

基于三相四桥臂逆变器的 APF 预测控制方法的研究

周玉洁¹ 杨洁¹ 夏永平¹ 张擎²

(1. 国网电力科学研究院 / 南京南瑞集团公司 2. 合肥工业大学电气与自动化工程学院)

[摘要]为解决三相四线制不对称电网系统中的谐波污染问题,本文提出了一种应用于三相四桥臂有源电力滤波器(APF)的控制方法。该方法在T采样时刻预测出T+1时刻的网侧电压和逆变器输出电流值,并根据建立的系统数学模型计算出T+1时刻的参考电压值,然后利用三维电压空间矢量调制得出主电路的控制信号,驱动主电路输出补偿电流以达到消除谐波的目的。此方法能有效降低采样、计算环节带来的延时,具有直流电压利用率高,系统动态响应好的优点。仿真实验证明了该方法的可行性。

[关键词]有源电力滤波器 预测控制 电压矢量调制 四桥臂逆变器

0. 引言

有源电力滤波器(APF)被认为是解决电网谐波污染问题最好的方案之一。它首先采集电网电流进入谐波检测环节,分离出电流基波与谐波分量,然后将谐波分量作为指令电流信号送入PWM控制环节发出PWM信号来驱动四桥臂逆变器主电路产生与谐波电流方向相反的补偿电流,送入电网抵消谐波电流从而达到补偿的目的^[1]。

目前对三相四线制APF系统的研究中,大多是基于三桥臂电容中点分离式逆变器的主电路结构。这种电路结构虽较容易实现,但直流利用率偏低,输出相电压幅值只有直流母线电压的一半,而采用四桥臂逆变器的主电路结构可以有效解决这一问题,并且针对电网三相不平衡或带不对称负载时能为零序分量提供释放通道。

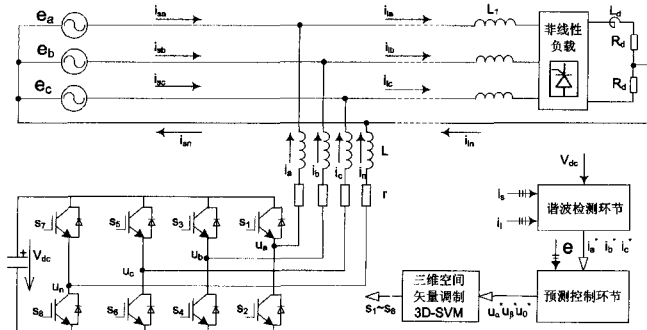


图1 APF的系统结构图

对于APF的补偿控制策略,典型的控制方法有滞环电流控制、载波电流控制以及电压矢量调制等方法。在其控制过程中,由于电流采样周期及控制延时的存在,必将影响电流跟踪的动态性能,而预测电流控制在T采样时刻预测T+1时刻的参考电流值,很好的解决了控制中出现的拍差问题。文献[3][4]提出了目标误差函数的概念,在主电路固有的开关状态中选取能够使误差函数最小的状态进行作用。本文在对参考值电压进行预测的基础上采用电压空间矢量调制(SVM)的方法,利用主电路固有的输出去合成参考电压矢量,能达到更好矢量逼近效果,在外特性看来,即为更好的电流跟踪效果。

1. APF的参考电压预测分析

三相四桥臂APF系统电路如图1所示,图中 e_a, e_b, e_c 为网侧电压; u_a, u_b, u_c 为APF输出相电压; i_a, i_b, i_c 为网侧电流; i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc} 为负载侧电流; i_n, i_{n0} 为APF三相及中线输出电流; L, r 分别为APF的交流侧输出电感和输出电阻。

为了简化三相及中线分析和消除相间影响,本文在 $\alpha\beta 0$ 坐标系下对系统进行分析。 abc 坐标系到 $\alpha\beta 0$ 坐标系的变换公式如式(1)所示,其中,变换式的第三行表示系统中的零序分量。

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

通过坐标变换,列写系统方程如式(2)所示:

$$\begin{cases} v_\alpha = L \frac{di_\alpha}{dt} + r i_\alpha + v_{\alpha 0} \\ v_\beta = L \frac{di_\beta}{dt} + r i_\beta + v_{\beta 0} \\ v_0 = L_0 \frac{di_0}{dt} + r_0 i_0 + v_{00} \\ r_0 = r + 3r_n \\ L_0 = L + 3L_n \end{cases} \quad (2)$$

