



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 109768552 B

(45) 授权公告日 2022. 11. 08

(21) 申请号 201811601619.2

(22) 申请日 2018.12.26

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 109768552 A

(43) 申请公布日 2019.05.17

(73) 专利权人 安徽一天电能质量技术有限公司  
地址 230000 安徽省合肥市高新区永和路  
97-1号

(72) 发明人 张四海 李瑜 潘结兵 严良占

(74) 专利代理机构 合肥洪雷知识产权代理事务  
所(普通合伙) 34164

专利代理师 孙小华

(51) Int. Cl.

H02J 3/01 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 102510062 A, 2012.06.20

Manuel A. Perales 等. Three-Dimensional Space Vector Modulation in abc Coordinates for Four-Leg Voltage Source Converters.《IEEE POWER ELECTRONICS LETTERS》.2003,第1卷(第4期),全文.

审查员 赵芳芳

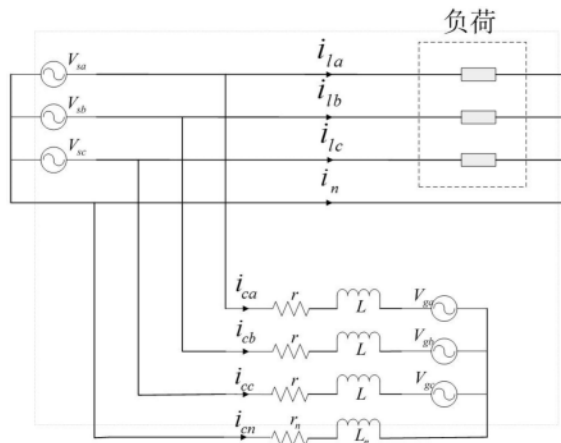
权利要求书3页 说明书7页 附图3页

(54) 发明名称

一种三相四桥臂有源电力滤波器目标电流生成调制方法

(57) 摘要

本发明公开了一种三相四桥臂有源电力滤波器目标电流生成调制方法,涉及电力系统谐波补偿及电能质量治理领域。本发明包括以下步骤:首先构建三相四桥臂有源电力滤波器APF数学模型,得到APF的桥臂目标电压;其次根据桥臂目标电压计算桥臂在开关周期T的作用时间,并将作用时间进行平移;然后在调制过程中加入零矢量,得到四桥臂最终作用时间;最后利用FPGA、CPLD进行固化,形成功能模块。本发明提供了一种简便可靠易于实现的有源电力滤波器目标电流生成调制方法,解决了三相四桥臂有源电力滤波器目标电流生成;该方法实现了一种简化三维空间矢量电压调制,并统一化实现三相全桥空间矢量的简化算法,适用范围广。



1. 一种三相四桥臂有源电力滤波器目标电流生成调制方法,其特征在于:包括三相四桥臂有源电力滤波器APF,所述三相四桥臂有源电力滤波器APF的目标电流生成调制方法包括以下步骤:

步骤S1:在 $\alpha$ - $\beta$ -0或d $q$ o坐标内构建三相四桥臂有源电力滤波器APF的数学模型,通过各谐波分析获得三相四桥臂有源电力滤波器APF补偿目标,采用PI+重复控制,直流侧电压PI控制进行双闭环控制,同时利用网侧电压进行前馈控制,根据建立的数学模型得到三相四桥臂有源电力滤波器APF在 $\alpha$ - $\beta$ -0或d $q$ o系下的桥臂目标电压;

步骤S2:将步骤S1得到的 $\alpha$ - $\beta$ -0系下的桥臂目标电压进行逆clark变换;

其中,若是d $q$ o坐标下的桥臂目标电压则还要进行逆park变换;

得到三相四桥臂有源电力滤波器APF产生目标电流在ABC坐标系下所需的桥臂目标电压 $U_{gA}$ 、 $U_{gB}$ 、 $U_{gC}$ ;

步骤S3:根据步骤S2所得的桥臂目标电压 $U_{gA}$ 、 $U_{gB}$ 、 $U_{gC}$ ,有源滤波器直流侧电压 $U_{dc}$ ,IGBT开关周期T计算ABC桥臂在开关周期T的作用时间 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ ;

步骤S4:考虑到步骤三中计算的桥臂在开关周期T中的作用时间可能为负值,将步骤S3所得的作用时间 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 进行平移,并得到变量 $t_4$ ;

步骤S5:根据步骤S4的各桥臂作用时间值,在调制过程中加入零矢量,同时最终得到四桥臂最终作用时间 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 、 $t_4$ ;其中此方法仍然适用于三相三桥臂三相全桥变流器,此时不考虑第四桥臂作用时间 $t_4$ ;

步骤S6:利用FPGA、CPLD将步骤S1至步骤S5的方法固化,实现功能模块;

其中,所述三相四桥臂有源电力滤波器APF在ABC坐标下的数学模型为:

$$\begin{cases} L \frac{di_{ca}}{dt} = V_{sa} - V_{ga} - r i_{ca} + L_n \frac{di_{cn}}{dt} + r_n i_{cn} \\ L \frac{di_{cb}}{dt} = V_{sb} - V_{gb} - r i_{cb} + L_n \frac{di_{cn}}{dt} + r_n i_{cn} \\ L \frac{di_{cc}}{dt} = V_{sc} - V_{gc} - r i_{cc} + L_n \frac{di_{cn}}{dt} + r_n i_{cn} \end{cases}$$

经过CLARK3变换可得在 $\alpha$ - $\beta$ -0坐标系中的数学模型:

