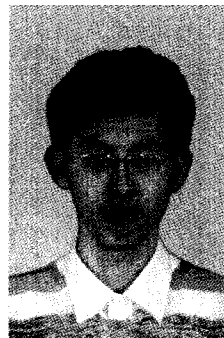


级联型多电平逆变器的优化 脉冲宽度调制控制策略*

张航辉, 郑宏, 朱保华, 陈灵奎
(江苏大学电气信息工程学院, 江苏镇江 212013)



张航辉(1986—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化。

摘要: 基于传统分析消谐波脉冲宽度调制 PWM 法 (Subharmonic PWM, SHP-WM), 提出了一种适用于三相级联多电平逆变器的改进型调制方法, 即载波重叠开关频率优化 PWM 法 (CO-SFO-PWM)。新型 PWM 方法兼具载波重叠法和开关频率优化法的优点, 可以增大输出线电压的基波幅值, 提高直流电源电压利用率, 改善输出线电压谐波性能, 特别是在低调制下可明显减少输出线电压畸变率。以三相级联型 7 电平逆变器为例, 通过 Matlab 进行仿真验证, 有效地验证了 CO-SFO-PWM 调制方法的正确性。

关键词: 级联型逆变器; 多电平; 谐波特性; 电压利用率

中图分类号: TM 464 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-5531(2010)24-0032-03

Improved Pulse Width Modulation Control Strategy for Cascade Multilevel Inverter

ZHANG Hanghui, ZHENG Hong, ZHU Baohua, CHEN Lingkui

(College of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhengjiang 212013, China)

Abstract: Based on traditional SHPWM method, an improved modulation method applying to three-phase cascade multilevel inverter system was proposed. The new method was called carrier overlapping switch frequency optional pulse width modulation (CO-SFO-PWM), which combined the advantages of CO-PWM and SFO-PWM. The fundamental amplitude of the output line voltage was increased, so the utilization ratio of DC voltage was increased, the output line voltage had a better harmonic characteristics, especially could significantly improve the distortion ratio of output line voltage at low modulation. Matlab simulation results based on three-phase seven-level inverter demonstrated the effectiveness of the new method.

Key words: cascade inverter; multilevel; harmonic characteristics; utilization ratio of voltage

0 引言

多电平逆变器由于输出容量大, 输出电压、电流谐波含量小等优点, 适用于高电压场合, 在电力系统无功补偿、高压直流输电 (High Voltage Direct Current, HVDC)、高压大电动机变频调速、交流柔性供电系统 (Flexible Alternating Current Transmission Systems, FACTS) 等应用领域中得到了广泛的关注, 成为电力电子领域学者研究的热点^[1]。

目前, 有 3 种基本的多电平逆变器拓扑结构^[2]: 二极管箝位型 NPC、飞跨电容型 FLC、级联型 MMC。PWM 控制技术^[3-4]是多电平变换器研究中一个关键技术, 对多电平变换器的电压输出波形质量、系统损耗的减少和效率的提高都有直接的影响。本文以三相级联型逆变拓扑结构实现 7 电平相电压、13 电平线电压输出为例, 进行仿真研究, 在分析传统 SHPWM (Subharmonic PWM) 调制方法和特点的基础上, 提出了一种优化的 PWM

郑宏(1965—), 男, 教授, 研究方向为大功率电力电子变换器、FACTS 技术、分布式发电等。

朱保华(1984—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量分析。

* 基金项目: 江苏省科技攻关计划项目 (BE2007069); 江苏省研究生培养创新工程项目 (CH07B-102z)

调制方法,即载波重叠——开关优化脉宽调制 (Carrier Overlapping-Switch Frequency Optional-Pulse Width Modulation, CO-SFO-PWM)。最后,通过 Matlab/Simulink 仿真分析,验证新的调制方法,既可得到谐波较少的输出电压波形,又能提高了直流电压的利用率。

1 传统 SHPWM 法原理

级联型逆变器^[5]是大功率传动系统中应用广泛的逆变器拓扑结构之一,其由多个单相 H 桥逆变器组成,把每个功率单元输出串联连接,实现电压输出,并减小输出电压的谐波。

