

三电平静止无功发生器补偿控制研究

范其明¹, 赵相宾¹, 刘建强², 郭卉¹

(1. 天津中德应用技术大学 智能制造学院, 天津 300350; 2. 中海油田
服务股份有限公司 油田技术研究院, 河北 三河 065201)

摘要:针对 90°坐标系空间矢量脉宽调制(SVPWM)计算复杂的问题, 采用了改进 60°坐标系 SVPWM 的方法, 该方法利用坐标变换和标么化减少了三角函数的计算量, 通过归一化简化了算法的运算过程。经过与 90°和常规 60° SVPWM 补偿结果对比, 验证了所采用方法的正确性。针对 PI 控制对周期性信号跟踪性差, 且重复控制中延时的控制在负载突变时, 导致补偿后电流发生畸变的问题, 引入加权式并联型重复控制。仿真和实验表明, 通过选择最佳权值比来均衡 PI 和重复控制的作用, 改进 60°坐标系的 SVPWM 和加权式并联型重复控制的三电平静止无功发生器(SVG), 能够消除补偿电流信号的畸变, 并能较好地完成无功补偿。

关键词:静止无功发生器; 空间矢量脉宽调制(SVPWM); 60°坐标系; 重复控制; 权值比

中图分类号: TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd20144

The Research on Compensation Control for Three-level Static Var Generator

FAN Qiming¹, ZHAO Xiangbin¹, LIU Jianqiang², GUO Hui¹

(1. School of Intelligent Manufacturing, Tianjin Sino-German Vocational Technical College,
Tianjin 300350, China; 2. Oilfield Technology Research Institute, China Oilfield
Services Co., Ltd., Sanhe 065201, Hebei China)

Abstract: In order to solve the complex computational problem of space vector pulse width modulation (SVPWM) in 90° coordinate system, an improved SVPWM in 60° coordinate system was adopted. The calculation of trigonometric function by coordinate transformation and standardization was reduced, and the normalization method was used to simplify the operation process of the algorithm. The correctness of the proposed modulation method was verified by comparing the compensation results of SVPWM in 90° and conventional 60° coordinate systems. Aiming at the problem that PI control has poor tracking ability for periodic signals and that the delay control in repetitive control leads to current distortion after compensation when the load changed abruptly, weighted parallel repetitive control was adopted. The simulation and experiment results show that by choosing the best weight ratio to balance the role of PI and repetitive control, the three-level static var generator (SVG) with improved SVWM and weighted parallel repetitive control in 60 degree coordinate system can eliminate the distortion of compensating current signal and achieve better reactive power compensation.

Key words: static var generator(SVG); space vector pulse width modulation(SVPWM); 60° coordinate system; repetitive control; weighting ratio

静止无功发生器(SVG)是一种先进的动态无功补偿装置,其调节速度快,运行范围宽,而且采用多电平技术,可大大减少补偿电流中的谐波含量,因而广泛地应用于电能质量控制领域^[1-3]。

SVG 的补偿控制关键技术包括逆变电路的

调制方法和电流跟踪控制策略,其快速性和准确性是决定系统动态性能和补偿精度的重要因素。因此,有必要对 SVG 补偿控制关键技术进行研究。

SVG 逆变电路的调制方法有多种,其中由于 SVPWM 易于数字化实现、电压利用高等特点^[4-6]

基金项目:天津市科技计划项目技术创新引导专项优秀科技特派员项目(19JCTPJC42000);天津中德应用技术大学校级重点科研课题(X17005);天津市中德应用技术大学校级教改课题(JG1913)。