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = [G_1 \ G_2 \ G_3] C_{\alpha\beta 0}^{-1} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \\ i_0 \end{bmatrix} + \sqrt{3} G_4 i_0$$

$$\begin{cases} L_0 = -L + 3L_n \\ r_0 = -r + 3r_n \\ i_0 = i_n / \sqrt{3} \end{cases}$$

其中, $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$ 、 $G_4$ 为四桥臂开关函数,上桥臂导通取值1,下桥臂导通取值0; $L_n$ , $r_n$ 为输出滤波电抗器的等效电感、电阻值; $i_{ca}$ 、 $i_{cb}$ 、 $i_{cc}$ 、 $i_{cn}$ 均为三相四桥臂有源电力滤波器APF的输出电流;

坐标变换阵定义如下:

$$\text{CLARK3变换: } C_{33} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix};$$

$$\text{CLARK3逆变换: } C_{33}^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix};$$

根据目标电流,采用PI+重复控制,直流侧电压PI控制进行双闭环控制,同时利用网侧电压进行前馈控制,得到三相四桥臂有源电力滤波器APF在alpha-beta-0或dqo系下的桥臂目标电压 $V_{ga}$ 、 $V_{gb}$ 、 $V_{gc}$ ;利用逆CLARK变换得到ABC坐标下的桥臂电压 $V_{ga}$ 、 $V_{gb}$ 、 $V_{gc}$ ;

根据ABC坐标下的目标桥臂电压 $V_{ga}$ 、 $V_{gb}$ 、 $V_{gc}$ ;采用一种快捷三维空间矢量PWM目标电压调制方法,直接求各相开关导通时间,从而得到得四桥臂的脉出输出;包括以下步骤:

SS01、假设APF直流侧电压 $V_{dc}$ 在一个周期内变化不大,则有:

$$V_g' T = \begin{bmatrix} V_{ga} \\ V_{gb} \\ V_{gc} \end{bmatrix} T = V_{dc} \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix};$$

根据上式可得:

$$\begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} = \frac{T}{V_{dc}} \begin{bmatrix} V_{ga} \\ V_{gb} \\ V_{gc} \end{bmatrix} = \frac{T}{V_{dc}} \mathbf{V}'_{ref};$$

上述算式中,T为开关周期, $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 为ABC三相作用时间,由上式得出的时间可能为负值;

SS02、将由上式得出的A、B、C三相作用的时间进行平移:

$$\text{令 } t_{\min} = \min\{t_1, t_2, t_3\};$$

$$t_4 = 0 \quad t_{\min} \geq 0$$

$$\left. \begin{aligned} t_1 &= t_1 - t_{\min} \\ t_2 &= t_2 - t_{\min} \\ t_3 &= t_3 - t_{\min} \\ t_4 &= -t_{\min} \end{aligned} \right\} t_{\min} < 0 ;$$

根据上式得出的时间,当 $t_4=0$ 时则中线桥臂上的开关在一个周期内均处于关断状态,并在其中加入零矢量:

$$\begin{aligned} t_{\max} &= \max \{t_1, t_2, t_3, t_4\} \\ t_{1111} &= t_{0000} = (T - t_{\max}) / 2 \\ t_1 &= t_1 + t_{1111} \\ t_2 &= t_2 + t_{1111} \\ t_3 &= t_3 + t_{1111} \\ t_4 &= t_4 + t_{1111}; \end{aligned}$$

至此可得到四桥臂在开关周期 $T$ 的导通时间。

## 一种三相四桥臂有源电力滤波器目标电流生成调制方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于电力系统谐波补偿及电能质量治理领域,特别是涉及一种三相四桥臂有源电力滤波器目标电流生成调制方法。

### 背景技术

[0002] 近年来,由于电力电子技术的飞速发展,各种电力电子变流装置、不平衡负荷在电力系统、工业、交通、市政民用中的应用日益广泛,给电力系统带来了大量的谐波污染及负序零序电流,同时也影响了工业企业的安全生产及生产质量。为了抑制这些非线性负荷的谐波及零负序电流,供用电系统中采取谐波治理方法进行,谐波治理方案可采用无源滤波器及有源滤波器,随着电力电子器件的发展及电力电子控制技术的发展,有源滤波器因其自身所具备的优势越来越得到大范围的应用,同时为了补偿零负序电流,采用三相四桥臂拓扑结构的有源滤波装置是一种理想的解决方案。

[0003] 在有源电力滤波器APF目标电流生成调制方法中,为了装置输出滤波器设计的简单,同时最大程度减小有源电力滤波器(APF)装置自身开关频率次谐波对系统的污染,通常采用空间矢量方法进行调制,对于三相四桥臂APF应在采用三维空间矢量控制方法进行。三相四桥臂由于4个桥臂的开关状态有16种组合,其中有2个零矢量和14个非零矢量,这些矢量将在三给空间分为24个区间。在实际应用中,三维空间矢量进调制极其复杂,增加了其实现难度。

[0004] 当前,进行APF目标电流生成调制一般采用DSP控制芯片,利用DSP的事件管理器来进行,因为三给空间矢量控制方法的计算复杂,影响了APF控制的实时性。FPGA、CPLD是近年发展起来的一种作为专用集成电路(ASIC)领域中的半定制电路而出现的,既解决了定制电路的不足,又克服了原有可编程器件门电路数有限的缺点,用户可以根据需要通过可编辑的连接把FPGA内部的逻辑块连接起来,一个出厂后的成品FPGA的逻辑块和连接可以按照设计者而改变,可以完成所需要的逻辑功能,基于FPGA、CPLD所具备的这些硬件集成并行运算的优点,在工业嵌入式控制中得到广泛的应用,可以解决DSP等控制芯片因串行运算导致实时性差的缺点。。

