

三电平光伏并网逆变器共模电压 SVPWM 抑制策略研究

An Optimization SVPWM Method for Restraining the Common-Mode Voltage in a Photovoltaic Grid-connected Three-level Inverter

罗北¹ 和军平¹ 彭志辉¹ 吴学智²

1. 哈尔滨工业大学深圳研究生院 (深圳 518055)

2. 西门子中国研究院 (北京 100102)

Luo Bei¹, He Junping¹, Peng Zhihui¹, Wu Xuezhi²

1. Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, (Shenzhen, 518055, China)

2. Siemens Corporate Technology, (Beijing, 100102, China)

摘要: 本文提出了一种优化空间矢量脉宽调制方法来抑制光伏并网逆变器中产生的共模电压。在分析共模电压产生机理的基础上,对通常 SVPWM 调制技术进行改进,调整了有效矢量的选择范围,并对开关次序进行优化。该空间矢量合成算法克服了 SPWM 调制存在的母线电压利用率低,线性调制区小的问题。仿真结果表明,该算法可以将共模电压幅值抑制到普通 SVPWM 算法的 1/2,具有良好的有效性和实用性。

关键词: 三电平逆变器 二极管中点箝位式 共模电压 SVPWM

Abstract: In this paper, an optimization SVPWM method is used to restrain the common-mode voltage generated in grid-connected PV inverters. Based on the analysis of the generated mechanism of the common-mode voltage, the normal SVPWM modulation technology is improved by adjusting the range of choose effective vector and optimizing the switching order. The simulation results show this algorithm can suppress common-mode voltage amplitude low to 1/2 of the general SVPWM algorithm.

Key words: Three-level inverter, NPC, Common mode voltage, SVPWM

[中图分类号] T M464 [文献标识码] A 文章编号: 1561-0349 (2010) 06-0021-05

1 引言

目前,多电平变流器以其突出的优点在高压大功率变流器中得到了日益广泛的应用,它不仅能减少输出波形的谐波,也易于进行模块化设计^[1,2]。二极管中点箝位式(NPC)三电平拓扑结构即是高压大功率变流器的主流拓扑结构之一^[3]。然

而在三电平变流器的应用中,也出现了一些问题,特别是共模电压问题。目前,变频器共模电压的抑制方法主要有两种:一是外加无源滤波器等,或有源滤波器^[4-6],这类方法会导致体积和成本显著增加,且不易应用于高压大容量场合;二是通过控制策略从源头减小共模电压,文献[7]、[8]提出一种

SPWM 消除共模电压的调制方法。该方式是通过异相调制来消除开关共模电压,但是存在直流电压利用率低、线性调制区过小的问题。

针对 SPWM 调制的电压利用率低、不利于运用于各种调制比工况下的缺点,本文从三电平逆变器共模电压形成机理出发,提出了一种基于优化电压空间矢量(SVPWM)方法,可有效抑制三电平逆变器输出共模电压。并通过 Matlab/Simulink 软件对该方法进行了仿真验证,结果表明效果良好。

2 光伏三电平逆变器及其共模电压

本文研究了三电平光伏逆变器系统如图 1 所示。其输入为光伏阵列的直流电压,逆变器主拓扑为 NPC 三电平结构。设直流母线电压的幅值为 V_{dc} ,用开关状态字“1”,“0”和“-1”分别表示逆变器每相输出为 $+V_{dc}/2$ 、0 和 $-V_{dc}/2$ 的三种状态,则三相三电平逆变器总共有 27 种不同的开关状态。根据幅值和相位可以画出三电平逆变器的电压空间矢量图,具体如图 2 所示。