作者简介:范其明(1985—),男,硕士,副教授,Email: fanqiming91@126.com

而被广泛的应用。但是在 90° 坐标系 SVPWM 中,存在大量的三角函数运算,且过程较为复杂。许多学者提出了 60° 坐标系 SVPWM^[7-8],减少了三角函数的运算量,但是 60° 坐标系 SVPWM 的运算过程没有变,仍然较为复杂。PI 控制是 SVG 常规电流的跟踪控制策略,具有结构简单且易于实现等特点,但是 PI 控制对周期性信号跟踪能力较差,文献[9]采用重复控制,有效解决了周期性信号跟踪和扰动抑制的问题。但是在 SVG 控制系统中,当负载发生突变时,重复控制由于滞后一个周期控制的特性,导致 SVG 补偿后的电流发生畸变。文献[10]基于重复控制进行改进,引入前馈控制,并且增加指令信号动态延时处理,虽然可以消除信号畸变,但是结构较为复杂,不易实现。

本文针对上述研究方法中存在的问题,对 SVG 补偿控制技术做了相应的改进,首先采用了一种改进的 60° 坐标系 SVPWM 的方法,利用坐标变换和标幺化,避免了大量的三角函数运算量,同时对小扇区判断和基本电压矢量的作用时间计算进行归一化处理,简化运算过程。然后针对常规电流跟踪控制策略不足的问题,引入加权式并联型重复控制。最后建立 SVG 的仿真模型和实验平台,验证所采用改进调制方法的正确性,分析了加权式并联型重复控制中不同权值比对系统影响,选择出最佳权值比以达到最佳的补偿控制效果。

1 三电平 SVG 主电路拓扑结构

SVG 主电路采用二极管钳位三电平逆变电路,其拓扑结构^[11]如图 1 所示。

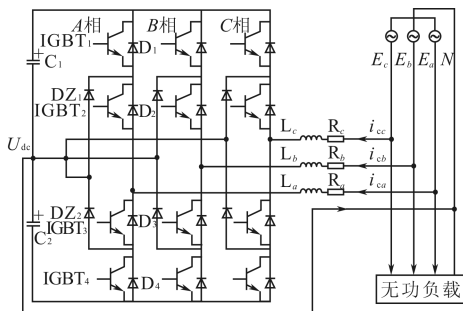


图 1 三电平 SVG 主电路的拓扑结构

Fig. 1 Topology of three level SVG main circuit

由图 1 可以看出: U_{dc} 为直流侧电压,根据基尔霍夫电压定律,可得到逆变电路输出电压和电流的关系为

$$\begin{cases} U_a = E_a - L \frac{-i_{ca}^* - i_{ca}}{T_s} - R_a i_{ca}^* \\ U_b = E_b - L \frac{-i_{cb}^* - i_{cb}}{T_s} - R_b i_{cb}^* \\ U_c = E_c - L \frac{-i_{cc}^* - i_{cc}}{T_s} - R_c i_{cc}^* \end{cases} \quad (1)$$

式中: U_a, U_b, U_c 为输出电压信号; $i_{ca}^*, i_{cb}^*, i_{cc}^*$ 为当前采样时刻下得到电流信号; i_{ca}, i_{cb}, i_{cc} 为同一时刻逆变电路产生的补偿电流信号; R_a, R_b, R_c 为线路等效电阻; T_s 为控制系统的开关周期,式(1)中各参数的参考方向与图 1 一致。

2 60° 坐标系的 SVPWM 原理

当三电平 SVG 逆变电路正常工作时,每相桥臂都有 3 种开关状态,分别为 P, O, N, 因此主电路共有 27 种开关组合,每 1 种开关状态对应 1 种基本空间电压矢量,所以共有 27 种基本空间电压矢量。

常规空间电压矢量图如图 2 所示。

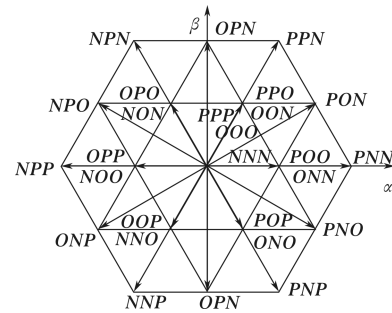


图 2 常规空间电压矢量分布图

Fig. 2 Conventional space vector diagram

由图 2 可以看出:基本空间电压矢量将六边形空间电压矢量图分为 6 个大三角形扇区,每个大三角形扇区又被分为 4 个小扇区。

常规 SVPWM 是建立在 90° 的 $\alpha-\beta$ 坐标系^[12]中,其工作原理如下:首先通过算法判断参考电压矢量所在的大扇区和小扇区,然后根据伏秒平衡原理,得到基本矢量的作用时间,最后生成 PWM 信号。而本文提出的新控制策略中的 SVPWM 工作原理:首先将 90° 坐标系变换到 60° 坐标系,然后再进行其他计算。

