

文章编号:1674-2869(2011)04-0073-04

SHEPWM 实现方法及其在 D-STATCOM 中的应用

刘义亭¹,文小玲¹,夏亦冰²,王 欣¹,陈孜卓¹,孙 谋¹,黄文慧¹

(1. 武汉大学电气信息学院,湖北 武汉 430074;2. 武汉纺织大学机电工程学院,湖北 武汉 430074)

摘 要:特定谐波消除 SHEPWM 具有通过开关时刻的优化选择消除选定频次谐波的特点. 本文采用了一种较为精确 SHEPWM 开关角初始值的计算方法,将计算出的结果作为 MATLAB 函数 fsolve 的迭代初值求出 a 相控制脉冲的开关角,并根据三相对称的特点获得 b、c 相控制脉冲的开关角. 在 MATLAB/ SIMULINK 中建立 SHEPWM 仿真模型,并将其应用于直接电压控制的配电网静止同步补偿器(D-STATCOM)系统中. 结果表明,该系统既能较好地维持 D-STATCOM 接入电网公共连接点电压的稳定又能有效消除逆变器输出电压的低次谐波含量.

关键词:特定谐波消除脉宽调制;配电网静止同步补偿器;直接电压控制

中图分类号:TM343 **文献标识码:**A **doi:**10. 3969/j. issn. 1674-2869. 2011. 04. 019

0 引 言

特定谐波消除脉宽调制(SHEPWM)技术由美国密苏里大学的 H. S. Petel 和 R. G. Hoft 于 1973 年提出^[1]. SHEPWM 通过开关时刻的优化选择在消除选定的低次谐波的同时还具有以下显著的优点^[2]:开关频率相同时,可以产生最优的输出电压波形;改善波形质量、减小直流侧电流纹波;波形质量相同时,可以得到最低的开关频率,降低开关损耗,提高转换效率;可以通过调制得到较高的基波电压幅值等. 本文对 SHEPWM 的原理进行了详细的分析,采用了较为精确的开关角初始值计算方法,将计算出的初始值作为 MATLAB 函数 fsolve 的迭代初值求出 a 相控制脉冲的开关角,并根据三相对称的特点获得 b、c 相控制脉冲. 最后在 MATLAB/SIMULINK 中建立 SHEPWM 仿真模型,并将其应用于直接电压控制的 D-STATCOM 系统中,以稳定 D-STATCOM 接入电网公共连接点处的电压.

1 D-STATCOM 直接电压控制系统组成原理

D-STATCOM 作为配电网中“用户电力”的重要设备,可以在电网连接点处提供快速的电压和无功调节,既能改善配电网供电质量,提高线路的功率因数、减少线损,又可保护电网不受谐波、电

压闪变和电压不对称之类的污染^[3-4]. 其接入电网的等效电路如图 1 所示,其中配电系统采用戴维南等效电路表示^[5].

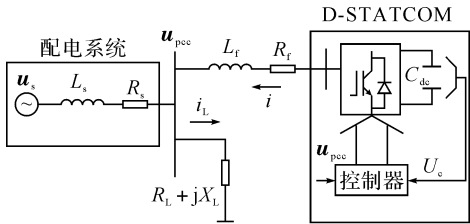


图 1 D-STATCOM 接入系统的等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of D-STATCOM

设三相电网电压对称,选择同步旋转坐标系的 d 轴与公共连接点(PCC)电压矢量 u_{pcc} 重合,并设电压矢量的模为 u ,在两相同步旋转坐标中,根据瞬时功率平衡原理^[5],可推导出下式:

$$e_d = R_f i_d - \omega L_f i_q + u \tag{1}$$

$$e_q = R_f i_q + \omega L_f i_d \tag{2}$$

式(1)、(2)实现了在 dq0 坐标系中电流 i_d 、 i_q 到 e_d 、 e_q 的转换. 如果以 i_d 、 i_q 作为指令电流,那么 e_d 、 e_q 就是要输出的指令电压. 且将 e_d 和 e_q 作为调制信号产生 SHEPWM 驱动信号.

