



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 117650737 B

(45) 授权公告日 2024.08.13

(21) 申请号 202311614785.7

H02M 1/00 (2007.01)

(22) 申请日 2023.11.28

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 116915126 A, 2023.10.20

申请公布号 CN 117650737 A

CN 112260601 A, 2021.01.22

(43) 申请公布日 2024.03.05

审查员 白超

(73) 专利权人 江南大学

地址 214100 江苏省无锡市梁溪区通沙路  
898号南楼七层

(72) 发明人 沈艳霞 杨恒 赵芝璞

(74) 专利代理机构 无锡华源专利商标事务所

(普通合伙) 32228

专利代理师 过顾佳

(51) Int. Cl.

H02P 27/12 (2006.01)

H02P 21/22 (2016.01)

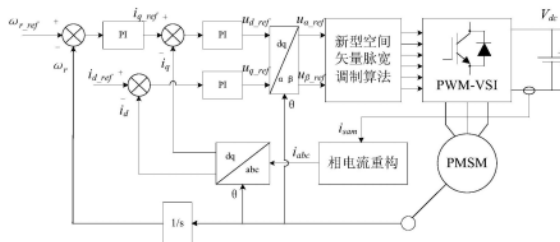
权利要求书4页 说明书7页 附图5页

(54) 发明名称

基于新型SVPWM的PMSM单电流传感器控制方法

(57) 摘要

本发明公开了基于新型SVPWM的PMSM单电流传感器控制方法,涉及电机控制技术领域,该方法包括:在直流电源的近地端安装单电流传感器,分别针对低速区和中速区设计了两种脉宽调制方式;根据不同的调制方式,在一个PWM周期内选择两个不同的时刻采样母线电流,重构三相定子电流。本发明有效消除了扇区边界区域和低调制区域的电流重构盲区,通过实时检测母线电流,实现过流保护功能,并保留了SVPWM七段式波形的对称性,减小了电流波形的畸变。另外,优化后的脉宽调制方式改变了电压矢量的作用顺序,进一步降低开关损耗。



1. 基于新型SVPWM的PMSM单电流传感器控制方法,其特征在于,所述方法包括:

在两电平三相逆变器的直流母线近地端安装一个电流传感器,用于测量直流母线电流;

获取电机转子当前所处的扇区以及扇区内一个PWM周期的两个有效电压矢量作用时长,根据所述两个有效电压矢量作用时长确定电机转子在该扇区所处区域,所述区域包括可观测区域、扇区边界区域和低调制区域;

优化电机转子在不同区域对应的SVPWM调制方式,以保留PWM波形的对称性;

根据所述电机转子在该扇区所处区域对应的SVPWM调制方式,确定传感器电流采样时刻,根据采样所得的直流母线电流进行相电流重构;

其中,所述优化电机转子在不同区域对应的SVPWM调制方式,包括:

当电机转子处于所述扇区边界区域或所述可观测区域时,采用两个大小相等、方向相反的非零电压矢量替换原SVPWM的零电压矢量,并安排两个有效电压矢量的作用顺序,使扇区衔接时仅切换其中一相的开关状态;

当电机转子处于低调制区域时,在所述扇区边界区域或所述可观测区域的调制方式基础上,在一个PWM周期的中间时刻插入作用时长大于最小采样时长的辅助电压矢量,并延长对称分布的一对第一有效电压矢量的作用时长,则两个所述非零电压矢量的作用时长减少、另一对第二有效电压矢量的作用时长不变,保持一个PWM周期内参考电压矢量作用效果不变;其中在前半个PWM周期内,第一有效电压矢量作用在前,第二有效电压矢量作用在后。

2. 根据权利要求1所述的基于新型SVPWM的PMSM单电流传感器控制方法,其特征在于,当电机转子处于低调制区域时,在保持PWM周期不变的前提下,前半个周期内电压矢量的切换时刻变化为:

$$\begin{cases} t_a = \frac{T_0}{4} - \frac{T_{mea}}{2} \\ t_b = \frac{T_0}{4} + \frac{T_2}{2} \\ t_c = \frac{T_0}{4} + \frac{T_2}{2} + \frac{T_1}{2} \\ t_d = \frac{T_{PWM}}{2} - \frac{T_{mea}}{2} \end{cases};$$

其中, $t_a$ 、 $t_b$ 、 $t_c$ 、 $t_d$ 表示前半个PWM周期内电压矢量的切换时刻, $T_0$ 表示两个所述非零电压矢量的原始作用时长, $T_1$ 表示所述第二有效电压矢量的原始作用时长, $T_2$ 表示所述第一有效电压矢量的原始作用时长, $T_{mea}$ 表示所述辅助电压矢量的作用时长, $T_{PWM}$ 表示一个PWM周期的时长。

3. 根据权利要求1所述的基于新型SVPWM的PMSM单电流传感器控制方法,其特征在于,当电机转子处于所述扇区边界区域或所述可观测区域时,不同扇区优化后的SVPWM调制方式包括:

I扇区:用 $V_3$ 替换 $V_0$ ,用 $V_6$ 替换 $V_7$ ,交换 $V_1$ 和 $V_2$ 的作用顺序,使得 $V_2$ 先作用于 $V_1$ ;

II扇区:用 $V_4$ 替换 $V_0$ ,用 $V_1$ 替换 $V_7$ , $V_3$ 和 $V_2$ 的作用顺序保持不变,仍为 $V_3$ 先作用于 $V_2$ ;

III扇区:用 $V_5$ 替换 $V_0$ ,用 $V_2$ 替换 $V_7$ ,交换 $V_3$ 和 $V_4$ 的作用顺序,使得 $V_4$ 先作用于 $V_3$ ;

IV扇区:用 $V_6$ 替换 $V_0$ ,用 $V_3$ 替换 $V_7$ , $V_5$ 和 $V_4$ 的作用顺序保持不变,仍为 $V_5$ 先作用于 $V_4$ ;

V扇区:用 $V_1$ 替换 $V_0$ ,用 $V_4$ 替换 $V_7$ ,交换 $V_5$ 和 $V_6$ 的作用顺序,使得 $V_6$ 先作用于 $V_5$ ;

VI扇区:用 $V_2$ 替换 $V_0$ ,用 $V_5$ 替换 $V_7$ , $V_1$ 和 $V_6$ 的作用顺序保持不变,仍为 $V_1$ 先作用于 $V_6$ ;

其中, $V_i$ 表示一个PWM周期的电压矢量,从 $i$ 等于0至7, $V_i$ 依次定义为:000,100,110,010,011,001,101,111,000和111为所述原SVPWM的零电压矢量。

4.根据权利要求1所述的基于新型SVPWM的PMSM单电流传感器控制方法,其特征在于,当电机转子处于低调制区域时,不同扇区优化后的SVPWM调制方式包括,在所述扇区边界区域或所述可观测区域的调制方式基础上:

I扇区:于PWM周期的中间时刻添加作用时长为 $T_{mea}$ 的辅助电压矢量 $V_5$ ,每个 $V_2$ 向距离更近的周期起始或结束位置延长作用时长, $V_3$ 和 $V_6$ 相应的缩减作用时长;

II扇区:于PWM周期的中间时刻添加作用时长为 $T_{mea}$ 的辅助电压矢量 $V_6$ ,每个 $V_3$ 向距离更近的周期起始或结束位置延长作用时长, $V_4$ 和 $V_1$ 相应的缩减作用时长;

