

准优化 PWM 技术在级联型多电平变流器中的应用

The Application of Quasi-optimization PWM Technology in the Cascaded Multi-level Converter

教育部光伏系统工程研究中心

杨向真 丁明 苏建徽 茆美琴

合肥工业大学能源研究所

Yang Xiangzhen Ding Ming Su Jianhui Mao Meiqin

摘要: 级联型多电平变流器是目前高压变流器的主要拓扑结构之一, 载波相移 SPWM 技术是级联型多电平变流器普遍采用的方法, 但是这种方法的一个缺点是直流电压利用率较低, 为了提高级联型多电平变流器的直流电压利用率, 将准优化 PWM 技术应用于载波相移 SPWM 技术中, 通过分析并利用 MATLAB 进行仿真, 验证了这种方案的可行性。

关键词: 级联型多电平变流器 载波相移 SPWM 技术 准优化 PWM 技术 直流电压利用率

Abstract: Cascaded multi-level converter is one of the main topologies in the high-voltage converters. Carrier phase shifting SPWM technology is a very popular method in the Cascaded multi-level converter. But one disadvantage of this method is poor direct voltage utilization. For improving the direct voltage utilization in the Cascaded multi-level converter, quasi-optimization PWM technology is applied in the carrier shifting SPWM technology. This method is feasible through analysis and simulation by MATLAB.

Key words: Cascaded multi-level converter Carrier phase shifting SPWM Quasi-optimization PWM technology Direct voltage utilization

[中图分类号] TM464

[文献标识码] B

文章编号 1561-0330(2006)02-0059-04

1 引言

目前, 多电平变流器是高压变流器研究的热点之一。多电平变流器具有电平阶数多、谐波含量小、开关频率低、开关损耗小、开关应力小和电压等级高等优点, 容易满足高压大容量场合的要求。经过多年的研究, 多电平变流器的拓扑结构主要有: 二极管箝位式、电容箝位式、带分离直流电源的串联式(又称级联型多电平变流器)、三相逆变器串联式、电压自平衡式^[1]。其中, 二极管箝位式和级联型多电平变流器是高压大容量变流器的两种典型拓扑结构。级联型变流器是以电压型单相全桥逆变电路(以下称为单元模块)为基本单元, 其主电路拓扑结构如图 1 所示, 它不仅具有多电平变流器的共同优点, 还具有自身独特的特点, 即单元模块易封装, 易模块化, 便于冗余设计和故障检修; 由于

低压逆变电路在技术上已经比较成熟, 将这些成熟的技术应用于级联型多电平变流器, 有利于对级联型多电平变流器的研究, 而且低压变流器的发展研究必然推动级联型变流器的发展。因此本文将级联型变流器作为研究对象。

错时采样空间矢量法^[2]和载波相移 SPWM 技术是针对级联型变流器提出的两种调制策略。错时采样空间

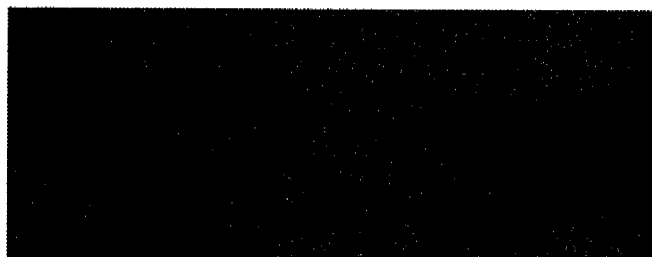


图1 单相级联型变流器主电路拓扑结构

矢量法是载波相移的思想与电压空间矢量的结合,具有载波相移SPWM技术和电压空间矢量两者的优点,直流电压利用率较高。载波相移SPWM技术实质是SPWM与多重化技术的结合,SPWM计算方法简单,应用普遍,但SPWM技术存在着直流电压利用率低的缺点,因此,载波相移SPWM技术的直流电压利用率也比较低。本文以载波相移SPWM技术为研究对象,为了提高直流电压利用率,将准优化PWM技术应用于载波相移SPWM技术中。