2 SHEPWM 数学模型

如图 2 所示为两电平三相桥式逆变电路 a 相电压波形. 为了消除偶次谐波,应使电压波形在 $[0, 2\pi]$ 内以 π 为点对点对称,即镜对称;为了消除谐波中的

收稿日期:2010-09-29
作者简介:刘义亭(1985-),男,湖北襄樊人,硕士研究生. 研究方向:自动控制与电力电子应用技术.
指导教师:文小玲,女,教授,硕士,硕士研究生指导教师. 研究方向:自动控制与电力电子应用.

余弦项,简化计算,应使电压波形在 $[0,\pi]$ 内,以 $\frac{2}{\pi}$ 成轴对称^[6].图 2 的波形是 1/4 周期对称的,能够独立控制的有 α_1 至 α_{11} 共 11 个开关角的时刻.将图 2 所示电压波形进行傅里叶级数分解可得

$$u(\omega t)=\sum_{n=1,3,5\cdots}^{\infty}a_n\sin n\omega t \tag{3}$$

式(3)中

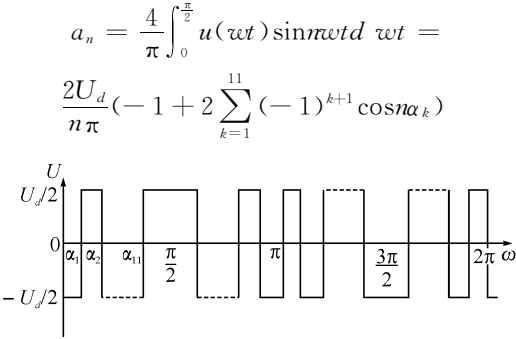


图 2 a 相电压波形

Fig. 2 The voltage waveform of phase a

通常在三相对称电路的线电压中,线电压所含的 3 的整数倍次谐波相互抵消,因此只需考虑消除 5、7、11 次等谐波.在本文中需要消除 5,7,11,13,17,19,23,25,29,31 次谐波,所以根据需要首先确定基波分量的幅值 a_1 ,再令 a_2 至 a_{11} 等于 0,就可按式(4)建立 11 个方程,并联立求解得 a_1 至 a_{11} .

$$\begin{cases} \frac{2a_1}{U_d}=\frac{4}{\pi}\left[1+2\sum_{i=1}^N(-1)^{i+1}\cos(\alpha_i)\right]=M \\ a_k=\frac{2U_d}{k\pi}\left[1+2\sum_{i=1}^N(-1)^{i+1}\cos(k\alpha_i)\right]=0 \end{cases} \tag{4}$$

式(4)中, $k=6n\pm 1(n=1,2,\cdots)$ 为谐波次数, α_i 为 1/4 周期内的第 i 个开关角, M 为基波电压与直流侧电压之比. N 为消除谐波的个数加 1.

3 SHEPWM 的实现方法

开关角的初值确定、开关角的计算和三相脉冲的产生是 SHEPWM 的设计难点.采用文献[7]中提出的初值计算方法.计算公式为

$$\begin{cases} \alpha_1=60/(N+1) \\ \alpha_j=\alpha_{j-1}+k_1\times 120/(N+1) \\ \alpha_{j+1}=\alpha_j+k_2\times 120/(N+1) \end{cases} \tag{5}$$

式(5)中, $j=2,4,6,\cdots,N-1,N$ 为奇数,且为开关角的个数; k_1,k_2 为间距系数; $k_1>k_2$ 且 $k_1+k_2=1$.

$$\begin{cases} k_1=\lceil 100+(N+t)\rceil/200 \\ k_2=\lceil 100-(N+t)\rceil/200 \end{cases} \tag{6}$$

$$t=\begin{cases} 5 & N<30 \\ 0 & 30\leq N<80 \\ -N+20 & 80\leq N \end{cases} \tag{7}$$

开关角的实现步骤为:将 M 从 0 到 1.2 每 0.05 为一段,每段取段首的值为该段值;将每段的 M 写入方程(4)中,并用 MATLAB 的 fsolve 指令求出不同 M 对应的开关角;将求出的开关角用分段的方式存储在 SIMULINK 的 Embedded MATLAB Editor 模块中.

