每个平行六面体对应一组相互独立的相间控制电流。同时利用一组外滞环比较器,可以快速判断参考电压空间矢量所在平行六面体区域,依据参考电压所在的不同区域,对区域对应的独立相间电流进行独立的三角波滞环电流控制。计算量小、开关频率固定且硬件实现简单。最后利用PSCAD/EMTDC电力暂态仿真软件,验证了本方法能有效地补偿系统中的谐波,减少中性线电流,可抑制中性线电流过大导致的三相不平衡。

参考文献

- [1] Zhang R, Boroyevich D, Prasad V H, et al. A three-phase inverter with a neutral leg with space vector modulation [C]. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1997: 857, 863.
- [2] 杨宏, 阮新波, 严仰光. 四桥臂三相逆变器的PWM控制[J]. 南京航空航天大学学报, 2002, 34(6): 575-579.
- [3] 卓放, 杨君, 胡军飞, 等. 三相四线制有源电力滤波器主电路的结构形式与控制[J]. 电工电能新技术, 2000, 19(2): 1-6.
- [4] Shen D, Lehn P W. Fixed-frequency space-vector-modulation control for three-phase four-leg active power filters [J]. Electric Power Applications, IEEE Proceedings, 2002, 149(4): 268, 274.
- [5] Liang Zhishan, Qiu Yinfeng. Passivity-based control for three-phase four-leg shunt active power filter [C]. IEEE International Control on Control and Automation, 2009: 2106, 2110.
- [6] 龚春英, 熊宇, 郇鸣, 等. 四桥臂三相逆变电源的三维空间矢量控制技术研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(12): 29-36.
- [7] 张晓勇, 王军, 李川, 等. 基于三维空间矢量中 γ 分量控制的三相四桥臂逆变器[J]. 电力自动化设备, 2010(12): 70-73, 87.
- [8] Wang Qunjing, Zhang Qing, Li Guoli, et al. Research on an improved hybrid current control method for APF based on four-leg voltage-source inverters [C]. International Conference on Electrical Machines and Systems, 2009: 1-4.
- [9] 陈宏志, 刘秀翀. 四桥臂三相逆变器的解耦控制[J]. 中国电机工程学报, 2007(19): 74-79.
- [10] 孙驰, 毕增军, 魏光辉. 一种新颖的三相四桥臂逆变器解耦控制的建模与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 124-130.
- [11] Ali S M, Kazmierkowski M P. PWM voltage and current control of four-leg VSI [C]. IEEE Symposium on Industrial Electronics, 1998: 196, 201.
- [12] 孙驰, 张国安, 魏光辉. 一种新颖的三相四桥臂逆变器电流调节方案研究[J]. 电机与控制学报, 2004, 8(2): 165-169, 182-202.
- [13] 曾江, 焦连伟, 倪以信, 等. 有源滤波器定频滞环电流控制新方法[J]. 电网技术, 2000, 24(6): 1-8.

(收稿日期: 2015-09-17) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告