III扇区:于PWM周期的中间时刻添加作用时长为 $T_{mea}$ 的辅助电压矢量 $V_1$ ,每个 $V_4$ 向距离更近的周期起始或结束位置延长作用时长, $V_5$ 和 $V_2$ 相应的缩减作用时长;

IV扇区:于PWM周期的中间时刻添加作用时长为 $T_{mea}$ 的辅助电压矢量 $V_2$ ,每个 $V_5$ 向距离更近的周期起始或结束位置延长作用时长, $V_6$ 和 $V_3$ 相应的缩减作用时长;

V扇区:于PWM周期的中间时刻添加作用时长为 $T_{mea}$ 的辅助电压矢量 $V_3$ ,每个 $V_6$ 向距离更近的周期起始或结束位置延长作用时长, $V_1$ 和 $V_4$ 相应的缩减作用时长;

VI扇区:于PWM周期的中间时刻添加作用时长为 $T_{mea}$ 的辅助电压矢量 $V_4$ ,每个 $V_1$ 向距离更近的周期起始或结束位置延长作用时长, $V_2$ 和 $V_5$ 相应的缩减作用时长;

其中, $V_i$ 表示一个PWM周期的电压矢量,从 $i$ 等于0至7, $V_i$ 依次定义为:000,100,110,010,011,001,101,111,000和111为所述原SVPWM的零电压矢量。

5.根据权利要求1所述的基于新型SVPWM的PMSM单电流传感器控制方法,其特征在于,根据所述电机转子在该扇区所处区域对应的SVPWM调制方式,确定传感器电流采样时刻,包括:

当电机转子处于所述扇区边界区域或所述可观测区域时,将一个PWM周期的中间时刻作为一个电流采样时刻,选择周期内两个有效电压矢量作用时长更长的有效电压矢量的中间时刻作为另一个电流采样时刻,并在前半个周期内执行电流采样;

当电机转子处于低调制区域时,在一个PWM周期的起始和中间时刻作为两个电流采样时刻执行电流采样。

6.根据权利要求5所述的基于新型SVPWM的PMSM单电流传感器控制方法,其特征在于,所述根据采样所得的直流母线电流进行相电流重构包括,当电机转子处于所述扇区边界区域或所述可观测区域时,规定电角度递增的方向为参考方向,将每个扇区依次分为A、B两部分,当第二有效电压矢量的作用时长大于第一有效电压矢量时,电机转子处于A部分,反之处于B部分,则不同扇区的电流采样策略包括:

I扇区A部分:第一电流采样时刻为 $V_1$ 作用时长的中间时刻,采样电流为 $i_a$ ;第二电流采样时刻为 $V_6$ 作用时长的中间时刻,采样电流为 $-i_b$ ;

I扇区B部分:第一电流采样时刻为 $V_2$ 作用时长的中间时刻,采样电流为 $-i_c$ ;第二电流采样时刻为 $V_6$ 作用时长的中间时刻,采样电流为 $-i_b$ ;

II扇区A部分:第一电流采样时刻为 $V_2$ 作用时长的中间时刻,采样电流为 $-i_c$ ;第二电流采样时刻为 $V_1$ 作用时长的中间时刻,采样电流为 $i_a$ ;

II扇区B部分:第一电流采样时刻为 $V_3$ 作用时长的中间时刻,采样电流为 $i_b$ ;第二电流采样时刻为 $V_1$ 作用时长的中间时刻,采样电流为 $i_a$ ;

III扇区A部分:第一电流采样时刻为 $V_3$ 作用时长的中间时刻,采样电流为 $i_b$ ;第二电流采样时刻为 $V_2$ 作用时长的中间时刻,采样电流为 $-i_c$ ;

III扇区B部分:第一电流采样时刻为 $V_4$ 作用时长的中间时刻,采样电流为 $-i_a$ ;第二电流采样时刻为 $V_2$ 作用时长的中间时刻,采样电流为 $-i_c$ ;

IV扇区A部分:第一电流采样时刻为 $V_4$ 作用时长的中间时刻,采样电流为 $-i_a$ ;第二电流采样时刻为 $V_3$ 作用时长的中间时刻,采样电流为 $i_b$ ;

IV扇区B部分:第一电流采样时刻为 $V_5$ 作用时长的中间时刻,采样电流为 $i_c$ ;第二电流采样时刻为 $V_3$ 作用时长的中间时刻,采样电流为 $i_b$ ;

V扇区A部分:第一电流采样时刻为 $V_5$ 作用时长的中间时刻,采样电流为 $i_c$ ;第二电流采样时刻为 $V_4$ 作用时长的中间时刻,采样电流为 $-i_a$ ;

V扇区B部分:第一电流采样时刻为 $V_6$ 作用时长的中间时刻,采样电流为 $-i_b$ ;第二电流采样时刻为 $V_4$ 作用时长的中间时刻,采样电流为 $-i_a$ ;

VI扇区A部分:第一电流采样时刻为 $V_6$ 作用时长的中间时刻,采样电流为 $-i_b$ ;第二电流采样时刻为 $V_5$ 作用时长的中间时刻,采样电流为 $i_c$ ;

VI扇区B部分:第一电流采样时刻为 $V_1$ 作用时长的中间时刻,采样电流为 $i_a$ ;第二电流采样时刻为 $V_5$ 作用时长的中间时刻,采样电流为 $i_c$ ;

其中, $V_i$ 表示一个PWM周期的电压矢量,从 $i$ 等于1至6, $V_i$ 依次定义为:100,110,010,011,001,101; $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ 分别表示三相定子电流;在前半个PWM周期内,第一有效电压矢量作用在前,第二有效电压矢量作用在后;

得到两个不同相的电流信息后,剩余相电流根据基尔霍夫定律得到。

7.根据权利要求5所述的基于新型SVPWM的PMSM单电流传感器控制方法,其特征在于,所述根据采样所得的直流母线电流进行相电流重构包括,当电机转子处于低调制区域时,不同扇区的电流采样策略包括:

I扇区:起始电流采样时刻为 $V_3$ 作用时长的中间时刻,采样电流为 $i_b$ ;中间电流采样时刻为 $V_5$ 作用时长的中间时刻,采样电流为 $i_c$ ;

II扇区:起始电流采样时刻为 $V_4$ 作用时长的中间时刻,采样电流为 $-i_a$ ;中间电流采样

时刻为 $V_6$ 作用时长的中间时刻,采样电流为 $-i_b$ ;

III扇区:起始电流采样时刻为 $V_5$ 作用时长的中间时刻,采样电流为 $i_c$ ;中间电流采样时刻为 $V_1$ 作用时长的中间时刻,采样电流为 $i_a$ ;

IV扇区:起始电流采样时刻为 $V_6$ 作用时长的中间时刻,采样电流为 $-i_b$ ;中间电流采样时刻为 $V_2$ 作用时长的中间时刻,采样电流为 $-i_c$ ;

V扇区:起始电流采样时刻为 $V_1$ 作用时长的中间时刻,采样电流为 $i_a$ ;中间电流采样时刻为 $V_3$ 作用时长的中间时刻,采样电流为 $i_b$ ;

VI扇区:起始电流采样时刻为 $V_2$ 作用时长的中间时刻,采样电流为 $-i_c$ ;中间电流采样时刻为 $V_4$ 作用时长的中间时刻,采样电流为 $-i_a$ ;

其中, $V_i$ 表示一个PWM周期的电压矢量,从i等于1至6, $V_i$ 依次定义为:100,110,010,011,001,101; $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ 分别表示三相定子电流;