2.1 坐标变换

在 60° 坐标系中,定义坐标轴为 g 轴和 h 轴,取 g 轴与 $\alpha-\beta$ 坐标系中 α 轴重合,逆时针旋转 60° 即为 h 轴, $\alpha-\beta$ 坐标系和 $g-h$ 坐标系如图 3 所示。

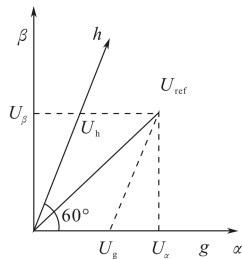


图 3 90°坐标系和 60°坐标系下参考矢量分解图

Fig. 3 Decomposition of reference vectors in 90 degree coordinate system and 60 degree coordinate system

由图 3 可以看出:参考矢量 U_{ref} 在 $\alpha-\beta$ 坐标系中横纵坐标为 U_α, U_β , 在 $g-h$ 坐标系中的横纵坐标为 U_g, U_h 。

在 $\alpha-\beta$ 坐标系中,通过 Clark 变化,三相旋转坐标系变化为直角坐标系的模型:

$$U_{ref} = \begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, U_a, U_b, U_c , 可以通过式(1)计算得到,参考矢量 U_{ref} 在从 $\alpha-\beta$ 坐标系变换到 $g-h$ 坐标系:

$$\begin{bmatrix} U_g \\ U_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ 0 & \frac{2}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

由式(2)和式(3)可得三相旋转坐标变化到坐标系的模型:

$$\begin{bmatrix} U_g \\ U_h \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

三电平 SVG 主电路空间电压矢量中大矢量的幅值为 $2U_{dc}/3$, 小矢量幅值为 $U_{dc}/3$, 将基本电压矢量除以 $U_{dc}/3$, 实现空间电压矢量标么化, 60° 坐标系下空间电压矢量图, 如图 4 所示。

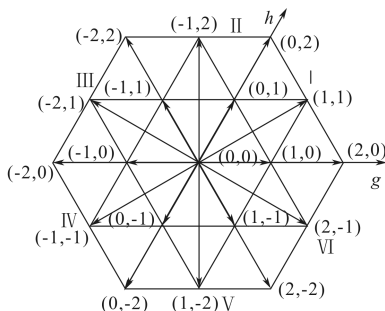


图 4 60°坐标系下的空间矢量分布图

Fig. 4 Space vector diagram in 60° coordinate system

由图 4 可以看出:所有基本电压矢量经过坐标变换和标么化后, $(0,0), (0,1), (2,0)$ 等不仅仅代表开关状态, 同样代表 60° 坐标系中的坐标。

2.2 大扇区判断

60° 坐标系中, 判断参考电压矢量所在大扇区的位置, 需要添加一根辅助线“ $g+h=0$ ”来判断。依据图 4 所示, 可以得出大扇区判断条件如表 1 所示。

表 1 大扇区判断条件

Tab. 1 Judgment condition of large sector

N	I	II	III	IV	V	VI
U_g	>0	<0	<0	<0	>0	>0
U_h	>0	>0	>0	<0	<0	<0
$U_g + U_h$	—	>0	<0	—	<0	>0

参考电压矢量可能会在任何一个大扇区, 用 U_{ref}^N 表示, 在确定大扇区后, N 即被确定, U_{ref}^N 在 $g-h$ 坐标系中的坐标表示为 (U_g^N, U_h^N) , $N=1\sim6$ 。