### 发明内容

[0005] 本发明的目的在于提供一种三相四桥臂有源电力滤波器目标电流生成调制方法,通过一种三相四桥臂有源电力滤波器目标电流生成调制方法,以解决APF实际应用中三维空间矢量进调制复杂,实现难度大的技术问题。

[0006] 为解决上述技术问题,本发明是通过以下技术方案实现的:

[0007] 本发明为一种三相四桥臂有源电力滤波器目标电流生成调制方法,包括三相四桥臂有源电力滤波器APF,使用时将三相四桥臂有源电力滤波器APF接入三相四线制配电网补偿零序、负序和谐波电流;

[0008] 所述三相四桥臂有源电力滤波器APF的目标电流生成调制方法包括以下步骤:

[0009] 步骤S1:在 $\alpha$ - $\beta$ -0或d $q$ o坐标内构建三相四桥臂有源电力滤波器APF的数学模型,通过各谐波分析获得三相四桥臂有源电力滤波器APF补偿目标,采用PI+重复控制,直流侧电压PI控制进行双闭环控制,同时利用网侧电压进行前馈控制,根据建立的数学模型得到三相四桥臂有源电力滤波器APF在 $\alpha$ - $\beta$ -0或d $q$ o系下的桥臂目标电压;

[0010] 步骤S2:将步骤S1得到的 $\alpha$ - $\beta$ -0系下的桥臂目标电压进行逆clark变换;

[0011] 其中,若是d $q$ o坐标下的桥臂目标电压则还要进行逆park变换;

[0012] 得到三相四桥臂有源电力滤波器APF产生目标电流在ABC坐标系下所需的桥臂目标电压 $U_{gA}$ 、 $U_{gB}$ 、 $U_{gC}$ ;

[0013] 步骤S3:根据步骤S2所得的桥臂目标电压 $U_{gA}$ 、 $U_{gB}$ 、 $U_{gC}$ ,有源滤波器直流侧电压 $U_{dc}$ ,IGBT开关周期 $T$ 计算ABC桥臂在开关周期 $T$ 的作用时间 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ ;

[0014] 步骤S4:考虑到步骤三中计算的桥臂在开关周期 $T$ 中的作用时间可能为负值,将步骤S3所得的作用时间 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 进行平移,并得到变量 $t_4$ 。

[0015] 步骤S5:根据步骤S4的各桥臂作用时间值,在调制过程中加入零矢量,同时最终得到四桥臂最终作用时间 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 、 $t_4$ ;其中此方法仍然适用于三相三桥臂三相全桥变流器,此时不考虑第四桥臂作用时间 $t_4$ ;

[0016] 步骤S6:利用FPGA、CPLD将步骤S1至步骤S5的方法固化,实现功能模块;

[0017] 进一步地,所述三相四桥臂有源电力滤波器APF在ABC坐标下的数学模型为:

$$[0018] \begin{cases} L \frac{di_{ca}}{dt} = V_{sa} - V_{ga} - r i_{ca} + L_n \frac{di_{cn}}{dt} + r_n i_{cn} \\ L \frac{di_{cb}}{dt} = V_{sb} - V_{gb} - r i_{cb} + L_n \frac{di_{cn}}{dt} + r_n i_{cn} \\ L \frac{di_{cc}}{dt} = V_{sc} - V_{gc} - r i_{cc} + L_n \frac{di_{cn}}{dt} + r_n i_{cn} \end{cases}$$

[0019] 经过CLARK3变换可得在 $\alpha$ - $\beta$ -0坐标系中的数学模型:

$$[0020] \quad C \frac{dV_{dc}}{dt} = [G_1 \ G_2 \ G_3] C_{\alpha\beta 0}^{-1} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \\ i_0 \end{bmatrix} + \sqrt{3} G_4 i_0$$

$$[0021] \quad \begin{cases} L_0 = -L + 3L_n \\ r_0 = -r + 3r_n \\ i_0 = i_n / \sqrt{3} \end{cases}$$

[0022] 其中, $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$ 、 $G_4$ 为四桥臂开关函数,上桥臂导通取值1,下桥臂导通取值0; $L_n$ , $r_n$ 为输出滤波电抗器的等效电感、电阻值; $i_{ca}$ 、 $i_{cb}$ 、 $i_{cc}$ 、 $i_{cn}$ 均为三相四桥臂有源电力滤波器APF的输出电流;

[0023] 根据目标电流,采用PI+重复控制,直流侧电压PI控制进行双闭环控制,同时利用网侧电压进行前馈控制,得到三相四桥臂有源电力滤波器APF在 $\alpha$ - $\beta$ -0或d $q$ o系下的桥臂目标电压 $V_{ga}$ 、 $V_{gb}$ 、 $V_{gc}$ ;利用逆CLARK变换得到ABC坐标下的桥臂电压 $V_{ga}$ 、 $V_{gb}$ 、 $V_{gc}$ ;

[0024] 根据ABC坐标下的目标桥臂电压 $V_{ga}$ 、 $V_{gb}$ 、 $V_{gc}$ ；采用一种快捷三维空间矢量PWM目标电压调制方法，直接求各相开关导通时间，从而得到四桥臂的脉出输出；包括以下步骤：