2 准优化PWM技术

直流电压利用率是指当调制度 $M=1$ 时,变流器输出的基波电压幅值与直流电源电压 E 的比值。提高直流电压利用率可以提高变流器的输出能力。通过对SPWM输出波形的谐波分析可知,SPWM三相逆变器输出线电压的基波幅值为 $\sqrt{3}ME/2$,线电压直流电压利用率只有 $\sqrt{3}/2 \approx 0.866 < 1$,直流电压利用率不高,这是SPWM的缺点之一^[3]。为了提高直流电压利用率,在SPWM技术的基础上,主要有几种优化PWM调制方法:线电压控制的三相SPWM技术、三相马鞍型SPWM技术、空间矢量法。这几种方法的共同点是:将正弦波的峰值消成平顶波,以增大调制度,从而提高直流电压利用率。

规则采样法是工程上常用的调制方法,它具有算法简单,易于微机实现,控制线形度好等优点,但同时也具有SPWM技术直流电压利用率低的缺点。为了解决规则采样法直流电压利用率低的问题,S.R.Bowes等在1985年提出了准优化PWM技术,通过对多种优化PWM的研究,确定了一个特殊的调制函数,对优化PWM技术进行近似。准优化PWM技术是指在规则采样法的正弦调制波中叠加三次谐波作为调制波,叠加图形如图2所示,表示式子为

$$F(t_k) = M \left[\sin t_k + \frac{1}{4} \sin 3t_k \right] \quad (1)$$

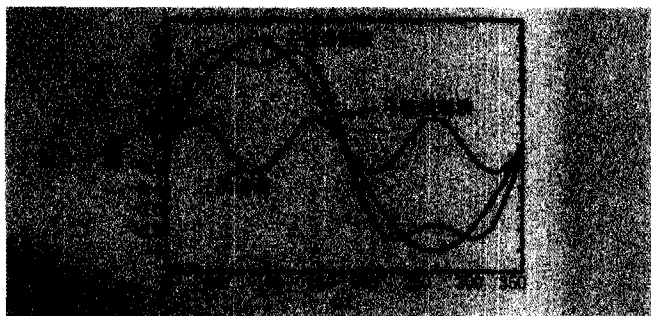


图2 准优化PWM技术调制波波形

其中, M 为调制度, $t_k = \frac{kT_s}{2}$, $k=1, 2, 3, 4 \dots$ ^[4]

由图2可以看出,三次谐波将正弦波的峰值消平成为马鞍波,将马鞍波作为调制波,可以使调制度 M 超过1,从而提高了直流电压利用率。在理想的正弦波中叠加三次谐波的情况下, $M=1$ 时,经过计算,马鞍波的幅值为0.891,因此,准优化PWM技术的最大调制度为 $1/0.891=1.122$,在 $M \leq 1.122$ 范围内,调制度和输出电压之间仍是线形关系,但调制度超过1.122后将出现过调现象,调制度和输出电压之间的关系将不再是线形关系,并且谐波也增大了。相对于SPWM技术,准优化PWM技术将变流器的直流电压利用率提高了12.2%。

另外,由于三次谐波在三相无中线系统中无通路,线电压中没有三次谐波,因此,准优化PWM技术只能应用于三相无中线系统中。

3 载波相移SPWM技术的原理

载波相移SPWM调制方法的基本原理是,对 N 个单元模块组成的单相级联型变流器,每个单元模块都采用低开关频率的SPWM的调制方法,各个单元采用同一个调制波,用 N 个三角载波分别进行调制,各三角载波具有相同的频率和幅值,但相位依次相差固定的角度,从而使每个单元模块输出的SPWM脉冲错开一定的角度,等效开关频率大大增加,叠加后变流器最终输出的波形是一个多电平的阶梯波,选择合适的相移角度就能使输出电压的谐波含量大幅度减少。利用载波相移SPWM技术进行调制的三相级联型变流器,三相正弦波依次相差 120° ,每相各单元载波的变化如上所述。