级联型逆变器的调制方法较多,其中较为简单和成熟的是 SHPWM 调制方法^[6],其优点是输出谐波含量低、易于实现,且可用于任何电平数的多电平逆变器,在整个调制比变化范围内工作。缺点是:调制度 ma 较低时,基波电压幅值 U_{ab1} 小,谐波特性较差。对于 m 电平的逆变器,需要 $(m-1)$ 个幅值和频率完全相同的三角载波。

2 改进的 CO-SFO-PWM 法原理

在基于 SHPWM 的基础上,提出了一种改进型的 PWM 调制法^[7],将载波交叠式 PWM 法与开关频率优化 PWM 法相结合,得到无论是在高调制度还是在低调制度下都有良好性能的 PWM 控制方法,即 CO-SFO-PWM。文献[8]中分析了将一种新型的载波交叠 PWM 法运用到飞跨电容多电平逆变器,既能利用载波交叠特性,又能实现飞跨电容电压平衡。

由于注入了零序分量,该方法只适用于三相系统。该零序分量是三相正弦波瞬态最大值和最小值的平均值,因此,调制波通常是三相正弦波减去零序分量后所得到的波形。由于注入的零序分量在单相系统中无法相互抵消,从而在单相系统的输出波形中存在 3 次谐波,而在三相系统中就不存在此类情况。零序分量和调制波的计算公式如下:

$$U_{zero} = \frac{\max(U_a, U_b, U_c) + \min(U_a, U_b, U_c)}{2} \quad (1)$$

$$\begin{cases} U_a^* = U_a - U_{zero}, U_b^* = U_b - U_{zero} \\ U_c^* = U_c - U_{zero} \end{cases} \quad (2)$$

CO-SFO-PWM 的调制原理如图 1 所示。

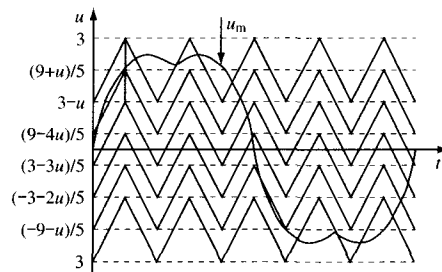


图 1 CO-SFO-PWM 调制原理图

假设每个载波的幅值为 U ; Y 是载波之间交叠的部分占每个载波幅值的比例; N 是电平数,则

$$U + U(1 - Y)(N - 2) = N - 1 \quad (3)$$

即

$$Y = \frac{(N - 1)(U - 1)}{(N - 2)U} \quad (4)$$

本文以 7 电平逆变器为例,根据式(4),载波之间的交叠量为

$$Y = \frac{6(U - 1)}{5U} \quad (5)$$

通过调节 Y ,可以优化 CO-SFO-PWM 调制。在不同的调制比下,使输出谐波特性和基波电压幅值达到最优控制。

3 仿真研究

在工作条件 $m_f = 21$, 单个 H 桥直流供电电源为 $U_d = 100$ V, 即每个电平电压为 100 V, 调制波工作频率为 50 Hz 的情况下,利用 Matlab/Simulink 进行仿真,得到 SHPWM 和最优控制下的 CO-SFO-PWM 法在不同调制比下的输出线电压总畸变率和直流电压利用率,如图 3,图 4 所示。

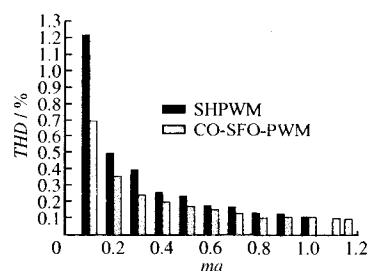


图 3 SHPWM—线电压的谐波特性和基波幅值

对照图 3,图 4 可知,SHPWM 调制下线电压的谐波特性和直流电压利用率随着调制比 ma 的增大逐渐改善,但在低调制下谐波特性并不理想。另外,由于受到调制比的制约,某些应用场合需要

