

基于改进SVPWM算法的有源电力滤波器的研究

分析了有源电力滤波器的原理，简要介绍了基于重复控制器的无差拍控制策略；针对传统的SVPWM算法在扇区判定、矢量作用时间求取方面计算量大的缺点，基于有效作用时间的概念，提出一种改进的SVPWM算法，简化了运算过程，缩短了运算时间，为数字控制提供了方便。在Matlab仿真软件上搭建模型，仿真结果验证了该算法的正确性。

王 维 李 岚/太原理工大学电气与动力工程学院



王 维/硕士研究生

随着非线性负载的大量使用，电网的谐波问题已经成为了电能质量的主要问题之一。作为治理谐波的有效手段，有源电力滤波器（Active Power Filter, APF）得到了快速的发展。在APF控制中，谐波电流的跟踪控制至关重要。常用的控制方法主要有：三角波比较、滞环控制和无差拍控制^[1]。其中三角波比较方法开关频率固定，但是响应速度较慢；滞环控制响应速度快，容易实现，但开关频率波动剧烈；两者都是有差调节。无差拍控制属于预测性质的控制方法，通过对指令信号的预测，实现谐波电流的跟踪控制。

采用无差拍控制方法生成的电压信号通过电压空间矢量脉宽调制（SVPWM），可产生控制逆变器的脉冲信号，提高直流侧电压的利用率。传统的SVPWM算法在扇区判定、矢量作用时间求解过程中需要进行大量复杂的三角函数运算，在数字化控制实现中有较大的时间延迟。

文献[2]采用一种空间矢量的扇区标

山西省科技攻关项目（20110321061）。

号的简化计算判别法，对矢量作用时间的计算是三相坐标到两相静止坐标后经条件判断并计算得到，其中有一些无理数的近似运算、坐标旋转运算等。文献[3]提出了一种SVPWM的新型算法，无须求电压矢量夹角的三角函数运算和坐标旋转运算，但仍不免扇区的判定。

本文分析了并联型APF的工作原理，简要介绍了基于重复控制器的无差拍控制策略，提出了一种基于有效作用时间概念的SVPWM控制算法，同时给出了各开关导通时间求取的详细推导过程。该算法无须进行参考电压所在扇区判定及复杂的三角运算，仅需简单的四则运算，简化了运算过程，缩短了运算时间，便于数字化实现。在Matlab仿真平台搭建了APF仿真系统，对无差拍控制方法得出的电压信号进行调制，验证了该算法的正确性。

并联型APF的工作原理

图1为三相三线制并联型APF的原理图。

图1中， e_a 、 e_b 和 e_c 为电源电压； i_{ia} 、 i_{ib} 和 i_{ic} 为负载电流； i_{ca} 、 i_{cb} 和 i_{cc} 为APF补偿电流。指令电流运算电路实时计算出负载电流 I_L 中的谐波成分 i_h ，并根据APF输出电流 I_C 与 I_L 中的谐波成分相抵消的原则，生成指令电流 I_C^* 。通过补偿电流跟踪控制电路（这里采用无差拍控制方法）得到参考电压矢量 u^* ， u^* 经改进的SVPWM调制产生触发脉冲控制逆变桥，从而使APF输出相应的补偿电流 I_C ，达到

关键词/Keywords

有源电力滤波器 ·
改进的SVPWM算法 ·
无差拍控制 ·
有效作用时间 ·

谐波补偿的目的。

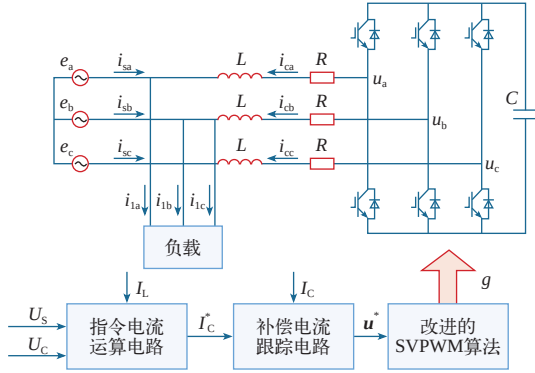


图1 三相三线制并联APF原理图

APF在 $\alpha-\beta$ 坐标系下的数学模型如下

$$\begin{cases} u_{\alpha} = L \frac{di_{\alpha}}{dt} + Ri_{\alpha} + e_{\alpha} \\ u_{\beta} = L \frac{di_{\beta}}{dt} + Ri_{\beta} + e_{\beta} \end{cases} \quad (1)$$