根据图1的拓扑结构,每个单元模块均采用SPWM调制,载波比为 k_c ,载波频率为 f_c ,采用不同的调制方法,输出电压波形也有差异。本文采用单极性调制, N 个载波依次相移 π/Nk_c ^[5]角度,使得 N 个SPWM脉冲错开一定的角度,等效载波频率为 $2Nf_c$,输出的相电压是 $2N+1$ 个电平的阶梯波,星型或三角形连接的三相变流器的输出线电压是 $4N+1$ 个电平的阶梯波。载波相移SPWM的原理示意图如图3所示。由5个单元模块组成

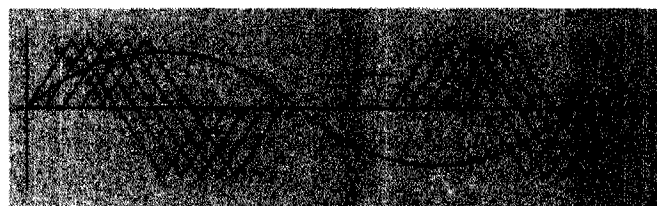


图3 载波相移SPWM的原理示意图

变流器，载波 \$n_1\$ 用来调制第 \$n\$ 个单元模块的一个桥臂 (\$n=1,2,3,4,5\$)。

4 准优化PWM技术在载波相移SPWM技术中的应用

载波相移SPWM技术实际上是对级联型变流器每个单元模块采用SPWM技术进行调制，载波相移的角度使得调制后的PWM脉冲错开一定的角度，叠加后就成为多电平的阶梯波。这种方法不可避免的具有直流电压利用率较低的特点。准优化PWM技术以及其它一些优化方案适用于三相系统，为了将这些优化措施应用于级联型变流器中，就要求级联型变流器是三相星形无中线系统。在实际应用中，级联型变流器每个单元模块采用规则采样法进行调制，准优化PWM技术是基于规则采样法提出的，它的目的是提高直流电压利用率，因此，将准优化PWM技术应用于载波相移SPWM技术中可以达到提高级联型变流器的直流电压利用率的目的。其原理就是将图3所示的正弦调制波转换成图2所示的马鞍波。

5 MATLAB仿真结果

为了验证准优化PWM技术在载波相移SPWM技术中应用的效果，采用MATLAB仿真软件进行仿真。主电路是三相星形联接的级联型变流器，每相有5个单元模块组成，载波频率为1kHz，直流测电压为400V，用规则采样法进行仿真。图4所示的是调制波注入三次谐波后线电压基波有效值和频率之间的关系曲线；在调制度 \$M=1\$，调制波频率为50Hz时，分别利用载波相移SPWM技术和注入三次谐波后的载波相移SPWM技术进行仿真，图5和图6分别是在这两种情况下的线电压波形图及其谐波分析，图7和图8分别是在这两种情况下的相电压波形图及其谐波分析，图9是在调制度 \$M=1.122\$，调制波频率为50Hz时的线电压波形及其谐波分析图。

由图4可知，利用注入三次谐波的载波相移SPWM技术进行调制后，根据单相全桥逆变电路的输出电压谐波分析公式：

$$u_0 = ME \sin(\omega_r t + \phi) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{n\pi} E \sin\left\{\frac{n\pi}{2} [\alpha \sin(\omega_r t + \phi) - 1]\right\} \cos n\omega_r t \quad (2)$$

其中，第一项是基波分量，第二项是谐波分量。\$u_0\$ 是输出的PWM电压，\$\omega_r\$ 是基波角速度，\$n\$ 是谐波次数，\$\phi\$ 是基波相位角初值^[3]。根据恒压频比，可得到下式：