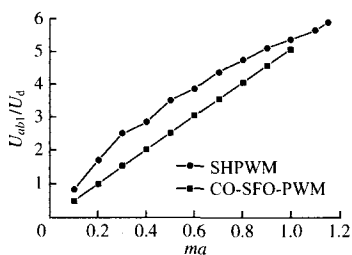


图4 CO-SFO-PWM-线电压的最优谐波特性和基波幅值
增大基波电压幅值,以提高直流电压利用率。对比 SHPWM 调制,CO-SFO-PWM 调制用于级联型多电平逆变器具有以下优点:载波交叠方法具有优化开关利用率,即开关损耗平均化的特点,并确保谐波特性的改善。开关优化可在确保不过调制的前提下,提高调制比到1.15,在 $ma = 1.1$ 时, $U_{ab1} = 5.66U_d$; $ma = 1.15$ 时, $U_{ab1} = 5.884U_d$,提高了直流电压利用率。在低调制度时,由于更大程度地利用了 H 桥单元直流侧的各个电平,因此,具有更好的谐波特性和基波电压幅值。而在高调制度时,也较好地提高了直流电压的利用率,并且其谐波特性稍有改善。调制比 ma 与载波交叠量 Y 的关系如图 5 所示。

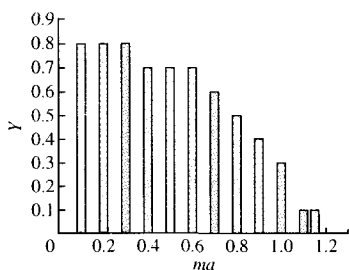


图5 调制比 ma 与载波交叠量 Y 的关系

(1) 当调制度 ma 变化时,谐波畸变率 THD 随之变化,所对应的载波交叠量 Y 不是一直不变的。当 ma 从小到大变化时, THD 减少所对应的载波之间垂直方向的交叠量 Y 是逐渐减少的,即使 THD 减少所对应的载波幅值 U 是减少的。

(2) 当 ma 增大时, THD 为最小所对应的载波之间垂直方向交叠量 Y 数值变化的幅度是缓慢的,即使 THD 减少所对应的载波幅值 U 减少的幅度是缓慢的。

对比 SHPWM 调制,CO-SFO-PWM 调制在同样的高调制比下增大了基波电压幅值。可见,这种改进型的 PWM 调制可改善谐波特性,在低调

制下尤为明显,可提高直流电压利用率,符合逆变器多电平输出的需要。

4 结 语

本文针对三相系统的级联型逆变器多电平输出,通过对 SHPWM 调制的分析和比较,提出了一种改进型的 PWM 调制方法,即 CO-SFO-PWM。根据该方法的调制原理,利用 Matlab/Simulink 仿真,得出不同调制度下输出线电压的谐波特性和直流电压利用率,并且可根据调制比的不同来选择载波重叠量,实现输出波形的最优控制。由此证明,CO-SFO-PWM 法结合载波重叠和开关优化的特性,能更好地抑制线电压输出谐波,提高直流电压利用率,达到预期目的,实现更好的多电平输出,并可推广到 N 电平级联型逆变器。

【参 考 文 献】

- [1] RODRIGUEZ J, BERNET S, WU B, *et al.* Multilevel voltage-source-converter topologies for industrial medium-voltage drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(6): 2930-2945.
- [2] RODRIGUEZ J, LAI J S, PENG F Z. Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(4): 724-738.
- [3] 吴洪洋. 级联型多电平变换器 PWM 控制方法的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8):42-46.
- [4] 费万民. 多电平逆变器特定谐波消除脉宽调制方法的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1):102-106.
- [5] 刘庆丰. 级联型多电平逆变器中的谐波控制[J]. 电工技术学报, 2006, 21(10):38-43.
- [6] 宋平岗. 级联多电平逆变器全调制比的特定谐波消除[J]. 电工技术学报, 2006, 21(9):81-87.
- [7] 王鸿雁. 基于控制自由度组合的多电平 PWM 方法及其理论分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(6):42-48.
- [8] 王小峰. 载波交叠特性 PWM 方法在飞跨电容多电平逆变器中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10):98-102.

收稿日期:2010-07-10