无差拍控制

将式（1）离散化可得

$$\begin{cases} u_{\alpha}(k) = L \frac{di_{\alpha}(k+1) - i_{\alpha}(k)}{T_s} + Ri_{\alpha}(k) + e_{\alpha}(k) \\ u_{\beta}(k) = L \frac{di_{\beta}(k+1) - i_{\beta}(k)}{T_s} + Ri_{\beta}(k) + e_{\beta}(k) \end{cases} \quad (2)$$

式中， $i_p(k)(p=\alpha, \beta)$ 为当前时刻APF输出的补偿电流； $i_p(k+1)$ 为下一采样时刻的预测补偿电流； T_s 为采样周期。

无差拍控制本质上是一种预测控制算法，控制准确度主要取决于 $k+1$ 时刻的预测补偿电流值的准确度。由于接稳定的负载，则负载电流是周期重复的。本文在平推算法的基础上嵌入重复控制器^[4]，将此刻的参考电流值经平推后作为后两拍参考电流的预测值，通过重复控制校正算法，在下一周期提前叠加补偿量，从而实现对指令电流的跟踪。式（2）中求取的 u_{α} 、 u_{β} 即为参考电压 $\mathbf{u}^*$ 。

改进的SVPWM算法

图2为电压矢量与扇区分布，对于扇区内任意的参考电压矢量，都可用与其相邻的两个电压矢量合成，可表示为

$$\mathbf{u}^* T_s = u_n T_1 + u_{n+1} T_2 \quad (3)$$

式中， T_1 、 T_2 为相邻两个电压矢量幅值； u_n 、 u_{n+1} 为在 T_s 周期内的作用时间。作用时间 T_1 、 T_2 可由参考电压 $\mathbf{u}^*$ 在 $\alpha-\beta$ 坐标轴上的分量 u_{α} 、 u_{β} 求出，即

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{2}{3} \frac{|\mathbf{u}^*| T_s \sin(\pi/3 - \varphi)}{u_{dc} \sin(\pi/3)} \\ &= \frac{\sqrt{3} T_s}{u_{dc}} \left[\sin\left(\frac{\pi}{3} k\right) u_{\alpha} - \cos\left(\frac{\pi}{3} k\right) u_{\beta} \right] \\ T_2 &= \frac{2}{3} \frac{|\mathbf{u}^*| T_s \sin(\varphi)}{u_{dc} \sin(\pi/3)} \\ &= \frac{\sqrt{3} T_s}{u_{dc}} \left[-\sin\left[\frac{\pi}{3}(k-1)\right] u_{\alpha} + \cos\left[\frac{\pi}{3}(k-1)\right] u_{\beta} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} u_{\alpha} &= |\mathbf{u}^*| \cos(\theta) \\ u_{\beta} &= |\mathbf{u}^*| \sin(\theta) \\ \theta &= \varphi + \frac{\pi}{3}(k-1) \\ k(\text{扇区}) &= 1, 2, \dots, 6 \end{aligned} \quad (5)$$

零电压矢量作用时间为

$$T_0 = T_s - T_1 - T_2 \quad (6)$$

由上可知，传统的SVPWM要求出作用时间 T_1 、 T_2 需进行扇区的判定以及三角计算，过程复杂繁琐。

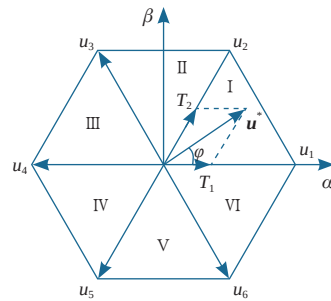


图2 电压空间矢量与扇区分布

现将参考电压 u_{α} 、 u_{β} 变换为 u'_a 、 u'_b 、 u'_c ，该变换与clark反变换相差 $\sqrt{2/3}$ 倍，即

$$\begin{pmatrix} u'_a \\ u'_b \\ u'_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{\alpha} \\ u_{\beta} \end{pmatrix} \quad (7)$$