2.3 归一化坐标变换分析

在 60° 坐标系的 SVPWM 中, 6 个大扇区具有一致性, 因此采取将其他扇区旋转变换到 I 扇区, 实现归一化判断分析。由图 4 可以看出从 I 号扇区开始, 后边一个扇区与前一个扇区相隔 60° , 且每个扇区都是等边三角形, 因此利用三角形相似原理可以得出其他 5 个大扇区的矢量用 I 扇区去表示的坐标变化关系^[13]:

$$\begin{bmatrix} U_g \\ U_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}^{N-1} \begin{bmatrix} U_g^N \\ U_h^N \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: U_g, U_h 为第 1 扇区坐标; U_g^N, U_h^N 为其他第 N 扇区坐标, $N=2\sim6$ 。

由式(5)可以得出其他大扇区的参考电压矢量旋转到 I 号大扇区的坐标变换, 如表 2 所示。

表 2 归一化后参考电压矢量变换结果

Tab. 2 Results of normalized reference vector transformations

N	g 轴坐标	h 轴坐标
I	U_g	U_h
II	$U_g^2 + U_h^2$	$-U_g$
III	U_h^3	$-U_g^3 - U_h^3$
IV	$-U_g^4$	U_h^4
V	$-U_g^5 - U_h^5$	U_h
VI	$-U_h^6$	$U_g^6 + U_h^6$

2.4 小扇区判断

经过归一化坐标变换, 只需要在 I 号大扇区判断小扇区, 即可判断出其他大扇区中的小扇区位置。I 号大扇区中的 4 个小扇区如图 5 所示。

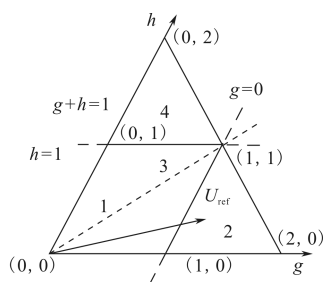


图 5 小扇区判断

Fig. 5 Judgment of small sectors

60°坐标系的 SVPWM 中的判断小扇区,需要引入辅助线“ $g+h=1$ ”。由图 5 可以看出:根据每个小扇区的坐标可以推出小扇区的判断条件,如表 3 所示。

表 3 小扇区判断条件

Tab. 3 Judgment condition of small sectors

n	U_g	U_h	U_g+U_h
1	<1	<1	<1
2	>1	<1	>1
3	<1	<1	1
4	<1	>1	>1

2.5 基本电压矢量作用时间

判断出 U_{ref} 所在的小扇区,根据伏秒原理求出合成 U_{ref} 的 3 个基本矢量的作用时间:

$$\begin{cases} U_x T_x + U_y T_y + U_z T_z = U_{ref} T_s \\ T_x + T_y + T_z = T_s \end{cases} \quad (6)$$

式中: T_s 为采样周期; U_x, U_y, U_z 为所在小扇区中最接近的 3 个基本电压矢量分量。

由式(6)可以计算出 I 号扇区中各小扇区的电压矢量作用时间。由此可得各个小扇区基本电压矢量作用时间,如表 4 所示。

表 4 各个小扇区基本电压矢量的作用时间

Tab. 4 Acting time of voltage vectors in each small sector

n	作用时间		
	T_x	T_y	T_z
1	$T_s U_g$	$T_s U_h$	$T_s (1 - U_g - U_h)$
2	$T_s (2 - U_g - U_h)$	$T_s U_h$	$T_s (U_g - 1)$
3	$T_s (1 - U_h)$	$T_s (1 - U_g)$	$T_s (1 - U_g + U_h - 1)$
4	$T_s (2 - U_g - U_h)$	$T_s U_g$	$T_s (U_h - 1)$