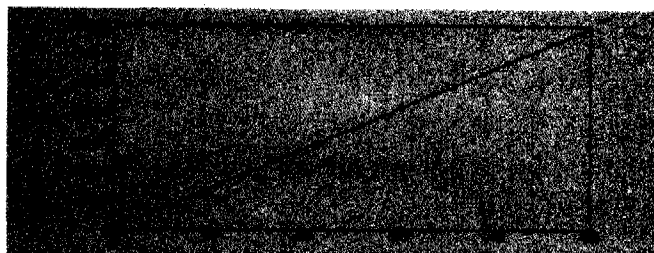


图4 注入三次谐波后线电压基波有效值与频率的关系曲线

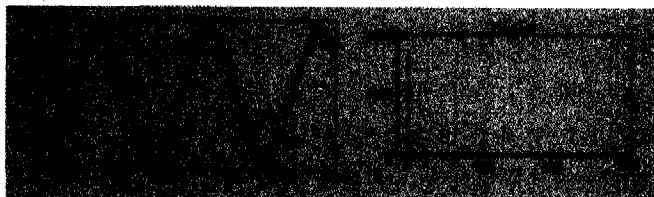


图5 注入三次谐波后载波相移SPWM技术在50Hz, M=1时的线电压波形及谐波分析

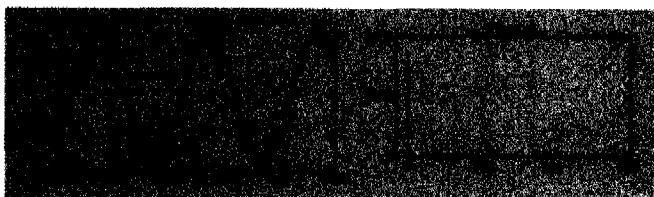


图6 载波相移SPWM技术在50Hz, M=1时线电压波形及谐波分析

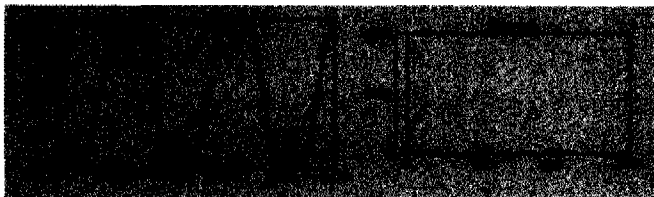


图7 注入三次谐波后载波相移SPWM技术在50Hz, M=1时的相电压波形及谐波分析

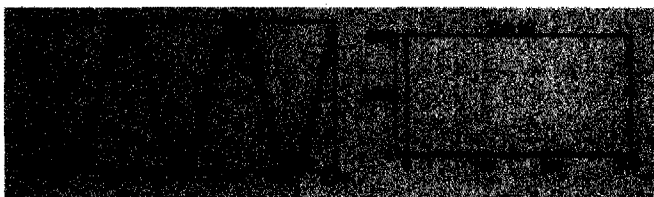


图8 载波相移SPWM技术在50Hz, M=1时相电压波形及谐波分析

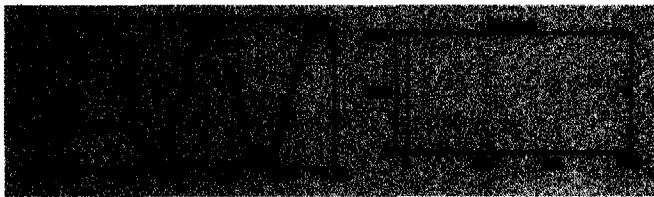


图9 注入三次谐波后载波相移SPWM技术在50Hz, M=1.122时的线电压波形及谐波分析

$$\frac{V_{AB}}{f} = \frac{\sqrt{3}NU}{f} = \frac{EM}{f} = k \quad (3)$$

其中，\$V_{AB}\$ 是线电压中基波分量的有效值，\$U\$ 是单元模块输出电压中基波分量的有效值，\$k\$ 为常数。

由上式可知, 只要保持调制度 M 和频率 f 的比值一定, 就能够保证仿真中级联型变频器按照恒频比来实现变频变压的目的。仿真结果证明在调制度小于 1.122 的范围内线电压基波有效值和频率之间仍然保持线性关系。