假设参考电压矢量在扇区 I 中, 则将 $k=1$ 代入上式并适当推导可得

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{\sqrt{3}T_s}{u_{dc}} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} u_\alpha - \frac{1}{2} u_\beta \right] \\ &= \frac{T_s}{u_{dc}} \left[u_\alpha + \left(\frac{1}{2} u_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} u_\beta \right) \right] \\ &= \frac{T_s}{u_{dc}} u'_a - \frac{T_s}{u_{dc}} u'_b = T_a - T_b \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} T_2 &= \frac{\sqrt{3}T_s}{u_{dc}} (0u_\alpha + 1u_\beta) \\ &= \frac{T_s}{u_{dc}} \left[\left(-\frac{1}{2} u_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} u_\beta \right) - \left(-\frac{1}{2} u_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} u_\beta \right) \right] \\ &= \frac{T_s}{u_{dc}} u'_b - \frac{T_s}{u_{dc}} u'_c = T_b - T_c \end{aligned} \quad (9)$$

由上式可知, 作用时间 T_1 、 T_2 可由与相电压 U'_a 、 U'_b 和 U'_c 对应的时间 T_a 、 T_b 和 T_c 求出。同理可求出其他扇区的作用时间。结果表明, 不论在某一扇区, 传统方法的作用时间本质上即是两个与相电压对应时间的差值。与相电压对应时间定义如下

$$\begin{aligned} \frac{T_s}{u_{dc}} u'_a &= T_a \\ \frac{T_s}{u_{dc}} u'_b &= T_b \\ \frac{T_s}{u_{dc}} u'_c &= T_c \end{aligned} \quad (10)$$

结合有效时间的概念, 即在有效时间 T_{eff} 内, 有实质的电量流过负载。在此有效时间为 T_{max} 与 T_{min} 差值, 即

$$\begin{aligned} T_{max} &= \max(T_a, T_b, T_c) \\ T_{min} &= \min(T_a, T_b, T_c) \\ T_{eff} &= T_{max} - T_{min} \end{aligned} \quad (11)$$

与电压对应的时间 T_a 、 T_b 和 T_c 中至少有一个为负数, 且为了将零矢量均匀地分布在一个采样周期的两端, 在 T_a 、 T_b 和 T_c 上同时加一个时间偏移 T_{offset} 即可得到每一个桥臂开关导通时间 T_g , 即

$$\begin{aligned} T_{ga} &= T_a + T_{offset} \\ T_{gb} &= T_b + T_{offset} \\ T_{gc} &= T_c + T_{offset} \end{aligned} \quad (12)$$

SVPWM 实际导通时间如图3所示。

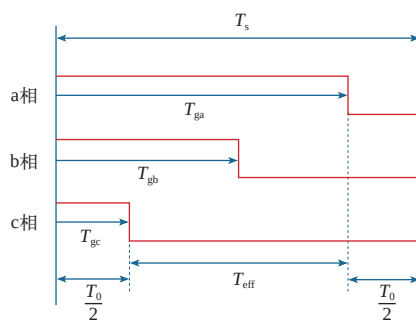


图3 SVPWM实际导通时间

$$\begin{aligned} T_0 &= T_s - T_{eff} \\ T_{min} + T_{offset} &= \frac{T_0}{2} \end{aligned} \quad (13)$$

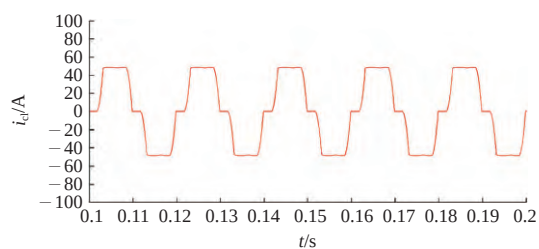
由式 (9) ~ 式 (12) 即可直接求出在一个采样周期中各开关的实际导通时间。相应地, 根据导通时间可导出各开关的占空比, 继而得到所需的脉冲信号。利用有效时间的概念, 可以直接计算出开关实际导通时间, 避免了扇区的判定及三角计算, 简化了运算过程, 缩短了运算时间, 更加便于数字实现。本方法只适用于电源电压为稳态的情况下, 当电源电压不对称或缺相时不再适用。