其中, $v_{(\alpha\beta 0)}, i_{(\alpha\beta 0)}$ 分别为逆变器输出电压电流矢量的坐标分量; $v_{(\alpha\beta 0)}$ 是三相网侧电压矢量的坐标分量; i_a, i_n 分别是主电路三相及中线的输出电流; r_a, r_n 分别是三相及中线的输出电阻。对系统加入零阶保持器进行离散化,则式(2)可变为:

$$\begin{cases} v_{\alpha,T+1} = \frac{L}{T_s} (i_{\alpha,T+1} - i_{\alpha,T}) + r (i_{\alpha,T+1} - i_{\alpha,T}) + v_{\alpha,T+1} \\ v_{\beta,T+1} = \frac{L}{T_s} (i_{\beta,T+1} - i_{\beta,T}) + r (i_{\beta,T+1} - i_{\beta,T}) + v_{\beta,T+1} \\ v_{0,T+1} = \frac{L_0}{T_s} (i_{0,T+1} - i_{0,T}) + r_0 (i_{0,T+1} - i_{0,T}) + v_{0,T+1} \end{cases} \quad (3)$$

在式(3)中, i_T, i_{T+1} 为当前时刻和下一时刻逆变器电路中电流。为了能在T时刻得到T+1时刻的逆变器输出参考电压 v_{ref} ,需要通过对T+1时刻的网侧电压 $v_{s,T+1}$ 和逆变器的输出参考电流进行预测,于是控制规则如下式(4)所示。

$$\begin{cases} v_{\alpha,ref} = \frac{L}{T_s} (\dot{i}_{\alpha,T+1} - \dot{i}_{\alpha,T}) + r (\dot{i}_{\alpha,T+1} - \dot{i}_{\alpha,T}) + v_{\alpha,T+1} \\ v_{\beta,ref} = \frac{L}{T_s} (\dot{i}_{\beta,T+1} - \dot{i}_{\beta,T}) + r (\dot{i}_{\beta,T+1} - \dot{i}_{\beta,T}) + v_{\beta,T+1} \\ v_{0,ref} = \frac{L_0}{T_s} (\dot{i}_{0,T+1} - \dot{i}_{0,T}) + r_0 (\dot{i}_{0,T+1} - \dot{i}_{0,T}) + v_{0,T+1} \end{cases} \quad (4)$$

网侧电压的预测可以利用其周期性由当前及以往电压值来确定,假设网侧电压平衡, $v_{s,T+1}$ 可由下式得到:

$$\begin{cases} v_{\alpha,T+1} + j \cdot v_{\beta,T+1} = e^{j\omega T} (v_{\alpha,T} + j \cdot v_{\beta,T}) \\ v_{0,T+1} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

逆变器输出参考电流 i_{T+1} 的预测,考虑到电流变化的周期性,它的值由两部分组成:固定分量和扰动分量,分别设为 $\dot{i}_{1(T+1)}$ 和 $\dot{i}_{2(T+1)}$ 。对于固定分量,采用线性外推算法,即假设电流增量在每个控制周期近似相同,经过线性推导可以得到:

$$\dot{i}_{1(T+1)} = 2\dot{i}_T - \dot{i}_{T-1} \quad (6)$$

对于扰动分量,采用二阶拉格朗日插值公式法如下:

$$\dot{i}_{2(T+1)} = 3\dot{i}_T - 3\dot{i}_{T-1} - \dot{i}_{T-2} \quad (7)$$

可见,由于电流变化的周期性,T+1时刻的参考电流值与此前的采样时刻值有关,因此,在程序实现此算法时,应建立数据表以对不同时刻的采样值进行调用。

2. APF的三维电压空间矢量(3D-SVM)调制

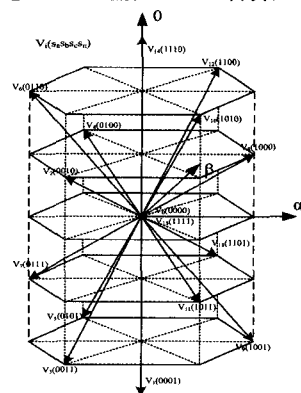


图2 四桥臂逆变器的输出电压矢量分布图

APF的主电路结构为四桥臂的电压型逆变器,共有16种开关状态;每一种开关状态对应于一个逆变器的三相输出电压,将每一组输出电压值运用式(1)变换到 $\alpha\beta 0$ 坐标系下得到一个矢量,这样就形成了16个APF的输出电压矢量。它们在 $\alpha\beta 0$ 坐标下的空间分布如图2所示,电网电流中的零序分量,使电压矢量中产生0轴分量,进而将其空间分布由平面正六边形抬升至空间的正六棱柱。