得到两个不同相的电流信息后,剩余相电流根据基尔霍夫定律得到。

8.根据权利要求1所述的基于新型SVPWM的PMSM单电流传感器控制方法,其特征在于,根据所述两个有效电压矢量作用时长确定电机转子在该扇区所处区域,包括:

将两个有效电压矢量作用时长代入如下的判别函数中,定位电机转子运行时所处的区域;所述判别函数的表达式为:

$$flag = \begin{cases} 1, T_1/2 > T_{\min} \ \&\& \ T_2/2 > T_{\min} \\ 2, (T_1/2 \leq T_{\min} \ \&\& \ T_2/2 > T_{\min}) \ \parallel \ (T_1/2 > T_{\min} \ \&\& \ T_2/2 \leq T_{\min}); \\ 3, T_1/2 \leq T_{\min} \ \&\& \ T_2/2 \leq T_{\min} \end{cases}$$

其中, $T_1$ 、 $T_2$ 表示一个PWM周期内两个有效电压矢量的作用时长; $T_{\min}$ 表示控制系统需要的电流最小采样时长; $flag$ 值指明了电机转子运行时所处的区域, $flag$ 置1代表电机转子运行在可观测区域, $flag$ 置2代表电机转子运行在扇区边界区域, $flag$ 置3代表电机转子运行在低调制区域。

## 基于新型SVPWM的PMSM单电流传感器控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及电机控制技术领域,尤其是基于新型SVPWM的PMSM单电流传感器控制方法。

### 背景技术

[0002] 永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor,PMSM)相比于传统电机,具有高效率、高控制精度、高功率密度、高稳定性、低噪音等特点,在家电、新能源汽车、风力发电等领域应用广泛。在电机的闭环控制中,相电流是一组极其重要的反馈量。通常情况下,需要安装至少两个电流传感器获取相电流。为进一步降低成本,减小系统的体积和重量,提出了单电流传感器控制技术。

[0003] 单电流传感器控制技术,即利用一个电流传感器重构三相定子电流,实现矢量控制。但是,由于最小采样时间的限制,该技术不可避免地存在电流重构盲区。目前,研究学者提出了逆变器支路采样法,脉冲移位法等等。虽然减小了电流重构盲区,但是逆变器支路采样法存在附加引线过长,过流保护实现困难的问题,脉冲移位法破坏了传统空间矢量脉宽调制(Space Vector Pulse Width Modulation,SVPWM)七段式波形的对称性,容易引起电流畸变。因此,研究一种新型的PMSM单电流传感器控制技术,摒弃上述方法的缺点,对于降低系统成本,提高控制性能具有重要意义。

### 发明内容

[0004] 本发明人针对上述问题及技术需求,提出了基于新型SVPWM的PMSM单电流传感器控制方法,减小电流传感器数量,降低系统成本,并根据电机运行时所处电流重构盲区的差异,设计不同的SVPWM方式实现矢量控制。本发明的技术方案如下:

[0005] 新型SVPWM的PMSM单电流传感器控制方法,包括如下步骤:

[0006] 在两电平三相逆变器的直流母线近地端安装一个电流传感器,用于测量直流母线电流;

[0007] 获取电机转子当前所处的扇区以及扇区内一个PWM周期的两个有效电压矢量作用时长,根据两个有效电压矢量作用时长确定电机转子在该扇区所处区域,区域包括可观测区域、扇区边界区域和低调制区域;

[0008] 优化电机转子在不同区域对应的SVPWM调制方式,以保留PWM波形的对称性;

[0009] 根据电机转子在该扇区所处区域对应的SVPWM调制方式,确定传感器电流采样时刻,根据采样所得的直流母线电流进行相电流重构。

[0010] 本发明的有益技术效果是:

[0011] 本方法于直流侧近地端安装单电流传感器,分别针对低调制区域和扇区边界区域这两类电流重构盲区设计了两种脉宽调制方式。根据不同的调制方式,在一个PWM周期内选择两个不同的时刻采样母线电流,重构三相定子电流。相比于传统直流母线采样法,本方法有效消除了低调制区域和扇区边界区域的电流重构盲区,与逆变器支路采样法相比,通过

实时检测母线电流,实现过流保护功能,且相对于采样两条支路电流之和的方法,无需附加额外引线,降低了信号的干扰;本方法保留了SVPWM七段式波形的对称性,减小了电流波形的畸变。另外,修改后的脉宽调制方式改变了电压矢量的作用顺序,进一步降低开关损耗。

### 附图说明

[0012] 图1是本申请提供的新型SVPWM的PMSM电路拓扑和单电流传感器的安装位置示意图。

[0013] 图2是传统直流母线采样法下存在的电流重构盲区示意图。

[0014] 图3是本申请提供的新型SVPWM的PMSM单电流传感器控制系统框图。

[0015] 图4是电机运行于扇区边界区域时,本申请提出的脉宽调制技术在六个扇区内的PWM调制策略波形图。

[0016] 图5是电机运行于低调制区域时,本申请提出的脉宽调制技术在第I扇区的PWM调制策略波形图。

[0017] 图6是电机运行于扇区边界区域时,本申请提出的脉宽调制技术在第I扇区的电流采样时刻示意图。

[0018] 图7是电机运行于可观测区域以及扇区边界区域时,采用本方法进行三相电流的重构结果。

[0019] 图8是A相实际电流波形、重构电流波形和两者的误差。

[0020] 图9是电机运行于低调制区域时,采用本方法进行三相电流的重构结果。

### 具体实施方式

[0021] 下面结合附图对本发明的具体实施方式做进一步说明。

[0022] 请参考图1所示,单电流传感器1安装在两电平三相逆变器的直流母线的近地端,用于测量直流母线电流。 $T1\sim T6$ 是两电平三相逆变器中的六个开关管;PMSM是绕组以星型方式联接的表贴式永磁同步电机。由于电流最小采样时长的限制,当有效电压矢量的持续时间过短不满足式(1)时,控制系统无法准确采集到相电流信息,无法避免地在某些区域产生了电流重构盲区。如图2所示,电流重构盲区包括低调制区域(黑色填充部分)和扇区边界区域(阴影填充部分),图中六边形内的其余区域为满足式(1)的可观测区域。

$$[0023] \quad \frac{T_x}{2} \leq T_{\min} = T_{set} + T_{ad} + T_{delay} + T_{dead} \quad (1)$$

[0024] 其中, $T_{\min}$ 表示最小采样时长, $T_x$ 表示一个PWM周期内某一有效电压矢量的作用时长; $T_{set}$ 表示电流跟随电压的稳定时长, $T_{ad}$ 表示A/D转换器采样、保持、转换需要的时长; $T_{delay}$ 表示开关即将导通时的延时时长; $T_{dead}$ 表示防止逆变器桥臂短路的死区时长。

[0025] 基于本申请提供的新型SVPWM的PMSM单电流传感器控制方法的系统框图如图3所示,整体采取速度-电流双闭环控制。三相定子电流通过单电流传感器重构电流得到,经坐标变换得到 $dq$ 轴下的 $i_d$ 、 $i_q$ ,利用编码器获取电机转子的实时位置和转速。系统采用 $i_{d\_ref} = 0$ 的控制策略, $q$ 轴给定输入由速度环的PI调节器的输出获取,两个电流环调节器

的输出  $u_{d\_ref}$ 、 $u_{q\_ref}$  经反 *Park* 变换得到  $\alpha\beta$  坐标系下的定子参考电压  $u_{\alpha\_ref}$ 、 $u_{\beta\_ref}$ ，作为新型SVPWM技术的输入。其中，新型SVPWM技术和基于单电流传感器的相电流重构技术为本申请所公开的技术，该方法包括以下步骤：