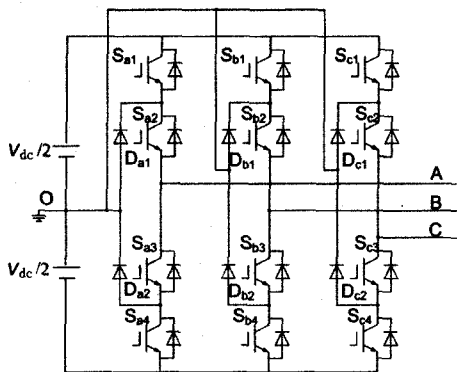


图 1 NPC 三电平逆变器结构

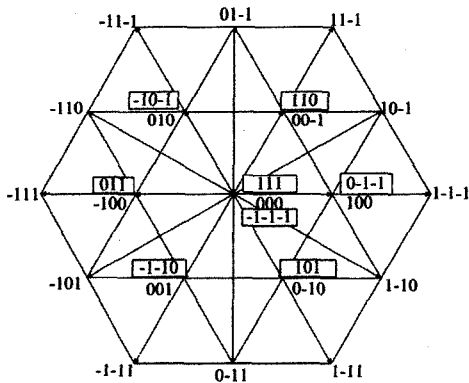


图 2 NPC 三电平矢量图

对于三电平逆变器而言,必须保证输出电压的基波分量幅值与输出频率成一定的正比关系变化,其共模电压的计算与它们的触发方式有关。设 U_a 、 U_b 、 U_c 分别为逆变器的三相相电压。根据三相三线制的对称性原理,推得三相输出电压波形的共模

电压为:

$$U_{CM} = (U_a + U_b + U_c) / 3 \quad (1)$$

因而,对应三相三电平每一种开关序列的共模电压大小如表 1 所示。

表 1 输出控制字与共模电压的关系

	三电平逆变器开关状态	U_{CM}
A	111	$+V_{dc}/2$
B	110,101,011	$+V_{dc}/3$
C	1-11,11-1,-111,001,010,100	$+V_{dc}/6$
D	000,10-1,1-10,01-1,0-11,-110,-101	0
E	-11-1,-1-11,1-1-1,0-10,00-1,-100	$-V_{dc}/6$
F	0-1-1,-10-1,-1-10	$-V_{dc}/3$
G	-1-1-1	$-V_{dc}/2$

通常的空间矢量调制策略都会使用图 2 中所记载的 19 种有效矢量,以达到直流母线电压利用率高,输出谐波小。但是会带来较大的输出共模电压,最高 V_{CM} 幅值会达到了 $V_{dc}/3$ 。图 3 显示的是母线电压 $V_{dc} = 600V$ 时,一种普通 SVPWM 产生的共模电压最大幅度达到了 200V,这样大的共模电压会对系统造成很大的不利影响。

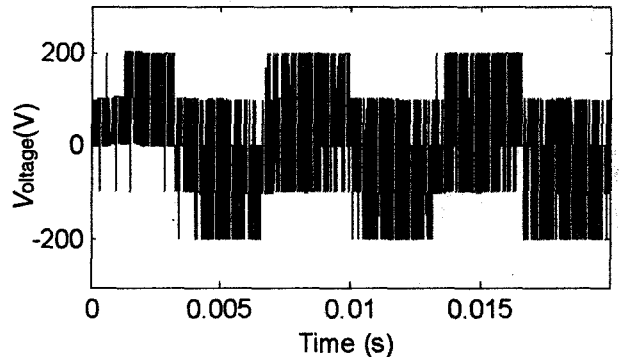


图 3 普通 SVPWM 下共模电压波形

3 抑制共模电压 SVPWM 原理

从表 1 中的 27 种状态可以看出,对于可控的 PWM 输出波来讲,其输出共模电压的幅值在 $0V_{dc} \sim V_{dc}/2$ 之间变化。欲减小共模电压,应尽量不使 3 个输出端与同一“+”极性端或“-”极性端连接,避免 2 个端子一起接到“+”极性端或“-”极性端,而另一个端子接到直流中性点,如使用表中 D 类的 7 个状态字,此时逆变器的输出共模电压为 0,但不能只选用 D 类矢量,因为那样虽能很好的抑制共模干扰,但却因为少的合成矢量会造成参考电压过渡不平滑,使得逆变器输出线间电压波形变差,因此需要均衡考虑共模差模问题。本文所研究的 SVPWM 算法中,就是选择合理输出共模电压较小的矢量来合成参考电压矢量。由表 1 可见(111,-1-1-1),(110,101,011,0-1-1,-10-1,-1-10)八个开关状态造成了很大的共模干扰,因此,本研究就避开这八个开关状态(即图 2 中方框中的矢量),这