[0025] SS01、假设APF直流侧电压 $V_{dc}$ 在一个周期内变化不大，则有：

$$[0026] \quad V_g' T = \begin{bmatrix} V_{ga} \\ V_{gb} \\ V_{gc} \end{bmatrix} T = V_{dc} \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} ;$$

[0027] 根据上式可得：

$$[0028] \quad \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} = \frac{T}{V_{dc}} \begin{bmatrix} V_{ga} \\ V_{gb} \\ V_{gc} \end{bmatrix} = \frac{T}{V_{dc}} \mathbf{V}'_{ref} ;$$

[0029] 上述算式中，T为开关周期， $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 为ABC三相作用时间，由上式得出的时间可能为负值；

[0030] SS02、将由上式得出的A、B、C三相作用的时间进行平移：

[0031] 令 $t_{\min} = \min\{t_1, t_2, t_3\}$ ；

$$[0032] \quad \left. \begin{array}{l} t_4 = 0 \\ t_1 = t_1 - t_{\min} \\ t_2 = t_2 - t_{\min} \\ t_3 = t_3 - t_{\min} \\ t_4 = -t_{\min} \end{array} \right\} \begin{array}{l} t_{\min} \geq 0 \\ \\ \\ t_{\min} < 0 \end{array} ;$$

[0033] 根据上式得出的时间，当 $t_4 = 0$ 时则中线桥臂上的开关在一个周期内均处于关断状态，并在其中加入零矢量：

[0034]  $t_{\max} = \max\{t_1, t_2, t_3, t_4\}$

[0035]  $t_{1111} = t_{0000} = (T - t_{\max}) / 2$

[0036]  $t_1 = t_1 + t_{1111}$

[0037]  $t_2 = t_2 + t_{1111}$

[0038]  $t_3 = t_3 + t_{1111}$

[0039]  $t_4 = t_4 + t_{1111}$ ；

[0040] 至此可得到四桥臂在开关周期T的导通时间。

[0041] 进一步地，所述的坐标变换阵定义如下：

[0042] CLARK3变换:  $C_{33} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$  ;

[0043] CLARK3逆变换:  $C_{33}^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$  。

[0044] 本发明具有以下有益效果:

[0045] 本发明提供了一种简便可靠易于实现的有源电力滤波器目标电流生成调制方法,解决了三相四桥臂有源电力滤波器目标电流生成;该方法采用有硬件并行化运算固化的方法,并利用FPAG、CPLD,实现一种简化三维空间矢量电压调制,并统一化实现三相全桥空间矢量的简化算法,此种简化空间矢量算法适用于DSTATCOM、逆变器、PWM整流器、储能逆变器、三电平变流器等。

[0046] 当然,实施本发明的任一产品并不一定需要同时达到以上所述的所有优点。

## 附图说明

[0047] 为了更清楚地说明本发明实施例的技术方案,下面将对实施例描述所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0048] 图1是本发明中三相四桥臂拓扑结构APF及接入系统示意图;

[0049] 图2是本发明中所用三相四桥臂拓扑结构APF等效电路示意图;

[0050] 图3是本发明中三相三桥臂拓扑结构APF及接入系统示意图;

[0051] 图4是本发明中所用三相三桥臂拓扑结构APF等效电路示意图;

[0052] 图5是本发明中所应用的CLARK、PARK变换坐标轴示意图。

## 具体实施方式

[0053] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有作出创造性劳动前提下所获得的所有其它实施例,都属于本发明保护的范围。

[0054] 在本发明的描述中,需要理解的是,术语“开孔”、“上”、“下”、“厚度”、“顶”、“中”、“长度”、“内”、“四周”等指示方位或位置关系,仅是为了便于描述本发明和简化描述,而不

是指示或暗示所指的组件或元件必须具有特定的方位,以特定的方位构造和操作,因此不能理解为对本发明的限制。

[0055] 请参阅图1-5所示,本发明为一种三相四桥臂有源电力滤波器目标电流生成调制方法,包括三相四桥臂有源电力滤波器APF,使用时将三相四桥臂有源电力滤波器APF接入三相四线制配电网补偿零序、负序和谐波电流;负载电流 $i_{1a}$ 、 $i_{1b}$ 、 $i_{1c}$ 包含有功、无功、零负序和谐波电流,其中无功、零负序及谐波电流注入电网,造成电网电能损失,威胁系统稳定运行;

[0056] 所述三相四桥臂有源电力滤波器APF的目标电流生成调制方法包括以下步骤:

[0057] 步骤S1:在 $\alpha$ - $\beta$ -0或d $q$ o坐标内构建三相四桥臂有源电力滤波器APF的数学模型,通过各谐波分析获得三相四桥臂有源电力滤波器APF补偿目标,采用PI+重复控制,直流侧电压PI控制进行双闭环控制,同时利用网侧电压进行前馈控制,根据建立的数学模型得到三相四桥臂有源电力滤波器APF在 $\alpha$ - $\beta$ -0或d $q$ o系下的桥臂目标电压;

[0058] 步骤S2:将步骤S1得到的 $\alpha$ - $\beta$ -0系下的桥臂目标电压进行逆clark变换;

[0059] 其中,若是d $q$ o坐标下的桥臂目标电压则还要进行逆park变换;

[0060] 得到三相四桥臂有源电力滤波器APF产生目标电流在ABC坐标系下所需的桥臂目标电压 $U_{gA}$ 、 $U_{gB}$ 、 $U_{gC}$ ;