[0026] 步骤1：获取电机转子当前所处的扇区以及扇区内一个PWM周期的两个有效电压矢量作用时长，根据两个有效电压矢量作用时长确定电机转子在该扇区所处区域。

[0027] 具体的，在得到  $\alpha\beta$  坐标系下的定子参考电压  $u_{\alpha\_ref}$ 、 $u_{\beta\_ref}$  后，基于现有技术手段可以确定电机转子当前所处的扇区号，以及扇区内一个PWM周期的两个有效电压矢量作用时长。然后将两个有效电压矢量作用时长代入如下的判别函数中，定位电机转子运行时所处的区域；判别函数的表达式为：

$$[0028] \quad flag = \begin{cases} 1, T_1/2 > T_{min} \ \&\& \ T_2/2 > T_{min} \\ 2, (T_1/2 \leq T_{min} \ \&\& \ T_2/2 > T_{min}) \ \parallel \ (T_1/2 > T_{min} \ \&\& \ T_2/2 \leq T_{min}) \\ 3, T_1/2 \leq T_{min} \ \&\& \ T_2/2 \leq T_{min} \end{cases} \quad (2)$$

[0029] 其中， $T_1$ 、 $T_2$  表示一个PWM周期内两个有效电压矢量的作用时长； $T_{min}$  表示控制系统需要的电流最小采样时长，当  $T_j$  ( $j=1, 2$ )  $< T_{min}$  时，表明在该电压矢量作用下采样电流无法满足要求；*flag* 值指明了电机转子运行时所处的区域，*flag* 置1代表电机转子运行在可观测区域，*flag* 置2代表电机转子运行在扇区边界区域（中速区），*flag* 置3代表电机转子运行在低调制区域（低速区）。

[0030] 步骤2：优化电机转子在不同区域对应的SVPWM调制方式，以保留PWM波形的对称性。

[0031] (1) 当电机转子处于扇区边界区域或可观测区域时，基于传统的SVPWM算法，在一个PWM周期内采用两个大小相等、方向相反的非零电压矢量替换原SVPWM的零电压矢量，并合理安排两个有效电压矢量的作用顺序，使扇区衔接时仅切换其中一相的开关状态。如图4所示，不同扇区优化后的SVPWM调制方式如下：

[0032] I扇区：用  $V_3$  (010) 替换  $V_0$  (000)，用  $V_6$  (101) 替换  $V_7$  (111)，交换  $V_1$  (100) 和  $V_2$  (110) 的作用顺序，使得  $V_2$  (110) 先作用于  $V_1$  (100)。

[0033] II扇区：用  $V_4$  (011) 替换  $V_0$  (000)，用  $V_1$  (100) 替换  $V_7$  (111)， $V_3$  (010) 和  $V_2$  (110) 的作用顺序保持不变，仍为  $V_3$  (010) 先作用于  $V_2$  (110)。

[0034] III扇区：用  $V_5$  (001) 替换  $V_0$  (000)，用  $V_2$  (110) 替换  $V_7$  (111)，交换  $V_3$  (010) 和  $V_4$  (011) 的作用顺序，使得  $V_4$  (011) 先作用于  $V_3$  (010)。

[0035] IV扇区：用  $V_6$  (101) 替换  $V_0$  (000)，用  $V_3$  (010) 替换  $V_7$  (111)， $V_5$  (001) 和  $V_4$  (011) 的作用顺序保持不变，仍为  $V_5$  (001) 先作用于  $V_4$  (011)。

[0036] V扇区：用  $V_1$  (100) 替换  $V_0$  (000)，用  $V_4$  (011) 替换  $V_7$  (111)，交换  $V_5$  (001) 和  $V_6$  (101) 的作用顺序，使得  $V_6$  (101) 先作用于  $V_5$  (001)。

[0037] VI扇区：用  $V_2$  (110) 替换  $V_0$  (000)，用  $V_5$  (001) 替换  $V_7$  (111)， $V_1$  (100) 和  $V_6$  (101) 的作用顺序保持不变，仍为  $V_1$  (100) 先作用于  $V_6$  (101)。

[0038] 其中， $V_i$  表示一个PWM周期的电压矢量， $V_0$  (000) 和  $V_7$  (111) 为原SVPWM的零电压矢

量。

[0039] 传统的SVPWM算法在每个开关周期内为尽可能地降低开关损耗,最大限度地减小开关次数,每次切换电压矢量时,仅改变其中某相的开关状态。另外,为削弱PWM波中包含的谐波分量,保持PWM波的对称性,平均分配零电压矢量的作用时长。由图4可知,所提出的新型SVPWM技术保留了PWM波的对称性,且在一个开关周期内切换电压矢量时同样只改变其中一相的开关状态。另外,在扇区交汇处,开关状态的切换也得到了良好的衔接。例如,扇区I向扇区II过渡时,电压矢量从 $V_3(010)$ 切换到 $V_4(011)$ ,仅改变了其中一相的开关状态,降低了开关损耗。

[0040] (2) 当电机转子处于低调制区域时,在上述扇区边界区域或可观测区域的调制方式基础上,在一个PWM周期的中间时刻插入作用时长大于最小采样时长的辅助电压矢量,并延长对称分布的一对第一有效电压矢量的作用时长,则两个非零电压矢量的作用时长减少、另一对第二有效电压矢量的作用时长不变,解决电流重构盲区的同时保持一个PWM周期内参考电压矢量作用效果不变;其中在前半个PWM周期内,第一有效电压矢量作用在前,第二有效电压矢量作用在后。则不同扇区优化后的SVPWM调制方式如下:

[0041] I扇区:于PWM周期的中间时刻添加作用时长为 $T_{mea}$ 的辅助电压矢量 $V_5(001)$ ,每个 $V_2(110)$ 向距离更近的周期起始或结束位置延长作用时长, $V_3(010)$ 和 $V_6(101)$ 相应的缩减作用时长。

[0042] II扇区:于PWM周期的中间时刻添加作用时长为 $T_{mea}$ 的辅助电压矢量 $V_6(101)$ ,每个 $V_3(010)$ 向距离更近的周期起始或结束位置延长作用时长, $V_4(011)$ 和 $V_1(100)$ 相应的缩减作用时长。

[0043] III扇区:于PWM周期的中间时刻添加作用时长为 $T_{mea}$ 的辅助电压矢量 $V_1(100)$ ,每个 $V_4(011)$ 向距离更近的周期起始或结束位置延长作用时长, $V_5(001)$ 和 $V_2(110)$ 相应的缩减作用时长。

[0044] IV扇区:于PWM周期的中间时刻添加作用时长为 $T_{mea}$ 的辅助电压矢量 $V_2(110)$ ,每个 $V_5(001)$ 向距离更近的周期起始或结束位置延长作用时长, $V_6(101)$ 和 $V_3(010)$ 相应的缩减作用时长。

[0045] V扇区:于PWM周期的中间时刻添加作用时长为 $T_{mea}$ 的辅助电压矢量 $V_3(010)$ ,每个 $V_6(101)$ 向距离更近的周期起始或结束位置延长作用时长, $V_1(100)$ 和 $V_4(011)$ 相应的缩减作用时长。

[0046] VI扇区:于PWM周期的中间时刻添加作用时长为 $T_{mea}$ 的辅助电压矢量 $V_4(011)$ ,每个 $V_1(100)$ 向距离更近的周期起始或结束位置延长作用时长, $V_2(110)$ 和 $V_5(001)$ 相应的缩减作用时长。