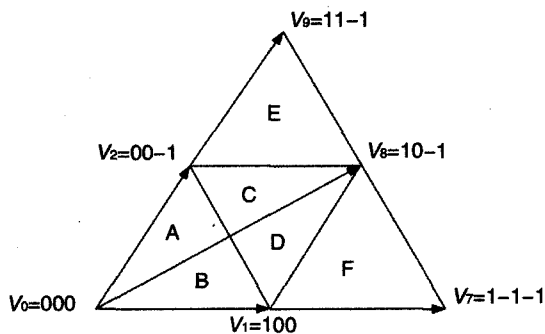


图4 I扇区矢量图

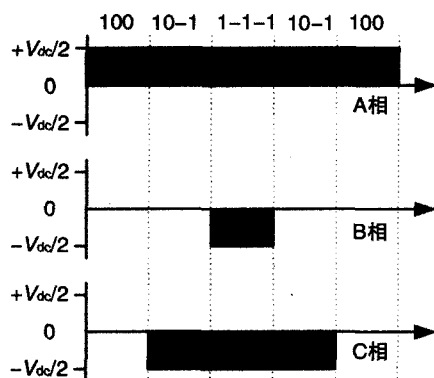


图5 输出矢量时序

样就能从源头上降低逆变器的共模输出电压。

本文具体采用CDE三类矢量，这样，理论上即可以把逆变器输出共模电压幅值降为 $V_{dc}/6$ 。然而可用矢量的减少使得无法采用传统的七段式脉冲触发序列，因

此，本策略采用五段式脉冲触发序列。

基于以上分析，可依据下列步骤实现SVPWM算法：

- ① 确定当前矢量的幅值和角度；
- ② 判断参考矢量所处的扇区及区域；
- ③ 确定构成该矢量的实际开关矢量；
- ④ 确定开关矢量的作用时间及工作顺序。

具体矢量计算方法见文献[3]，本文以图4 I扇区F区为例，在F区中各矢量持续时间为：

$$\begin{cases} t_a = 2T_s - KT_s \sin(\frac{\pi}{3} + \theta) \\ t_b = 2KT_s \sin \theta \\ t_c = 2KT_s \sin(\frac{\pi}{3} - \theta) - T_s \end{cases} \quad (2)$$

式2中： t_a 、 t_b 、 t_c 分别表示矢量 V_1 、 V_6 、 V_7 在一个PWM周期内的持续时间； $K = 4\sqrt{3}/3A$ ； A 为输出电压调制比； T_s 为开关周期。开关变换次序为(100, 10-1, 1-1-1, 10-1, 100)，考虑共模电压抑制后的输出矢量时序如图5所示。对于该扇区的其它小三角形，按照以上过程，确定矢量作用顺序，计算三角形顶点开关矢量作用时间。同理，可以计算出其他扇区内各三角形顶点开关矢量作用时间。