同理,通过归一化坐标变换,可以得到其他大扇区中电压矢量的作用时间。相对于 90°坐标系的 SVPWM,改进的 60°坐标系的 SVPWM 减少了大量三角函数的计算,并且通过归一化坐标变换,在 I 号大扇区即可完成对其他大扇区中的小扇区判断以及基本电压矢量的作用时间,简化了 60°坐标系的 SVPWM 运算过程。

3 加权式并联型重复控制

3.1 PI 控制器及其参数设置

以 A 相为例,由图 1 分析可知,被控对象 G_p 在 s 域的表达式为

$$G_p = \frac{1}{L_a s + R_a} \quad (7)$$

因此,得到 A 相的 PI 控制结构如图 6 所示。

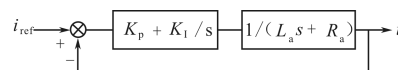


图 6 A 相 PI 控制系统结构图

Fig. 6 Structure diagram of PI control system in A phase

采用零极点对消法^[14],令 $K_i/K_p = R_a/L_a$,系统闭环传递函数为 $G(s) = (K_p/L_a)/(s + K_p/L_a)$,所以系统闭环传递函数的截止频率 $f_{cut} = K_p/(2\pi L_a)$,如果已知逆变器等效开关频率 f_s ,根据工程经验设计 $f_{cut} = 1/5 f_s$,即可获得控制比例和积分系数。

本文中滤波电抗器参数为 $L_a = 0.8 \text{ mH}$, $R_a = 0.003 \Omega$,装置开关频率设置为 $f_s = 25.6 \text{ kHz}$,可求得 $K_p = 25.72$, $K_i = 96$ 。

3.2 重复控制的原理分析

重复控制是基于内模原理的基础上建立的控制策略,其完整的结构如图 7 所示^[15]。

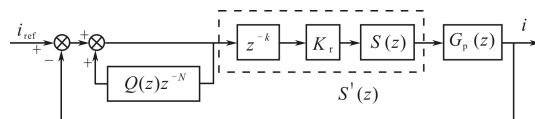


图 7 重复控制结构图

Fig. 7 Structure diagram of repetitive control

在 SVG 控制系统中,电网工频 $f = 50 \text{ Hz}$,系统开关频率为 $f_s = 25.6 \text{ kHz}$ 。因此,设 $N = f_s/f = 512$; $Q(z)$ 可设置为小于且接近于 1 的常数或者设置为 1 个具有低通滤波性质的函数,根据经验值,设置为 0.95;补偿器 $S(z)$ 主要作用为消除高频干扰,根据这一原则, $S(z)$ 可设置为 1 个二阶低通滤波器,截止频率设置为 2 kHz ,因此, $S(z) = 0.0443 \cdot (z^2 + 2z + 1)/(z^2 - 1.3229z + 0.5)$; K_r 控制稳裕度和误差收敛速度,取值范围为 $0 \sim 1$, z^k 为相位补偿环节,由系统特征方程得出系统稳定条件 $|Q(z) - K_r S(z) P(z)| \leq 1$,经过仿真测试设置 $k = 6$, $K_r = 0.95$ 。

3.3 加权式并联型重复控制

在 PI+重复控制并联型控制中,系统的稳定

性能和控制的精确度主要由重复控制决定;系统的动态性能主要由 PI 控制决定。在稳定的前提下,当系统由于负载突变或者其他变化而引起输出的变化,由于此时 PI 控制的作用较弱,不能立刻产生调节,系统的动态性能较差;同时由于重复控制自身延时控制的本质,会产生一个幅值呈周期衰减的误差信号^[10],这必然会导致 SVG 补偿后的电流发生畸变。