[0047] 以第I扇区为例做出说明,如图5所示,在一个PWM周期的中间时刻增加作用时长为 $T_{mea}$ 的辅助电压矢量 $V_5(001)$ ,并延长有效电压矢量 $V_2(110)$ 作用时长以此进行补偿,延长方式为分别将对称分布的 $V_2(110)$ 向PWM周期的起始和结束位置延伸。在保持PWM周期不变的前提下,前半个周期内电压矢量的切换时刻变化为:

$$[0048] \quad \begin{cases} t_a = \frac{T_0}{4} - \frac{T_{mea}}{2} \\ t_b = \frac{T_0}{4} + \frac{T_2}{2} \\ t_c = \frac{T_0}{4} + \frac{T_2}{2} + \frac{T_1}{2} \\ t_d = \frac{T_{PWM}}{2} - \frac{T_{mea}}{2} \end{cases} \quad (3)$$

[0049] 其中,  $t_a$ 、 $t_b$ 、 $t_c$ 、 $t_d$ 表示前半PWM周期内电压矢量的切换时刻,  $T_0$ 表示两个非零电压矢量 $V_3$ (010)和 $V_6$ (101)的原始作用时长,  $T_1$ 表示第二有效电压矢量 $V_1$ (100)的原始作用时长,  $T_2$ 表示第一有效电压矢量 $V_2$ (110)的原始作用时长,  $T_{mea}$ 表示辅助电压矢量 $V_5$ (001)的原始作用时长,  $T_{PWM}$ 表示一个PWM周期的时长。根据式(3)可知在插入辅助电压矢量 $V_5$ (001)后,  $V_3$ (010)和 $V_6$ (101)的作用时长各减少为 $T_0/2 - T_{mea}$ ,  $V_2$ (110)的作用时长增加为 $T_1 + T_{mea}$ ,  $V_1$ (100)的作用时长保持不变。其余扇区前半周期内电压矢量的切换时刻变化同理,在此不再赘述。

[0050] 步骤3:根据电机转子在该扇区所处区域对应的SVPWM调制方式,确定传感器电流采样时刻,根据采样所得的直流母线电流进行相电流重构。

[0051] 在传统直流母线采样法中,控制系统分别在有效电压矢量作用下进行采样,而本申请所提出的方法改变了电流采样时刻,具体如下所示:

[0052] (1)当电机转子处于扇区边界区域或可观测区域时,将一个PWM周期的中间时刻作为一个电流采样时刻;根据一个载波周期内两个有效电压矢量作用时间的长短,选择作用时长更长的有效电压矢量的中间时刻作为另一个电流采样时刻。考虑到一个PWM周期电压矢量分布的对称性,在前半个周期内执行电流采样。

[0053] 规定电角度递增的方向为参考方向,将每个扇区依次分为A、B两部分,当第二有效电压矢量的作用时长大于第一有效电压矢量时,电机转子处于A部分,反之处于B部分,则不同扇区的电流采样策略包括:

[0054] I扇区A部分:第一电流采样时刻为 $V_1$ (100)作用时长的中间时刻,采样电流 $I_{sam1}$ 为 $i_a$ ;第二电流采样时刻为 $V_6$ (101)作用时长的中间时刻,采样电流 $I_{sam2}$ 为 $-i_b$ ,如图6所示。

[0055] I扇区B部分(B):第一电流采样时刻为 $V_2$ (110)作用时长的中间时刻,采样电流为 $-i_c$ ;第二电流采样时刻为 $V_6$ (101)作用时长的中间时刻,采样电流为 $-i_b$ 。

[0056] II扇区A部分(A):第一电流采样时刻为 $V_2$ (110)作用时长的中间时刻,采样电流为 $-i_c$ ;第二电流采样时刻为 $V_1$ (100)作用时长的中间时刻,采样电流为 $i_a$ 。

[0057] II扇区B部分(B):第一电流采样时刻为 $V_3$ (010)作用时长的中间时刻,采样电流为 $i_b$ ;第二电流采样时刻为 $V_1$ (100)作用时长的中间时刻,采样电流为 $i_a$ 。

[0058] III扇区A部分(A):第一电流采样时刻为 $V_3$ (010)作用时长的中间时刻,采样电流为

$i_b$  ;第二电流采样时刻为  $V_2(110)$  作用时长的中间时刻,采样电流为  $-i_c$ 。

[0059] III扇区B部分(B):第一电流采样时刻为  $V_4(011)$  作用时长的中间时刻,采样电流为  $-i_a$  ;第二电流采样时刻为  $V_2(110)$  作用时长的中间时刻,采样电流为  $-i_c$ 。

[0060] IV扇区A部分(A):第一电流采样时刻为  $V_4(011)$  作用时长的中间时刻,采样电流为  $-i_a$  ;第二电流采样时刻为  $V_3(010)$  作用时长的中间时刻,采样电流为  $i_b$ 。

[0061] IV扇区B部分(B):第一电流采样时刻为  $V_5(001)$  作用时长的中间时刻,采样电流为  $i_c$  ;第二电流采样时刻为  $V_3(010)$  作用时长的中间时刻,采样电流为  $i_b$ 。

[0062] V扇区A部分(A):第一电流采样时刻为  $V_5(001)$  作用时长的中间时刻,采样电流为  $i_c$  ;第二电流采样时刻为  $V_4(011)$  作用时长的中间时刻,采样电流为  $-i_a$ 。

[0063] V扇区B部分(B):第一电流采样时刻为  $V_6(101)$  作用时长的中间时刻,采样电流为  $-i_b$  ;第二电流采样时刻为  $V_4(011)$  作用时长的中间时刻,采样电流为  $-i_a$ 。

[0064] VI扇区A部分(A):第一电流采样时刻为  $V_6(101)$  作用时长的中间时刻,采样电流为  $-i_b$  ;第二电流采样时刻为  $V_5(001)$  作用时长的中间时刻,采样电流为  $i_c$ 。

[0065] VI扇区B部分(B):第一电流采样时刻为  $V_1(100)$  作用时长的中间时刻,采样电流为  $i_a$  ;第二电流采样时刻为  $V_5(001)$  作用时长的中间时刻,采样电流为  $i_c$ 。

[0066] 其中,  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  分别表示三相定子电流。

[0067] 得到两个不同相的电流信息后,剩余相电流根据基尔霍夫定律得到。

[0068] (2) 当电机转子处于低调制区域时,在一个PWM周期的起始和中间时刻作为两个电流采样时刻执行电流采样。则不同扇区的电流采样策略包括:

[0069] I扇区:起始电流采样时刻为  $V_3(010)$  作用时长的中间时刻,采样电流为  $i_b$  ;中间电流采样时刻为  $V_5(001)$  作用时长的中间时刻,采样电流为  $i_c$ 。

[0070] II扇区:起始电流采样时刻为  $V_4(011)$  作用时长的中间时刻,采样电流为  $-i_a$  ;中间电流采样时刻为  $V_6(101)$  作用时长的中间时刻,采样电流为  $-i_b$ 。

[0071] III扇区:起始电流采样时刻为  $V_5(001)$  作用时长的中间时刻,采样电流为  $i_c$  ;中间电流采样时刻为  $V_1(100)$  作用时长的中间时刻,采样电流为  $i_a$ 。

[0072] IV扇区:起始电流采样时刻为  $V_6(101)$  作用时长的中间时刻,采样电流为  $-i_b$  ;中间电流采样时刻为  $V_2(110)$  作用时长的中间时刻,采样电流为  $-i_c$ 。