4 仿真验证和分析

根据三电平NPC逆变器数学模型和控制策略，验证本文提出的三电平空间矢量调制算法及其共模电压抑制策略的有效性，针对三相电网负载进行了仿真研究，使用的是

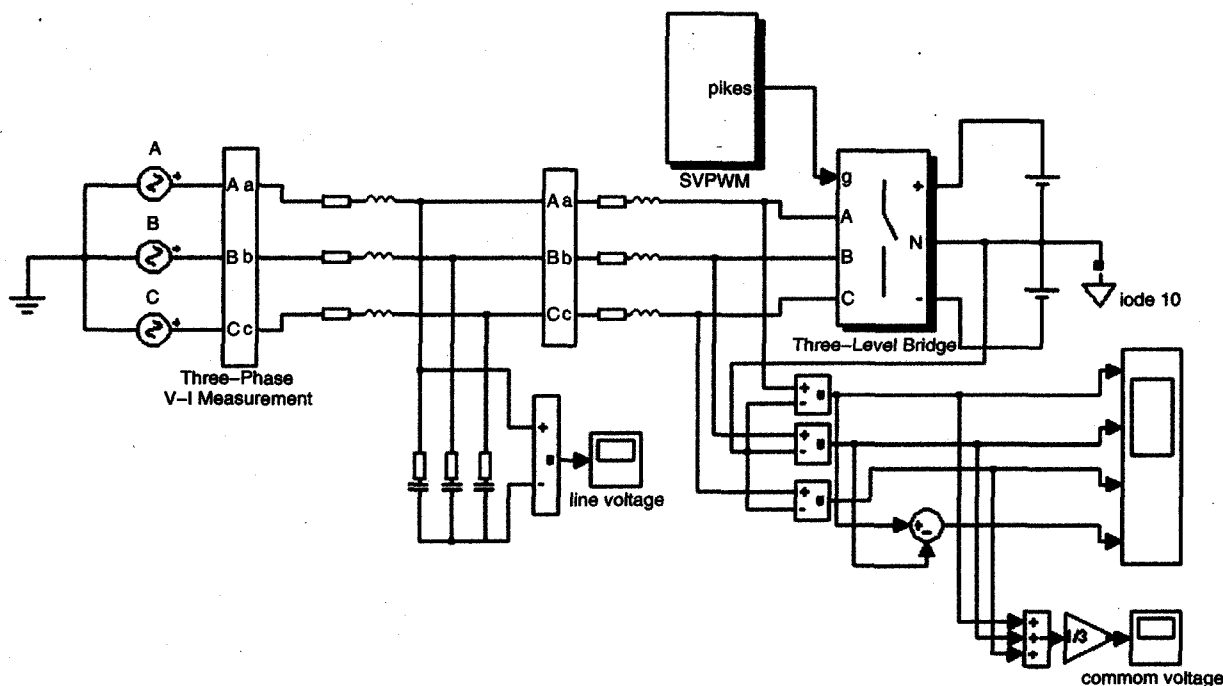
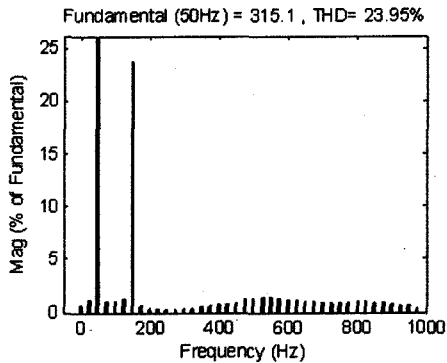
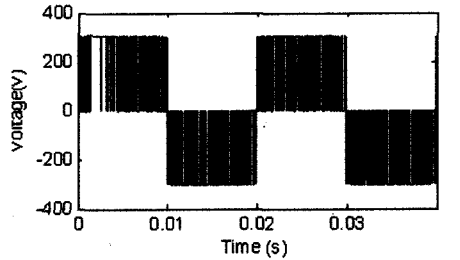


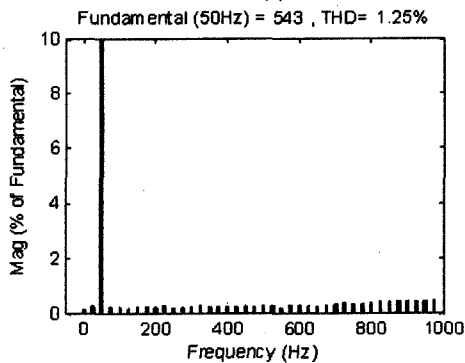
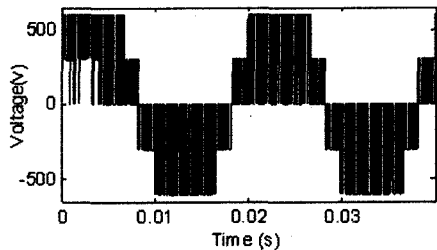
图6 NPC三电平仿真模型