用上述方法求出 a 相 PWM 控制脉冲后,根据三相对称原则即可求出 b、c 相 PWM 控制脉冲.图 3 所示为基于 MATLAB/SIMULINK 的 SHEPWM

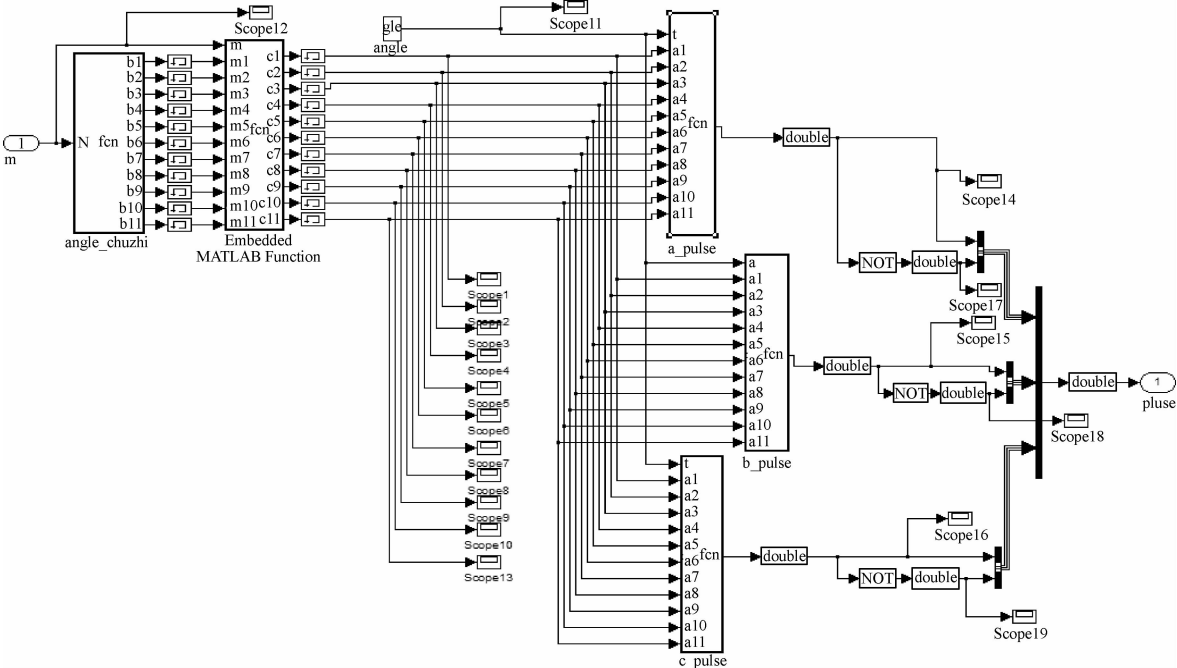


图 3 SHEPWM 仿真模型

Fig. 3 The simulation model of SHEPWM

仿真模型. 由此模型可获得三相两电平逆变器的 6 路 PWM 控制脉冲信号. 当 $N=11$ 、 $M=0.80$ 时的逆变器

输出线电压波形及其频谱分析如图 4 所示. 结果表明除 5 次谐波与基波的幅值相比接近 0.8%, 其它次数的谐波幅值与基波的幅值比均接近于零, 总谐波含量为 1.22%. 谐波的消除效果较为理想.

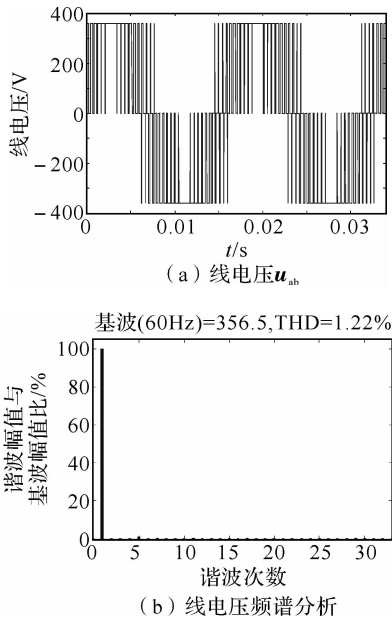


图 4 $N=11$ 、 $M=0.8$ 时的逆变器输出电压波形
Fig. 4 The output voltage of the inverter when N is 11 and M is 0.8