[0073] V扇区:起始电流采样时刻为  $V_1(100)$  作用时长的中间时刻,采样电流为  $i_a$  ;中间电

流采样时刻为 $V_3(010)$ 作用时长的中间时刻,采样电流为 $i_b$ 。

[0074] VI扇区:起始电流采样时刻为 $V_2(110)$ 作用时长的中间时刻,采样电流为 $-i_c$ ;中间电流采样时刻为 $V_4(011)$ 作用时长的中间时刻,采样电流为 $-i_a$ 。

[0075] 同样的,得到两个不同相的电流信息后,剩余相电流根据基尔霍夫定律得到。

[0076] 为了验证所提出算法的有效性,搭建仿真模型进行测试。图7显示了电机运行于可观测区域以及扇区边界区域的三相电流重构波形。其中,A相实际电流波形、重构电流波形以及两者的误差如图8所示,两个近乎重叠的正弦波代表A相实际电流和A相重构电流,标号81代表两者的差值。可以看出实际电流及重构电流波形均具有良好的正弦性,吻合程度高,误差始终在 $\pm 0.5A$ 的范围内浮动,对整个系统的控制性能几乎没有影响。

[0077] 电机在低调制区域运行时,图9显示了重构的三相电流波形。0.5s时负载转矩发生突变,从 $0.2N \cdot m$ 突增至 $0.3N \cdot m$ ,给定转速保持 $1000r/min$ 不变。电流在负载变化前后正弦性良好,未发生明显畸变,且过渡过程持续时间短,电流变换平稳。

[0078] 以上所述的仅是本申请的优选实施方式,本发明不限于以上实施例。可以理解,本领域技术人员在不脱离本发明的精神和构思的前提下直接导出或联想到的其他改进和变化,均应认为包含在本发明的保护范围之内。