MATLAB7.0。以 Simulink 为平台，SimPower System 工具箱为辅助。考虑到用最短的时间得到结论，模块中的控制算法用基于解释的 S 文件实现。

三电平五段法在每个采样周期内有一相开关不动作，比三电平七段法减少了每个采样周期内开关次数，从而减小了开关损耗，提高了效率。由于在一个开关周期内开关次数减少了，逆变输出电压（电流）的 THD 有所增大，这就对控制器参数和输出滤波器的设计有了更高的要求。



(a)



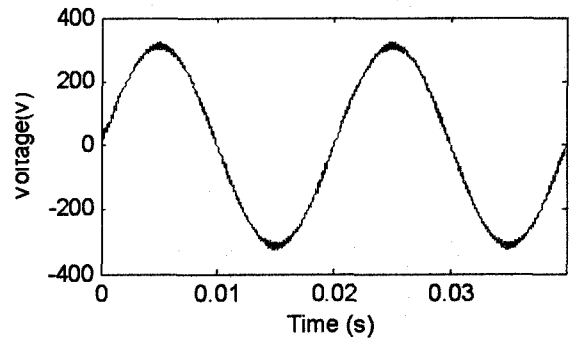
(b)

图 7 该 SVPWM 控制下的线电压、相电压波形:

(a) 输出相电压; (b) 输出线电压

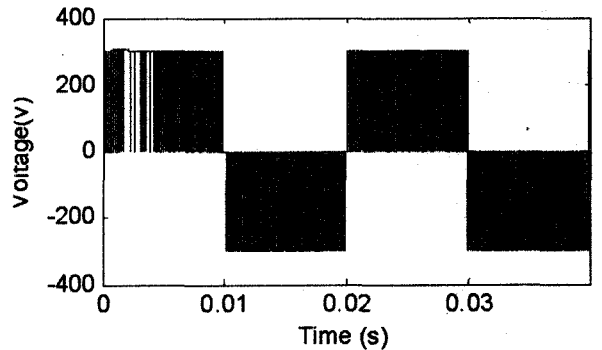
图 6 为 NPC 三电平逆变器的总体结构框图，其中 Three-level Bridge 为 NPC 逆变器主拓扑，Three-phase V-I Measurement 为主测量模块，SVPWM 模块负责产生 PWM 波。

仿真参数和试验波形如下：电网参数： $E_m=200V$ ， $f=50Hz$ ；滤波电感： $L_s=1.28mH$ 。直流母线电压 $V_{dc}=600v$ 。开关频率 $f_s=10kHz$ ，采样频率 $f_N=10kHz$ 。图 7 至图 10 为仿真试验结果波形图。对三相输出的相电压和线电压的频谱进行分析，线电压的 THD 为 1.25%，经输出电感滤波后得到正弦波幅值为 311.4V，THD 下降到 0.27%，如图 8 所示。相电压的 THD 为 23.96%，主要表现为 3 次谐波，与普通 SVPWM/ 控制策略下输出相电压 (图 9) 相比较可知，谐波含量还略有下降。