[0061] 步骤S3:根据步骤S2所得的桥臂目标电压 $U_{gA}$ 、 $U_{gB}$ 、 $U_{gC}$ ,有源滤波器直流侧电压 $U_{dc}$ ,IGBT开关周期T计算ABC桥臂在开关周期T的作用时间 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ ;

[0062] 步骤S4:考虑到步骤三中计算的桥臂在开关周期T中的作用时间可能为负值,将步骤S3所得的作用时间 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 进行平移,并得到变量 $t_4$ ;

[0063] 步骤S5:根据步骤S4的各桥臂作用时间值,在调制过程中加入零矢量,同时最终得到四桥臂最终作用时间 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 、 $t_4$ ;其中此方法仍然适用于三相三桥臂三相全桥变流器,此时不考虑第四桥臂作用时间 $t_4$ ;

[0064] 步骤S6:利用FPGA、CPLD将步骤S1至步骤S5的方法固化,实现功能模块。

[0065] 其中如图1-2所示,三相四桥臂有源电力滤波器APF在ABC坐标下的数学模型为:

$$[0066] \begin{cases} L \frac{di_{ca}}{dt} = V_{sa} - V_{ga} - ri_{ca} + L_n \frac{di_{cn}}{dt} + r_n i_{cn} \\ L \frac{di_{cb}}{dt} = V_{sb} - V_{gb} - ri_{cb} + L_n \frac{di_{cn}}{dt} + r_n i_{cn} \\ L \frac{di_{cc}}{dt} = V_{sc} - V_{gc} - ri_{cc} + L_n \frac{di_{cn}}{dt} + r_n i_{cn} \end{cases}$$

[0067] 经过CLARK3变换可得在 $\alpha$ - $\beta$ -0坐标系中的数学模型:

$$[0068] C \frac{dV_{dc}}{dt} = [G_1 \ G_2 \ G_3] C_{\alpha\beta 0}^{-1} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \\ i_0 \end{bmatrix} + \sqrt{3} G_4 i_0$$

$$[0069] \quad \begin{cases} L_0 = -L + 3L_n \\ r_0 = -r + 3r_n \\ i_0 = i_n / \sqrt{3} \end{cases}$$

[0070] 其中,G1、G2、G3、G4为四桥臂开关函数,上桥臂导通取值1,下桥臂导通取值0; $L_n$ , $r_n$ 为输出滤波电抗器的等效电感、电阻值; $i_{ca}$ 、 $i_{cb}$ 、 $i_{cc}$ 、 $i_{cn}$ 均为三相四桥臂有源电力滤波器APF的输出电流;三相四桥臂有源电力滤波器APF的输出电流 $i_{ca}$ 、 $i_{cb}$ 、 $i_{cc}$ 、 $i_{cn}$ 与负载电流中无功、零负序和谐波电流幅值相同、方向相反。

[0071] 根据目标电流,采用PI+重复控制,直流侧电压PI控制进行双闭环控制,同时利用网侧电压进行前馈控制,得到三相四桥臂有源电力滤波器APF在 $\alpha$ - $\beta$ -0(或 $dqo$ )系下的桥臂目标电压 $V_{ga}$ 、 $V_{gb}$ 、 $V_{gc}$ ;利用逆CLARK变换得到ABC坐标下的桥臂电压 $V_{ga}$ 、 $V_{gb}$ 、 $V_{gc}$ ;

[0072] 根据ABC坐标下的目标桥臂电压 $V_{ga}$ 、 $V_{gb}$ 、 $V_{gc}$ ;采用一种快捷三维空间矢量PWM目标电压调制方法,直接求各相开关导通时间,从而得到得四桥臂的脉出输出;包括以下步骤:

[0073] SS01、假设APF直流侧电压 $V_{dc}$ 在一个周期内变化不大,则有:

$$[0074] \quad V_g' T = \begin{bmatrix} V_{ga} \\ V_{gb} \\ V_{gc} \end{bmatrix} T = V_{dc} \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix};$$

[0075] 根据上式可得:

$$[0076] \quad \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} = \frac{T}{V_{dc}} \begin{bmatrix} V_{ga} \\ V_{gb} \\ V_{gc} \end{bmatrix} = \frac{T}{V_{dc}} \mathbf{V}'_{ref};$$

[0077] 上述算式中, $T$ 为开关周期, $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 为ABC三相作用时间,由上式得出的时间可能为负值;

[0078] SS02、将由上式得出的A、B、C三相作用的时间(也就是将空间中的三个基本矢量)进行平移:

[0079] 令 $t_{\min} = \min\{t_1, t_2, t_3\}$ ;

$$[0080] \quad \begin{cases} t_4 = 0 & t_{\min} \geq 0 \\ \left. \begin{array}{l} t_1 = t_1 - t_{\min} \\ t_2 = t_2 - t_{\min} \\ t_3 = t_3 - t_{\min} \\ t_4 = -t_{\min} \end{array} \right\} & t_{\min} < 0 \end{cases};$$

[0081] 根据上式得出的时间,当 $t_4 = 0$ 时则中线桥臂上的开关在一个周期内均处于关断

状态(也就是没有零矢量),为了改善谐波特性,在其中加入零矢量:

$$[0082] \quad t_{\max} = \max \{t_1, t_2, t_3, t_4\}$$

$$[0083] \quad t_{1111} = t_{0000} = (T - t_{\max}) / 2$$

$$[0084] \quad t_1 = t_1 + t_{1111}$$

$$[0085] \quad t_2 = t_2 + t_{1111}$$

$$[0086] \quad t_3 = t_3 + t_{1111}$$

$$[0087] \quad t_4 = t_4 + t_{1111};$$

[0088] 至此可得到四桥臂在开关周期T的导通时间,

[0089] 如图3-4所示,其中,对于三相三桥臂三相全桥变流器,此方法仍然适用,步骤与上述步骤相同,只是不考虑第四桥臂作用时间 $t_4$ 。

[0090] 其中,上述的各坐标变换阵定义如下:

$$[0091] \quad \text{CLARK3变换: } C_{33} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix};$$

$$[0092] \quad \text{CLARK3逆变换: } C_{33}^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}。$$