本文采用加权式并联重复控制策略^[16],来均衡 PI 控制和重复控制的作用。在 PI 和重复支路上分别加入加权系数 α 和 β ,其结构如图 8 所示。

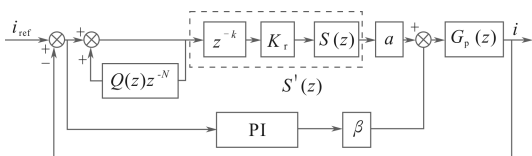


图 8 加权式并联重复控制结构

Fig. 8 Structural diagram of weighted parallel repetitive control

设定权值时需满足 $\alpha + \beta = 1$, 当权值比 β/α 较大时, 会削弱重复控制的作用, 加强 PI 控制的作用。因此在负载突变后, 补偿后电流的畸变也削弱, 并且动态性能也随之提高。但是权值比并非越大越好, 当权值比越大, 系统稳定时的补偿精度也随之较低, 本文在仿真实验中进一步对其进行分析。

设定权值时需满足 $\alpha+\beta=1$,当权值比 β/α 较大时,会削弱重复控制的作用,加强 PI 控制的作用。因此在负载突变后,补偿后电流的畸变也削弱,并且动态性能也随之提高。但是权值比并非越大越好,当权值比越大,系统稳定时的补偿精度也随之较低,本文在仿真实验中进一步对其进行分析。

4 仿真实验分析

为了验证上述分析,在 Matlab/ Simulink 环境下建立 SVG 仿真模型。

仿真模型系统参数设置如下:三相交流电源为 220 V/50 Hz,直流侧电容为 4000 μ F,输出电感为 0.8 mH,线路等效电阻为 0.003 Ω ,开关频率为 25.6 kHz,由三相串联 RL 和三相不控整流桥组成含有谐波的无功负载源,用阶跃信号控制开关使负载发生变化,负载突变前设置有功功率为 25 kW,无功功率为 25 kvar;突变后有功功率

为 15 kW,无功功率为 15 kvar。

SVG 仿真模型结构图如图 9 所示。

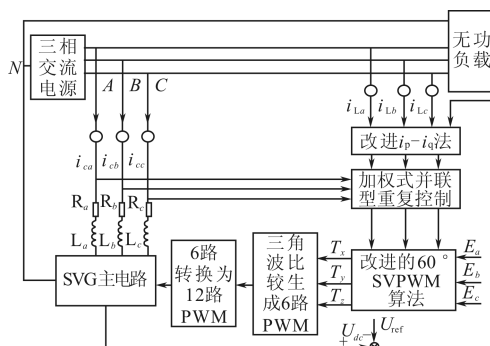


图 9 SVG 仿真模型

Fig. 9 Simulation model of SVG

由图 9 可知,仿真系统采用改进的 $i_p - i_q$ 法^[17]检测无功电流,通过加权值重复控制形成闭环控制,经过改进 60° 坐标系 SVPWM 计算出基本矢量作用时间,最后通过三角波比较生成 6 路 PWM 信号,并且经过 6 路转化成 12 路 PWM 模块生成 12 路 PWM 驱动信号,驱动 IGBT 完成无功电流补偿。

图 10 为 A 相电压和 A 相负载电流的仿真实验波形图,其中,A 相负载电流在 0.105 s 时发生突变。

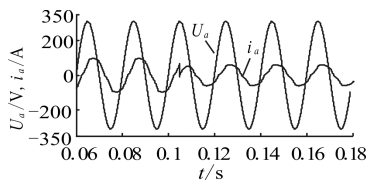


图 10 A 相电压和负载电流

Fig. 10 Voltage and load current of A phase

由于在 PI+重复控制并联型控制中可以体现出单独 PI 和重复控制的控制效果,故不再单独做仿真实验分析。电流跟踪控制策略采用未经加权的 PI+重复控制并联型控制策略。

图 11 为 SVG 分别采用 90° 坐标系 SVPWM、 60° 坐标系 SVPWM 和改进 60° 坐标系 SVPWM 的补偿结果。由图 11 可以看出: SVG 采用 3 种 SVPWM 均可有效补偿无功电流, 证明改进 60° 坐标系 SVPWM 的正确性和有效性。但当负载突变, 补偿后电流波形在每个周期峰值处有明显的畸变。为了消除补偿后电流的畸变, 将电流跟踪控制设置为加权式并联型重复控制。同时调整不同权值比 (β/α) 进行实验分析, 通过实验得出当 $\beta/\alpha=3$ 时补偿效果最佳, 实验结果如图 12 所示。