Fundamental (50Hz) = 311.4, THD= 0.27%

图 8 滤波后线电压波形



Fundamental (50Hz) = 315.1, THD= 26.10%

图 9 普通 SVPWM 输出相电压波形

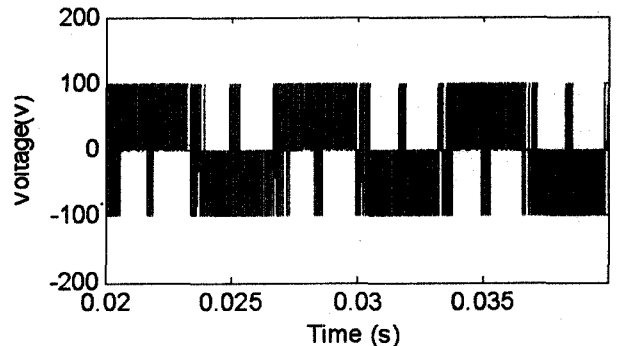


图 10 输出共模电压波形

图 10 为采用优化 SVPWM 算法后的共模电压仿真波形。从图中可以明显看出, 该方法可将共模电压完全抑制到直流电压的 1/6, 为 100V。

5 结束语

本文提出了一种简略矢量选择的 SVPWM 方法, 通过特定的矢量合成算法, 将共模电压抑制到其直流母线电压的 1/6。分析和仿真表明, 该方法可以将共模电压幅值抑制到普通 SVPWM 算法的 1/2, 即 $V_{dc}/6$, 克服了目前一些 SPWM 方法的缺陷。此外, 本方法用软件实现, 无需增加硬件成本, 不仅对其它领域三电平逆变器控制设计有良好参考意义, 也具有广阔的应用价值。

附注

本课题为: 国家自然科学基金项目 (No.50877015), 高等学校博士点基金新教师项目 (No. 200802131017)

参考文献

[1] S Eicher, S Bernet. The 10kV IGBT-a New Device for Medium Voltage Drives' [A]. IEEE Industry Applications Conf. on[C]. 2000: 2859-2865.
 [2] S Malik, D Kluge. ACS 1000W First Standard AC Drive

(上接第 29 页)

电流, 并通过仿真实验对该控制算法进行了验证。

参考文献

[1] H.A. Toliyat. Analysis and Simulation of Five-Phase Variable Speed Induction Motor Drives under Asymmetrical Connections [J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 1998, 7(4): 748-756.
 [2] H.A. Toliyat, L.Y. Xue, T.A. Lipo. A Five Phase Reluctance Motor with High Specific Torque [J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1992, 6(3): 659-667.
 [3] H.A. Toliyat, S. Waikar, T.A. Lipo, Analysis and Simulation of Five Phase Synchronous Reluctance Machines Including

(上接第 47 页)

Generator with Concentrated Coils. Excerpt from the Proceedings of the 2006 Nordic COMSOL Conference.

附注

for Medium Voltage Applications[J]. ABB Review, 1998, (2):4~11.

[3] 刘文华, 宋强. 基于三电平中点箝位逆变器的高压变频调速器 (Medium voltage drives based on three-level neutral point clamped inverter) [J] 清华大学学报 (J Tsinghua Univ.) , 2003, 43(3): 3572360
 [4] Ma H F, Xu D G, Chen X Y, et al. A novel common-mode sinusoidal inverter output filter with variable inductor[C]. Power Conversion Conference, Osaka, Japan, 2002
 [5] 陈希有, 颜斌, 徐殿国, 等. 变频器输出滤波器的模糊优化设计 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 134-138.
 [6] Jiang Yanshu, Xu Dianguo, Chen Xiyong. A novel feed-forward-type active filter to eliminate shaft voltage and bearing current at motor terminal in a PWM inverter drives [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 134-138
 [7] 钟玉林, 赵争鸣, 张永昌. SHEPWM 对三电平 NPC 变频器共模电压的抑制作用 [J]. 变流技术和电力牵引, 2007,5: 28-33
 [8] 程冰, 陈明惠, 汤钰鹏. 三电平逆变器中共模电压抑制方法的研究与仿真 [J]. 通信电源技术, 2007, Vol(24):55-58

Third Harmonic of Air-Gap MMF [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, 4(2): 332-339.

[4] Sanmin Wei A General SVPWM Control Algorithm for Multilevel Inverters[J]. IEEE, 2003, (3):24~30.

作者简介

宋庆国, 男, 1977 年 10 月生, 讲师, 主要研究方向为电力电子。

朱忠尼, 男, 1957 年 2 月生, 教授, 主要研究方向为电力电子。

原文题目: Proposal of a custom-made Small wind generator varying a coil connection .

作者: 高桥俊竹, Akihiro Takeda, 安田 杨, 大本亲吾。刊于“太阳能”(日刊) vol.134 2008.No1