系统仿真分析

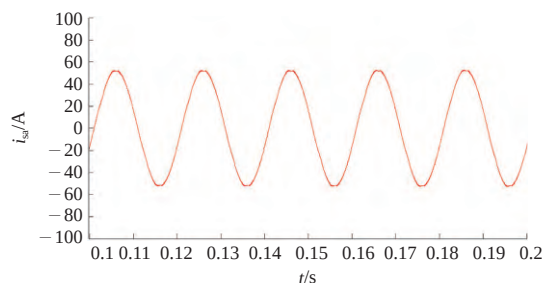
为了验证所提出的改进SVPWM算法的可行性和正确性, 基于Matlab仿真平台搭建了APF仿真系统, 对无差拍控制方法生成的信号进行调制。仿真参数如下: 电源线电压为 $U_s = 380$ V, 系统阻抗忽略不计; 直流侧电容 $C = 0.0015$ F; 开关频率 $f_s = 10$ kHz; 串联电感 $L = 2$ mH; 以三相不可控整流桥带阻感负载作为谐波源, 分别在负载恒定与负载畸变下进行仿真: ① 负载电感 $L_d = 1$ mH, 负载电阻 $R_d = 8$ Ω ; ② 负载电感 $L_d = 1.5$ mH, 负载电阻 $R_d = 20$ Ω 。下面以A相仿真波形为例进行分析。

基于改进SVPWM调制算法的APF的稳态条件下的仿真结果如图4所示。由图4可知, 谐波电流的畸变率 (THD) 下降为1.30%, 达到了良好的补偿, 继而说明了该调制方法的正确性。

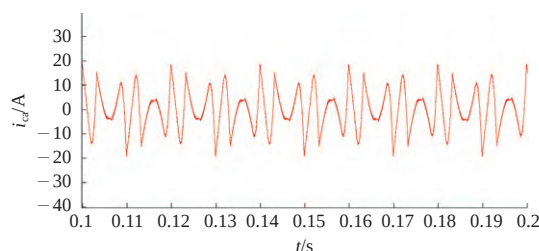
基于改进SVPWM调制算法的APF在负载畸变条件下的仿真结果如图5所示。在0.2 s时刻突增负



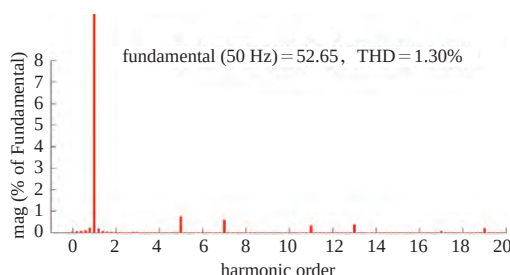
(a) A相负载电流



(b) 补偿后A相电源电流



(c) APF输出的A相电流



(d) A相电流谐波分析结果

图4 负载恒定下仿真波形

载,在0.4 s时刻突减负载,由仿真可以看出电流跟踪的时滞为0.025 s,运算响应迅速。

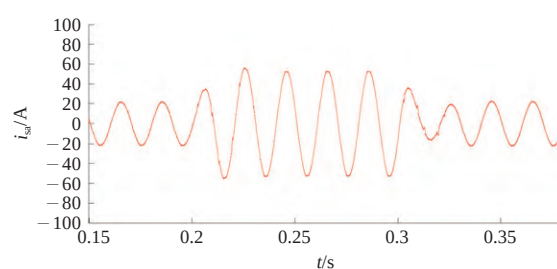


图5 负载畸变条件下仿真波形

结束语

本文提出了一种基于APF的简化SVPWM调制算法,该调制算法与传统算法相比,无须进行扇区的判定、复杂的三角计算等,通过简单的四则运算直接求出各开关的导通时间,大幅度地减小了运算时间,更加便于SVPWM调制的数字实现。

参考文献

- [1] 周娟,耿乙文.基于SVPWM三相三线有源滤波器控制策略研究[J].电气应用,2009(24):36-39.
- [2] 浦志勇,黄立培,吴学智.三相PWM整流器空间矢量控制简化算法的研究[J].电工电能新技术,2002(2):56-60.
- [3] 周卫平,吴正国,唐劲松,等.SVPWM的等效算法及SVPWM与SPWM的本质联系[J].中国电机工程学报,2006(2):133-137.
- [4] 周娟,秦静,王子绩,等.内置重复控制器无差拍控制在有源滤波器中的应用[J].电工技术学报,2013(2):233-238.

(收稿日期:2015-02-02) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告