电压空间矢量调制的思路在于用已有的输出电压矢量去合成在预测环节得到的参考电压矢量,进而使APF的输出电流跟踪指令电流,达到补偿谐波电流的目的。为了选择合适的输出矢量参与合成,需要对正六棱柱区域进行划分,先将其划分为6个正三棱柱,每个三棱柱再划分为4个四面体。在调制时,首先判断参考电压空间矢量位于哪一个四面体中,然后利用组成该四面体的3个非零矢量和2个零矢量来合成位于其中的参考电压矢量 v_{ref} 。

电压矢量合成的原理是根据平行四边形法则和PWM面积的等效进行的,数学表达式如式(8)所示:

$$\int_0^{T_s} \vec{v}_{ref} dt = \sum_{i=1}^n \left(\int_0^{T_i} \vec{v}_i dt \right) \quad (8)$$

其中, $\vec{v}_{ref} = [v_{\alpha,ref}, v_{\beta,ref}, v_{0,ref}]^T$ 为参考电压矢量; $\vec{v}_i = [v_{\alpha,i}, v_{\beta,i}, v_{0,i}]^T$ 为第*i*个输出电压矢量,其作用时间为 T_i ; T_s 为一个开关周期且满足 $\sum_{i=1}^n T_i = T_s$ 。在本文的3D-SVM调制中, $n=3$,故式(8)简化为:

$$\int_0^{T_s} \vec{v}_{ref} dt = \int_0^{t_1} \vec{v}_1 dt + \int_{t_1}^{t_1+t_2} \vec{v}_2 dt + \int_{t_1+t_2}^{t_1+t_2+t_3} \vec{v}_3 dt \quad (9)$$

这样,就可以利用式(9)计算合成每个矢量的作用时间 t_1, t_2, t_3 。

调制会出现欠调制与过调制的情况:欠调制即 $T_s > t_1+t_2+t_3$,此时就需要零矢量的作用来完成整个开关周期的调制,零矢量的作用时间 t_0 如式(10);

$$t_0 = T_s - (t_1+t_2+t_3) \quad (10)$$

过调制即 $T_s < t_1+t_2+t_3$,此时在开关周期内不需要零矢量的作用且合成矢量的作用时间需要做近似调整如式(11)。

$$\begin{cases} t_1 = \frac{t_1}{t_1+t_2+t_3} T_s \\ t_2 = \frac{t_2}{t_1+t_2+t_3} T_s \\ t_3 = \frac{t_3}{t_1+t_2+t_3} T_s \end{cases} \quad (11)$$

由式(8)-(11)得到各矢量的作用时间,还需要确定它们的作用顺序,即一个开关周期的PWM控制信号的波形。零矢量的选取和非零矢量的作用顺序不同,得到的PWM波形大致可分为3种:上升沿对齐的PWM波形、下降沿对齐的PWM波形和对称分布的PWM波形,它们的特性各不相同。其中,对称分布的PWM波形的电压畸变和电流纹波最小,而APF的目的在于消除电流波形的畸变,故本文采用这种九段式空间矢量PWM波形作为主电流的控制信号,如图3所示。

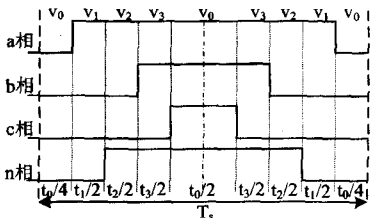


图3 单周期九段式空间矢量 PWM 波形示意图

由图3可以看出,在每个PWM周期,各桥臂的开关状态只改变两次,有着较低的开关频率。

3. 仿真实验及分析

为了验证上述控制方法的可行性,本文按照图1的系统结构,采用MATLAB/Simulink模块搭建系统模型进行仿真。系统模型为电网中接三相桥不可控整流电路,A相再接一个单相桥整流电路构成不对称负载。三相电源相电压为工频220V,逆变器直流侧电压800V,三相主功率桥臂和第四桥臂的三角波频率均为10kHz,APF的交流侧电感为0.0012H。系统模型仿真图如图4所示。