[0093] 在本说明书的描述中,参考术语“一个实施例”、“示例”、“具体示例”等的描述意指结合该实施例或示例描述的具体特征、结构、材料或者特点包含于本发明的至少一个实施例或示例中。在本说明书中,对上述术语的示意性表述不一定指的是相同的实施例或示例。而且,描述的具体特征、结构、材料或者特点可以在任何一个或多个实施例或示例中以合适的方式结合。

[0094] 以上公开的本发明优选实施例只是用于帮助阐述本发明。优选实施例并没有详尽叙述所有的细节,也不限制该发明仅为所述的具体实施方式。显然,根据本说明书的内容,可作很多的修改和变化。本说明书选取并具体描述这些实施例,是为了更好地解释本发明的原理和实际应用,从而使所属技术领域技术人员能很好地理解和利用本发明。本发明仅受权利要求书及其全部范围和等效物的限制。

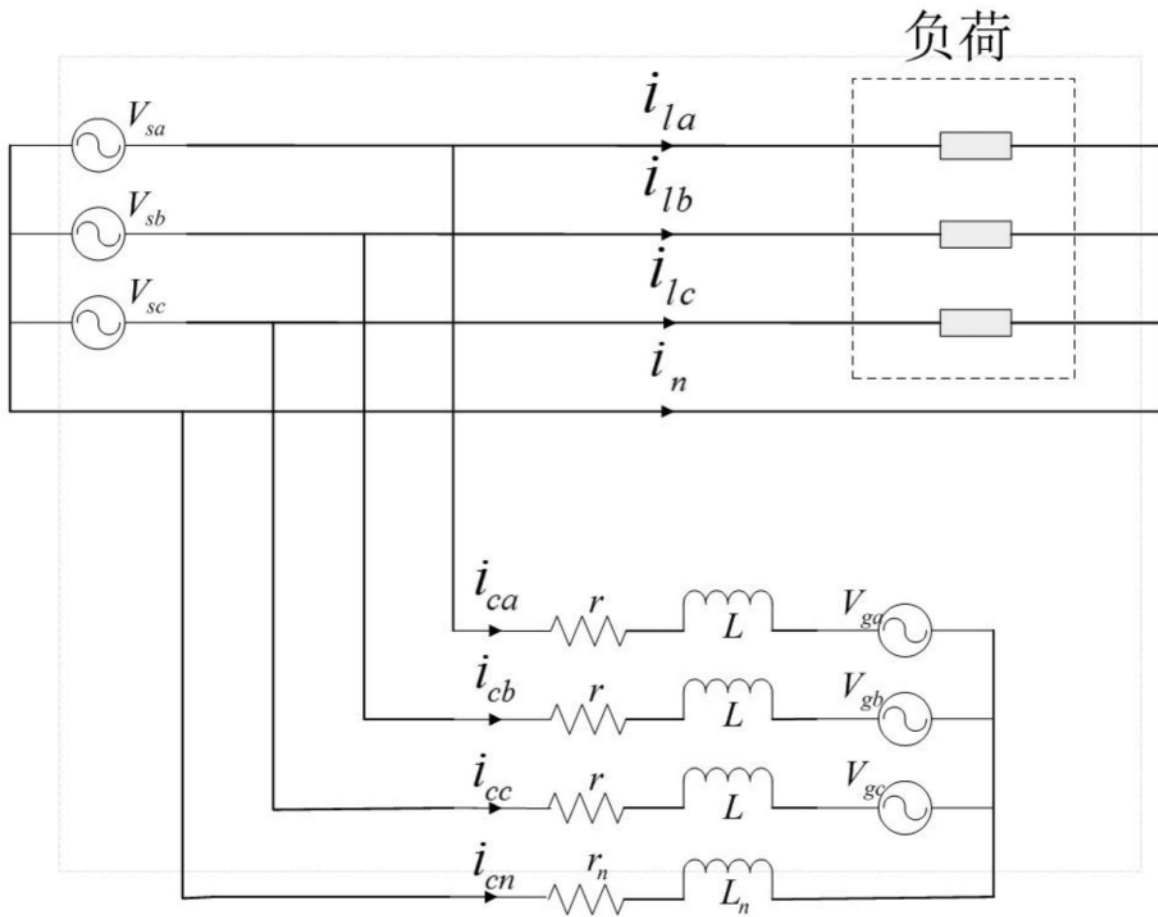