4 SHEPWM 应用实例及对比分析

为了研究 SHEPWM 的效果, 采用文献[8]中的仿真参数, 负载在 0.5s 时由感性负载变为容性负载. 将正弦波脉宽调制 (SPWM) 和 SHEPWM 应用于直接电压控制的 D-STATCOM 系统中, 得到的部分仿真结果如图 5 和图 6 所示. 图 5(a) 和 (b) 分别为采用 SHEPWM 和 SPWM 方法时 D-STATCOM 系统的公共连接点电压波形; 图 6(a) 和 (b) 分别为采用 SPWM 和 SHEPWM 方式时 D-STATCOM 的直流侧电压波形. 从图 5 可以看出在 0.5 s 时, 公共点电压发生变化, 经 0.05s 调节后电压基本保持不变, 但采用 SHEPWM 方法时公共连接点电压更稳定. 从图 6 可以看出, 采用 SHEPWM 方法时, 直流侧电压能始终在 270 V 上下波动, 容性负载时的波动幅度较感性负载时小得多; 采用 SPWM 方法时, 负载变动时, 直流侧电压基本在 360 V 上下波动.

由图 5 和图 6 比较可知, 运用 SPWM 和 SHEPWM, D-STATCOM 系统直流侧电容电压

和公共点电压都可以维持恒定. 但运用 SHEPWM 脉冲发生器时, 公共点电压更稳定.

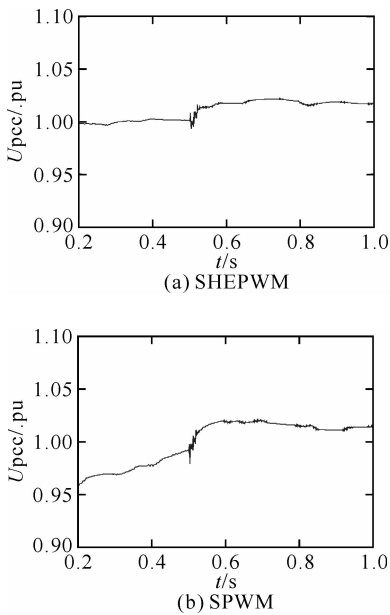


图 5 D-STATCOM 的公共连接点电压波形
Fig. 5 PCC (point of common coupling) bus voltage of the D-STATCOM

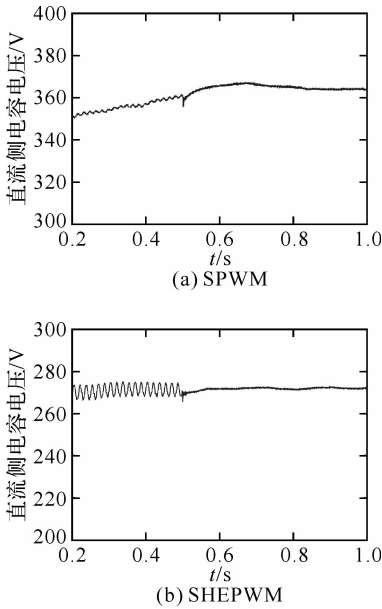


图 6 D-STATCOM 的直流侧电压波形
Fig. 6 DC-link voltage of the D-STATCOM

图 7(a) 和 (b) 分别为采用 SHEPWM 和 SPWM 脉冲产生方法时, D-STATCOM 交流侧输出线电压的谐波频谱. 由图 7(a) 可见, 当采用 SHEPWM 方法时, D-STATCOM 输出线电压基本没有 31 次以内的谐波 (包括 31 次谐波), 50 次以内谐波含量为 35.09%; 当采用 SPWM 方法时, 50 次以内的谐波含量为 43.61%; 因此, 从 D-STATCOM 输出线电压谐波性能看, SHEPWM 比 SPWM 好.