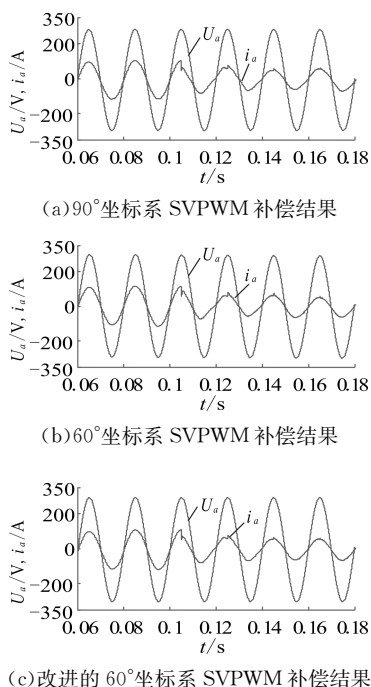


图 11 分别采用 3 种调制方法补偿后的电流波形
Fig. 11 Current waveforms after compensation with three modulation methods

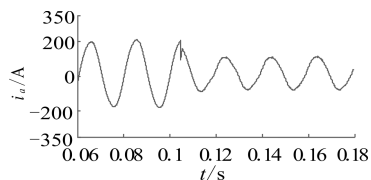


图 12 加权式并联型重复控制补偿后的电流波形
Fig. 12 Current waveform compensated by weighted parallel repetitive control

为了进一步分析权值比对系统补偿控制的影响,设置 11 组不同的权值比进行多次试验,利用 FFT 对负载突变后的电流进行分析,时间为从 0.12 s 开始的 3 个周期,得到不同权值比下补偿后的电流畸变率,经拟合得出畸变率随权值比的变化趋势,结果如图 13 所示。

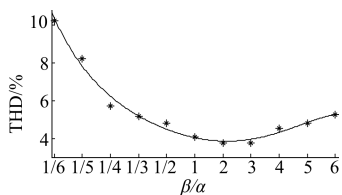


图 13 不同权值比时补偿后电流的畸变率
Fig. 13 THD of compensated current at different weight ratios

由图 13 可以看出,权值比并非越大越好,当 $\beta/\alpha=2\sim3$ 左右时,补偿后电流的 THD 最小;当 β/α 过大时,重复控制作用太弱,系统补偿后的电

流 THD 反而增大。综合上述分析,设置权值比 $\beta/\alpha=3$ 。

5 实验平台设计与结果

实验平台整体结构图如图 14 所示。基于 DSP 完成检测部分设计,利用传感器将各类电压和电流信号进行采集,并经过信号调理电路传输给 DSP,经过 DSP 计算完成无功电流检测,计算出 SVG 电流控制指令,生成 PWM 控制信号,经过光纤隔离电路传输给 IGBT 驱动器,并完成对三电平逆变电路的控制,最终完成无功补偿。