图1

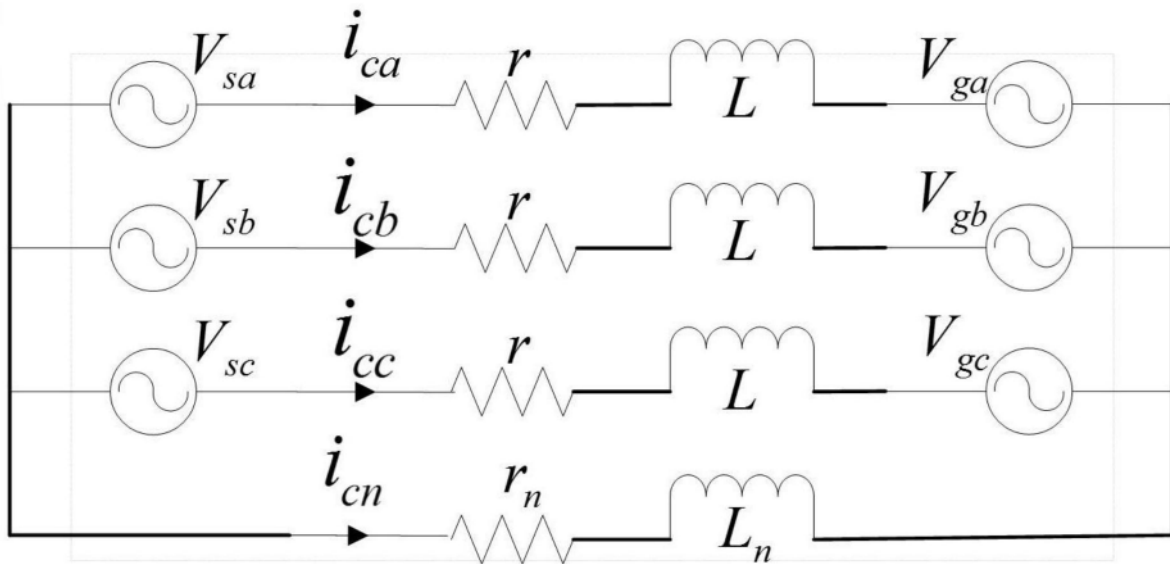


图2

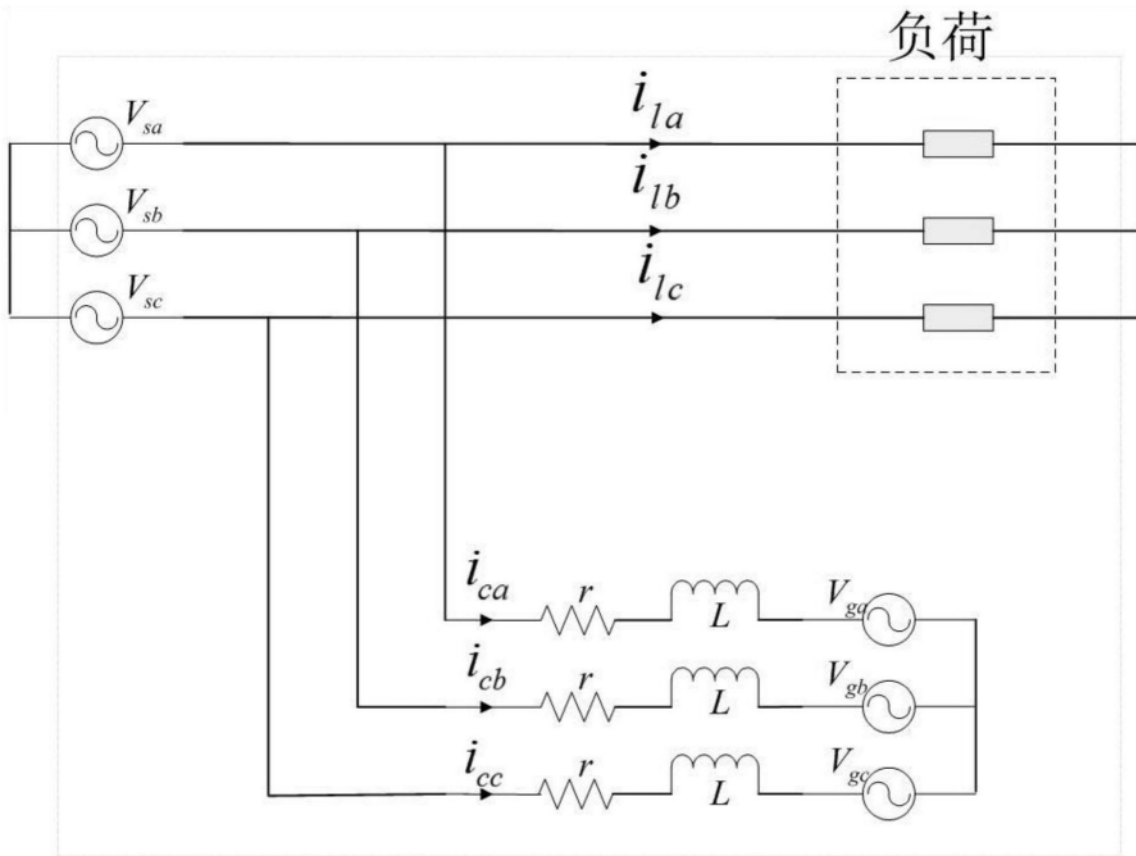


图3

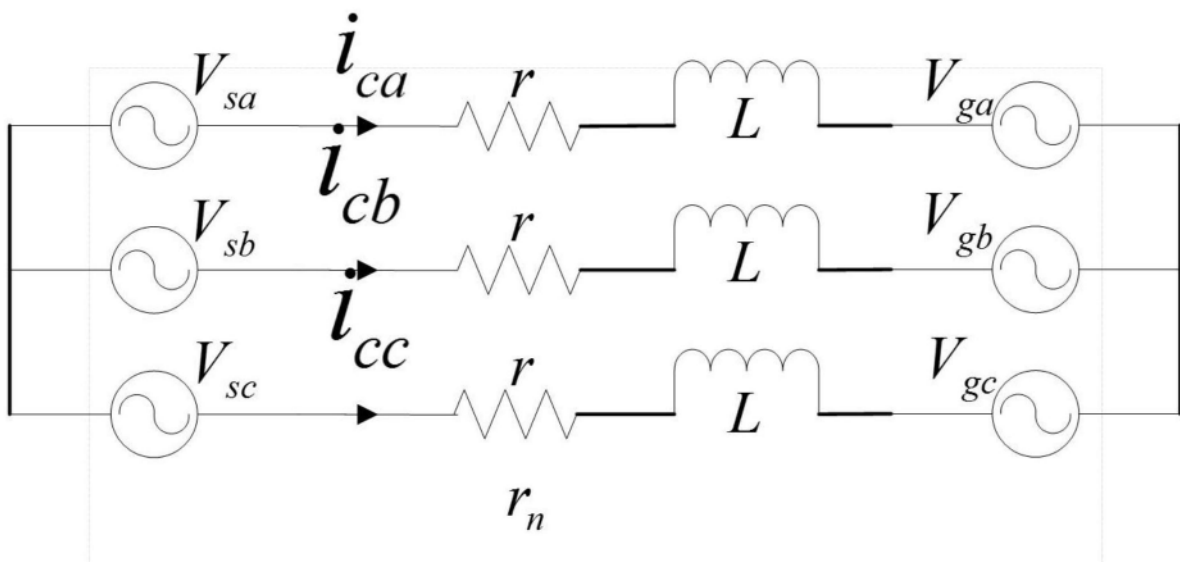


图4

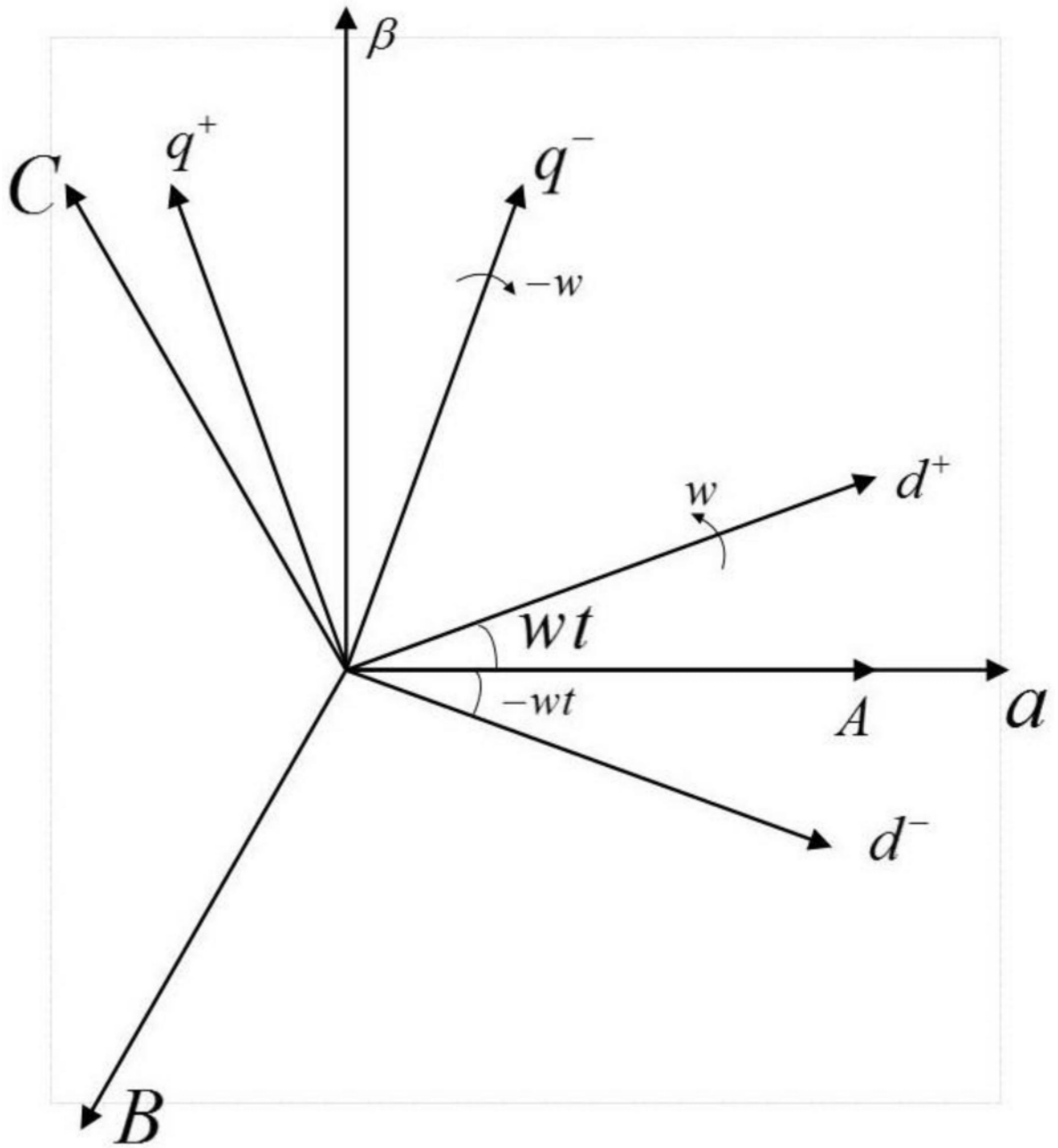


图5