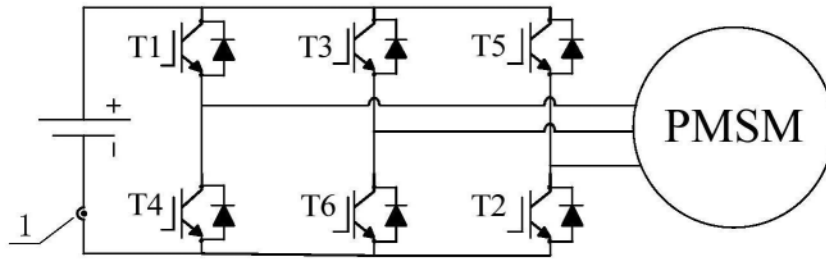


图1

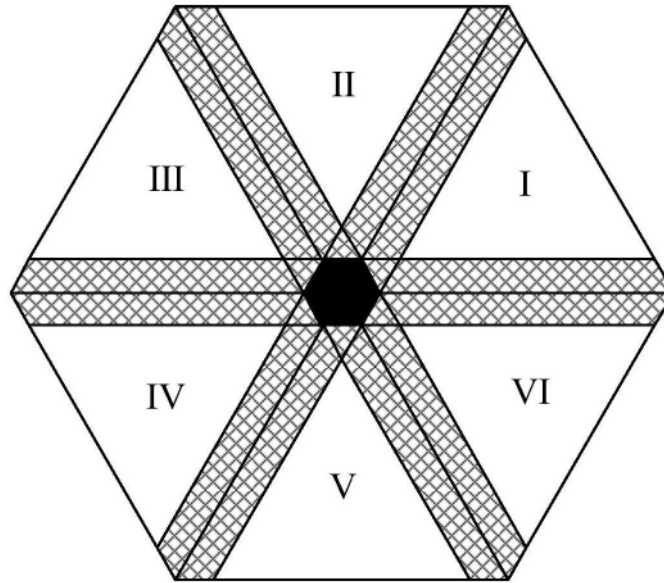


图2

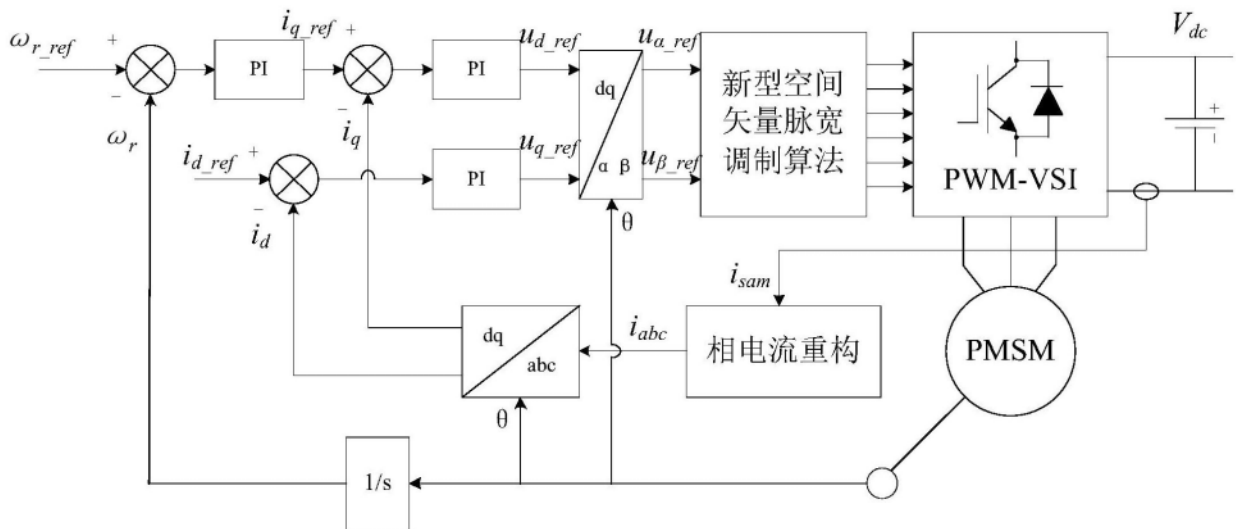


图3

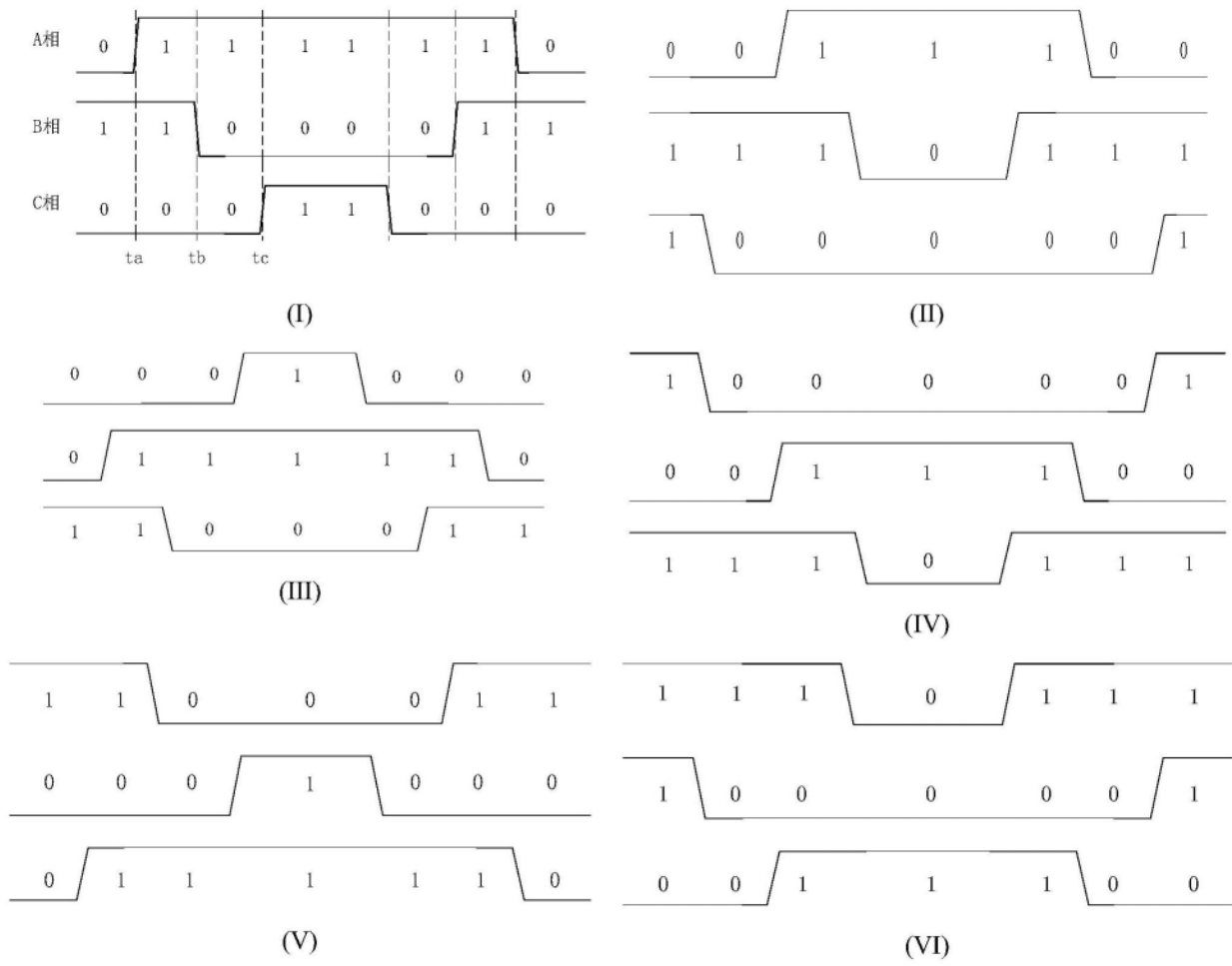


图4

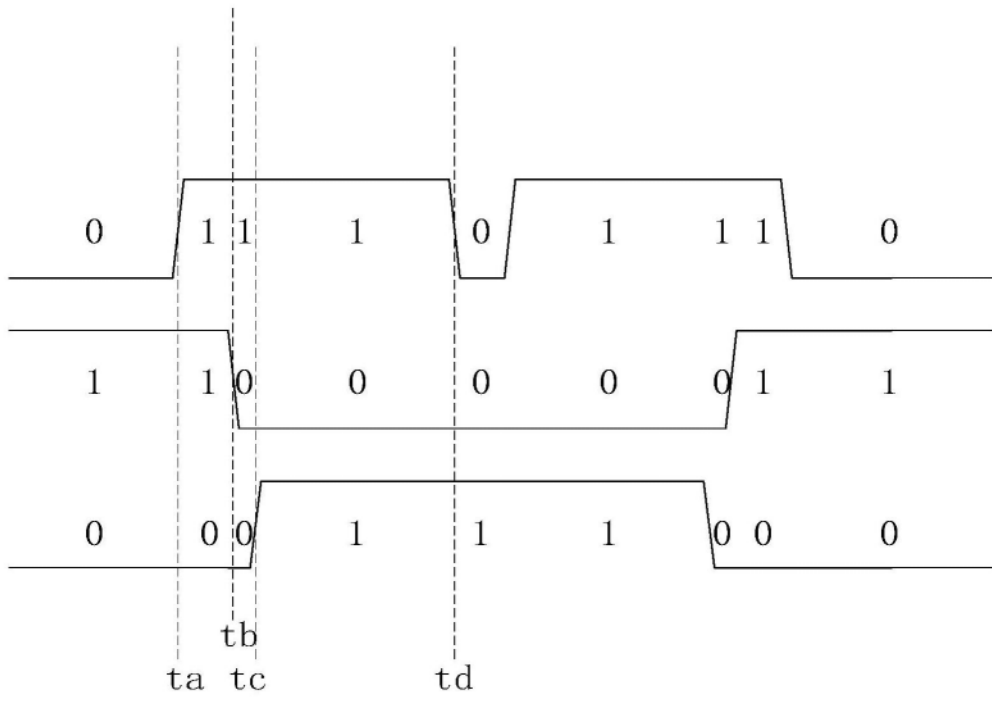