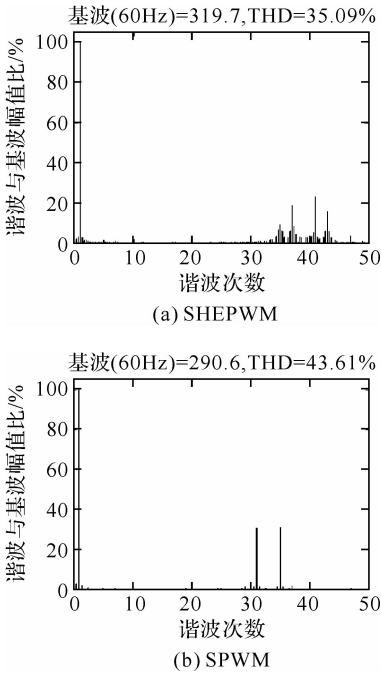


图 7 D-STATCOM 逆变器输出线电压谐波频谱

Fig. 7 Phase-to phase voltage harmonic spectrum of the D-STATCOM

5 结 语

上述设计的 SHEPWM 具有响应速度快、残余谐波含量少、电压利用率高等优点。将设计的 SHEPWM 模型应用于直接电压控制 D-STATCOM 系统中,仿真结果表明整个系统能够较好地维持公共连接点电压和直流侧电容电压的恒定。当系统负载发生变化时能够较快速地做出

响应。因此本文设计的 SHEPWM 为特定谐波消除技术在实际 STATCOM 等电力电子系统中的应用提供了一定的参考价值。

参考文献:

[1] 张文义,杨乐民,佟为明,等. 特定消谐波变频器的研究[J]. 电力电子技术,2002,36(4):53-55.
[2] 张艳莉,费万民,吕征宇,等. 三电平逆变器 SHEPWM 方法及其应用研究[J]. 电工技术学报,2004,19(1):16-20.
[3] 崔士杰,汪建华. 基于 MATLAB 的单相全控整流电路功率因数测定[J]. 武汉工程大学学报,2010,32(1):90-93.
[4] 文小玲,尹项根. 三电平 STATCOM 的建模和仿真分析[J]. 武汉工程大学学报,2008,30(1):87-90.
[5] 唐杰,罗安,盘宏斌,等. 基于瞬时功率平衡和负序前馈控制的 DSTATCOM 电压控制策略方法[J]. 高压电器,2008,44(5):392-394.
[6] 王兆安,黄俊. 电力电子技术[M]. 北京:机械工业出版社,2007:154-155.
[7] 刘磊,魏玲,翟庆志. 特定消谐波技术开关角计算方法的研究[J]. 电气应用,2007,26(6):55-58.
[8] Woei-luen Chen, Yuan-Yih Hsu. Direct Output Voltage Control of a Static Synchronus Compensator Using Current Sensorless d-q Vector-Based Power Balancing Scheme [C]//Transmission and Distribution Conference and Exposition. IEEE, Koyu,2003:545-549.

Research on implementation method and application to D-STATCOM of SHEPWM

LIU Yi-ting¹, WEN Xiao-ling¹, XIA Yi-bing², WANG Xin¹, CHEN Zi-zhuo¹, SUN Mou¹, HUANG Wen-hui¹

(1. School of Electrical and Information, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;
2. Electromechanical Engineering College, Wuhan Textile University, Wuhan 430074, China)

Abstract: SHEPWM has the advantage of eliminating the selective harmonics by optimizing switching time sequence. In this paper, an accurate method is used to calculate the initiate value of switching angles. At first, switching angle values of the phase a are obtained by use of MATLAB function ‘fsolve’. Then, switching angle values of the phase b and c can be got according to the characteristic of three-phase symmetry. At last, the SHEPWM simulation model based on MATLAB/SIMULINK is established and applied to the direct voltage control D-STATCOM system. Simulation results show that the system can not only stabilize the voltage at the PCC (point of common coupling) bus but also effectively eliminate the selective low harmonics of the inverter’s output voltage.

Key words: SHEPWM; D-STATCOM; direct voltage control

本文编辑:陈小平