补偿前三相及中线电流波形如图5所示,电网电流畸变率THD三

相(平均)为23.61%,中线电流值很大,接近40A;对A相电流波形进行FFT频域分析如图6所示,A相中除了含有基波外还有较大的3次、5次等谐波分量,畸变较严重;补偿后的电流波形如图7所示,三相电流的波形为正弦波形且中线电流基本补偿为零,对A相电流波形进行FFT频域分析可以看出,3次谐波完全消除,其余谐波分量也基本得到补偿,电网电流THD值下降到6.17%。补偿后基本符合国家制订的关于电能质量和公用电网谐波限制的标准。

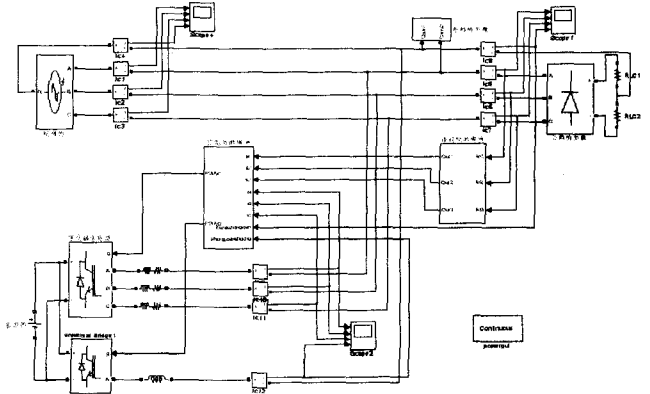


图4 APF系统仿真模型

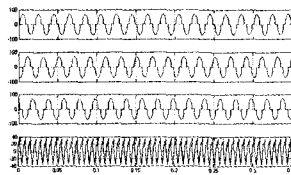


图5 补偿前的三相及中线电流波形

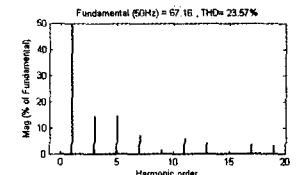


图6 补偿前A相电流波形的FFT分析

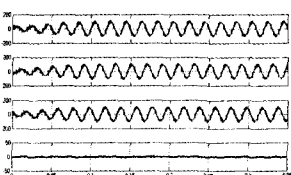


图7 补偿后的三相及中线电流波形

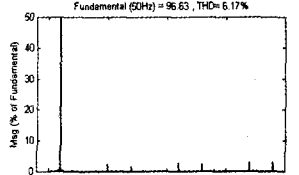


图8 补偿后A相电流波形的FFT分析

4. 结论

本文将三维电压空间矢量调制(3D-SVM)算法应用于四桥臂逆变器主电路的APF系统的控制中,并运用预测算法确定所需的参考电压矢量,有效的解决了在电流跟踪控制中的差拍问题。该方法对直流电压的利用率有很大的改善、具有较好的动态性能且能够消除采样、计算带来的延时,补偿效果较好。仿真实验证明了该控制方法的正确性。

参考文献

- [1]姜齐荣,赵东元,陈建业.有源电力滤波器——结构·原理·控制[M].北京:科学出版社,2005.
- [2]徐丽华,郭世明.基于电流预测的SVPWM控制的研究[J].电源世界,2005(6):22-24.
- [3]王晓刚,谢运祥,帅定新.以网侧电流为补偿目标的有源电力滤波器预测电流控制[J].电气应用,2008,27(19):69-72.
- [4]吴勇,徐金榜,王庆义等.并联有源电力滤波器电流预测控制[J].华中科技大学学报,2008,36(4):99-102.
- [5]刘凤君.三相四桥臂逆变器的空间矢量调制技术[J].电源技术应用,2002,5(10):489-495.
- [6]A.M.Msaoud, S.J.Finney, B.W.Williams. Predictive Current Control of a Shunt Active Power Filter [J]. 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp:3567-3572.
- [7]Richard Zhang, V.Himamshu Prasad, Dushan Boroyevich. Three-Dimensional Space Vector Modulation for Four-Leg Voltage-Source Converters [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2002, 17(3): 314-326.