通过快速傅立叶(FFT)分析, 图 5 和图 6 中线电压的基波幅值分别是 3461V 和 3459V, 谐波含量分别是 8.86% 和 7.53%, 三次谐波对输出线电压波形的影响不大; 图 7 和图 8 的相电压基波幅值均为 1998V, 谐波含量分别为 9.45% 和 26.78%, 注入三次谐波后的载波相移 SPWM 的谐波含量明显较多, 主要是三次谐波在相电压中的比重较大, 占 24.79%。

图 9 进一步证明了调制度达到 1.122 时, 输出线电压基波幅值超过 $M=1$ 时的值, 达到 3882V(THD=8.16%), 直流电压利用率增大, 变频器输出能力提高了:

$$(3882-3641)/3461 \times 100\% = 12.16\%$$

另外, 理论上谐波应该分布在等效开关频率(10kHz)的倍数频率附近, 根据仿真波形, 谐波不仅分布在 10kHz 附近, 在其他频段也有一定的谐波存在, 这是因为仿真采用规则采样法, 输出波形的好坏还取决于载波频率, 载波频率越高, 波形越好, 否则, 波形越差, 但等效开关频率过高会造成开关损耗增大。因此应该选择合适的开关频率。

5 结束语

由以上分析和仿真结果可以看出, 准优化 PWM 技

术可以方便的应用于载波相移 SPWM 技术中以达到提高直流电压利用率的目的。由于级联型多电平变频器单元模块是单相全桥逆变电路, 低压变频器中使用的一些优化控制方案如线电压控制的三相 SPWM 技术、三相马鞍型 SPWM 技术等也可以方便的应用于级联型多电平变频器。总之, 能够方便的将低压变频器成熟的技术和优化方案应用于级联型多电平变频器中, 从而推动它的发展。这是级联型多电平变频器在实际应用中的优势之一。

参考文献

- [1] 吴忠智, 吴加林. 中(高)压大功率变频器应用手册. 北京: 机械工业出版社, 2003
- [2] 王立乔. 错时采样空间矢量调制技术研究. 浙江大学博士论文
- [3] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术(第三版). 北京: 机械工业出版社, 2001
- [4] 刘凤君. 正弦波逆变器. 北京: 科学出版社, 2002
- [5] 王立乔, 王长永, 黄玉水, 张仲超. 基于相移 SPWM 技术的级联型多电平变频器. 高电压技术, 2002

作者简介

杨向真(1982-) 女 硕士研究生 研究方向为高压变频器的控制研究, 合肥工业大学教育部光伏系统研究中心。

(上接第 78 页)

5 结束语

DTC 技术, 采用空间矢量的分析方法, 直接在定子坐标系下计算与控制交流电机的转矩, 用定子磁场定向并借助离散的两点式调节(Band-Band 控制)产生 PWM 信号, 直接对逆变器的开关状态进行最佳控制, 以获得转矩的高动态性能。

结晶器电磁搅拌是连铸机的关键设备, 为我厂生产高技术含量、高附加值产品奠定了坚实的设备基础。ACS600 变频器在我厂方坯连铸机结晶器电磁搅拌系统成功的应用, 为变频器的应用开辟了新路。

参考文献

- [1] 李 夙. 异步电机直接转矩控制. 北京: 机械工

业出版社, 1999

- [2] 李永东. 交流电机数字控制系统. 北京: 机械工业出版社, 2003
- [3] 姚锡禄主编. 变频器控制技术与应用. 福州: 福建科学技术出版社, 2005
- [4] ABB Industry. ACS600 Stirrer Application Program 4.1 Firmware Manual, 2003
- [5] 北京 ABB 电气传动有限公司. ABB ACS600 系统固件手册系统软件 7.X, 2002

作者简介

刘铁湘(1975-) 男 硕士研究生毕业, 现从事电气传动及自动化的相关工作。