图5

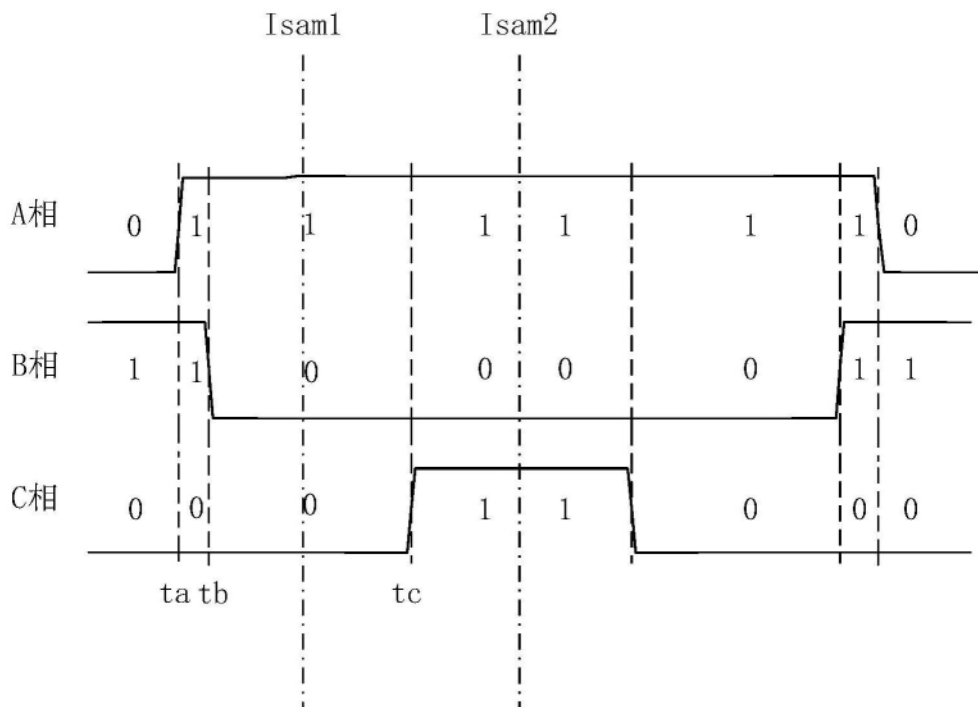


图6

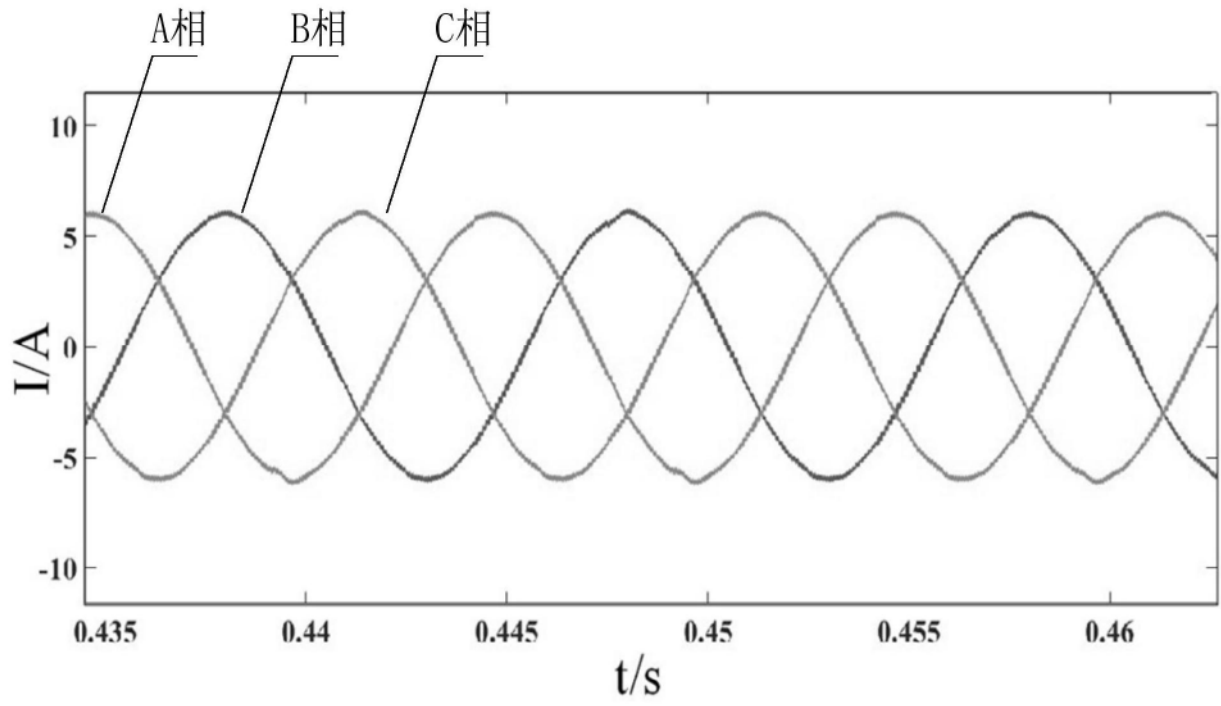


图7

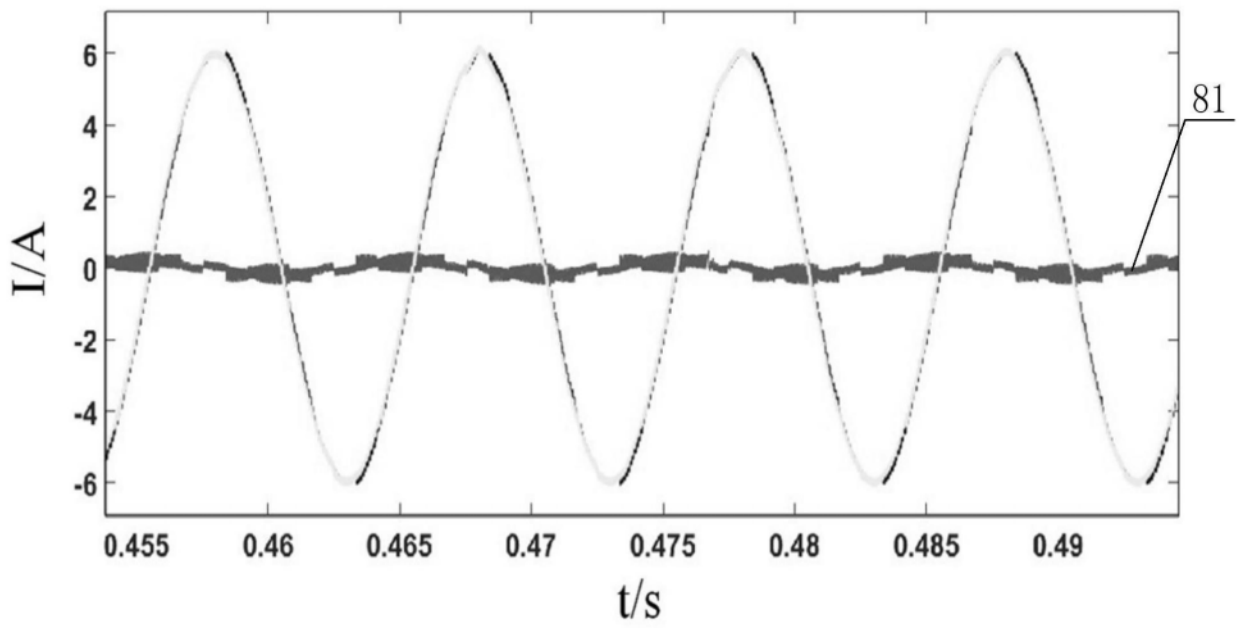


图8

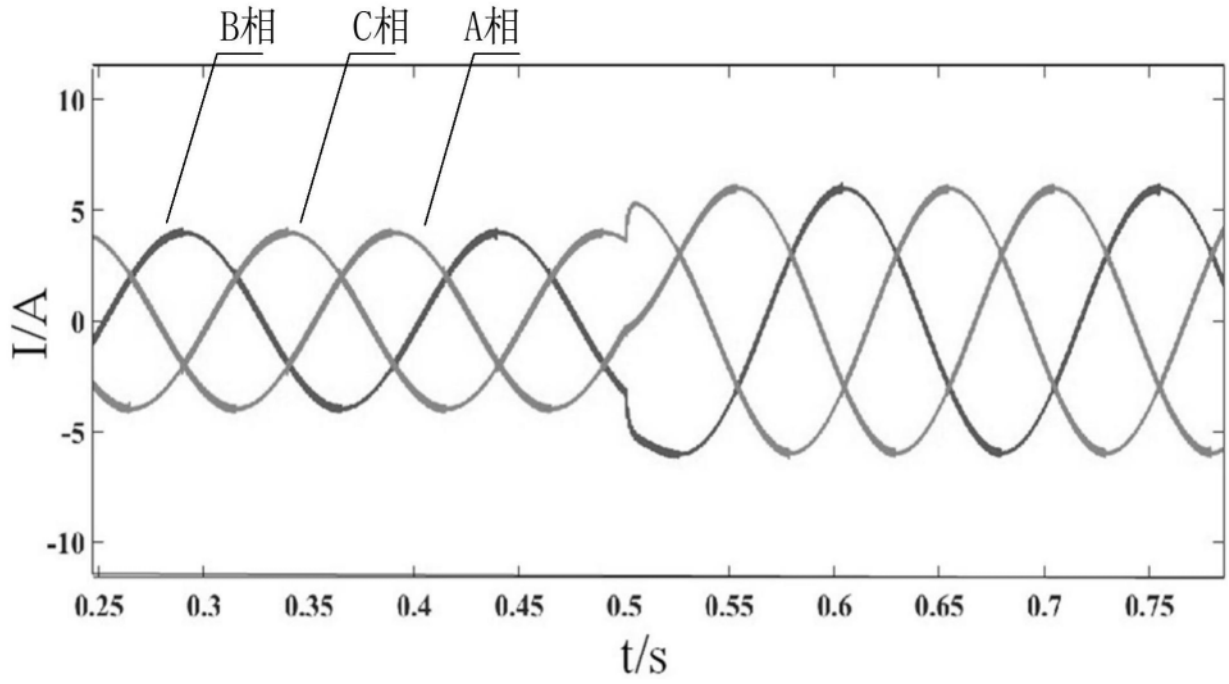


图9