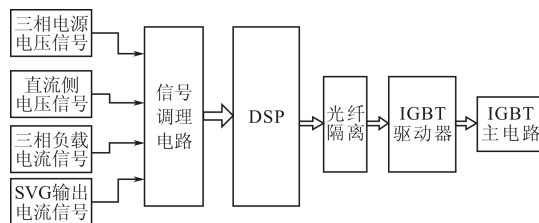


图 14 实验平台整体结构图
Fig. 14 Overall structure diagram of experimental platform

实验负载有功功率约为 5 kW,无功功率约为 4 kvar。

以 A 相为例,补偿前 A 相电压和 A 相负载电流如图 15 所示,补偿后 A 相电压和 A 相电流如图 16 所示。

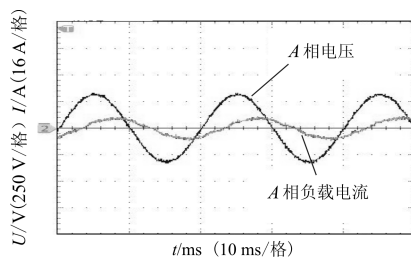


图 15 A 相电压和 A 相负载电流
Fig. 15 Voltage and load current of A phase

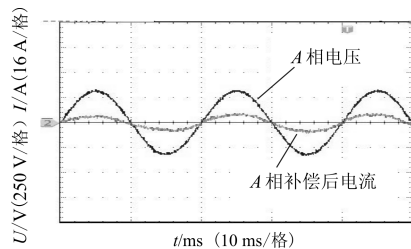


图 16 A 相电压和 A 相补偿后电流
Fig. 16 Voltage and compensated current of A phase

6 结论

通过对三电平 SVG 逆变电路的调制方法以

及电流跟踪控制策略进行研究可得如下结论:

1)改进 60° 坐标系 SVPWM 利用坐标变换及对空间矢量标幺化,减少了大量三角函数运算,通过归一化进一步简化了运算过程,并仿真验证其可行性。

2)仿真分析了加权式并联型重复控制,选择出最佳权值比,在 SVG 系统中负载突变时,能够消除补偿电流的畸变。经过实验验证,采用 60° 坐标系的 SVPWM 和加权式并联型重复控制的 SVG 能够较好地完成无功功率补偿。

参考文献

- [1] 杨昆,谢川,陈国柱. 基于频率自适应谐振控制器的静止无功发生器电流控制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 248—254.
- [2] 关磊,李国丽,张茂松,等. 基于比例控制和改进重复控制的 SVG 系统[J]. 电气传动, 2017, 47(8): 57—62.
- [3] 付文秀,范春菊. SVG 在双馈风力发电系统电压无功控制中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 61—68.
- [4] 邹灿,吴星荣. 基于简化三电平 SVPWM 的 T 型三电平整流器控制研究[J]. 电气传动, 2018, 48(6): 41—45.
- [5] 常鲜戎,殷绕方. 结合空间矢量法的 D-STATCOM 滞环电流控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 60—65.
- [6] 郭三明,孙鹏荆,敬树仁,等. 基于预测模型的 STATCOM 功率控制策略建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 88—92.
- [7] 赵辉,李瑞,王红君,等. 60° 坐标系下三电平逆变器 SVPWM 方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(24): 39—45.
- [8] 郑世芳,黄前华,钱玮,等. 60° 转 360° 电压空间的 SVPWM 软件算法[J]. 现代电子技术, 2012, 35(22): 185—188.
- [9] 杨昆,陈国柱. 基于重复控制的 DSTATCOM 补偿电流控制[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(10): 80—85.
- [10] 张兴,汪杨俊,余畅舟,等. 采用 PI+重复控制的并网逆变器控制耦合机理及其抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5287—5295.
- [11] 鄢志平,何英杰,李毅,等. 三电平四桥臂 SVG 三电流滞环控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(20): 5575—5583, 5734.
- [12] 蔡慧,卢昭禹. I 型 NPC 式三电平变流器的 SVPWM 算法研究[J]. 电力电子技术, 2016, 50(9): 1—3.
- [13] 陈晓鸥,许春雨,王枫明. 60° 坐标系下三电平逆变器 SVPWM 控制策略研究[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(2): 43—49.
- [14] 杨昆,陈磊,陈国柱. 单相 SVG 高性能补偿电流控制技术[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(2): 339—344.
- [15] 郑诗程,徐礼萍,郎佳红,等. 基于重复 PI 控制和前馈控制的静止无功发生器[J]. 电工技术学报, 2016, 31(6): 219—225.
- [16] 王禹玺,刘秦维,刘伟,等. 一种加权式并联型重复控制的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 127—134.
- [17] 何英杰,刘进军,王兆安,等. 一种基于瞬时无功功率理论的数字谐波检测[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 185—192.

收稿日期:2019-04-10

修改稿日期:2019-06-25