

# 基于三次谐波注入的级联多电平逆变器

谢峰 关振宏 吴桢生 王洪峰 唐顺 程新伟

(西南交通大学 电气工程学磁浮技术与磁浮列车教育部重点实验室, 成都 610031)

**摘要:** 详细分析了调制波变换技术和三次谐波注入多电平逆变器的原理, 以及三次谐波注入后逆变器的调制信号与输入直流电压的关系。并且, 分析了在级联多电平逆变器开环PWM控制下, 一般SPWM与三次谐波注入的不同。提出三次谐波注入法能够在不影响负载电流电压的情况下实现载波调制的优化控制, 提高电压利用率。在Matlab/Simulink环境下通过仿真, 证实了理论的正确性。

**关键词:** 三次谐波注入; 级联多电平逆变器; 电压利用率

## Cascaded Multilevel Inverter Based on Three Harmonic Injection Method

XIE Feng, GUAN Zhenhong, WU Zhensheng, WANG Hongfeng, TANG Shun, CHENG Xinwei  
(Department of Electrical Engineering Key Laboratory of Magnetic Suspension Technology and Maglev Vehicle, Southwest JiaoTong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** we analyze the transform technology of wave modulation and principles of third harmonic injection into the multilevel inverter, as well as the relation between the modulation signal and input DC voltage after injection. In addition, the differences between the general SPWM and SPWM with third harmonic injection are shown, under the control of cascaded multi-level inverter in the way of open-loop PWM. The third harmonic injection method can optimize the control of carrier modulation and increase the utilization rate of voltage, while not affecting the current and voltage of the load. The simulation results under Matlab/Simulink confirm the correctness of the theory.

**Key Words:** the three harmonic injection; cascaded multilevel inverter; efficiency of DC voltage

中图分类号: TM464

文献标识码: A

文章编号: 0219-2713(2009)02-0007-03

## 0 引言

多电平技术由于具有输出功率大, 等效开关频率高等优点, 越来越成为人们研究的热点。由于变频器的输入电压基本固定, 其直流母线电压也基本固定, 如果能利用现有的直流电压通过调制波变换的方法得到更高的输出电流电压, 则大大提高系统的稳定输出的能力, 于是有了优化PWM方法——三次谐波注入法。

对于无中线的三相对称负载系统, 在三相

逆变器输出电压中加入三的倍数次谐波或直流分量时, 由于三次谐波电流无通路, 所以三个线电压和线电流中均不含三次谐波, 对负载电流电压波形不会产生影响。同样, 在正弦调制波中注入三次谐波也不会改变三相负载电流电压的基频分量, 因此, 利用三次谐波注入可以实现载波调制的优化控制, 以提高电压利用率。

## 1 三次谐波注入法的原理

当三相逆变器电路的输出相电压的调制波为正弦波时, 其表达式为:

收稿日期: 2008-10-20

$$\begin{cases} u_u = U_1 \sin \omega t \\ u_v = U_1 \sin(\omega t - 120^\circ) \\ u_w = U_1 \sin(\omega t - 240^\circ) \end{cases} \quad (1)$$

则其u、v两相间的线电压为

$$u_{uv} = u_u - u_v = \sqrt{3}U_1 \sin(\omega t + 30^\circ)$$

可见，当相电压调制波为正弦波时，线电压也为正弦波。

如果在相电压的正弦调制波中叠加一个3倍次的谐波，则其相电压调制波的表达式为

$$\begin{cases} u_u = U_1 \sin \omega t + U_{3k} \sin(3k\omega t + \theta) \\ u_v = U_1 \sin(\omega t - 120^\circ) + U_{3k} \sin[3k(\omega t - 120^\circ) + \theta] \\ u_w = U_1 \sin(\omega t - 240^\circ) + U_{3k} \sin[3k(\omega t - 240^\circ) + \theta] \end{cases} \quad (2)$$

式中， $\theta$ 为初始相位角。 $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ ，当 $k = 0$ 时，相当于三相中均叠加了一个直流信号，则其u、v两相间的线电压为

$$u_{uv} = u_u - u_v = \sqrt{3}U_1 \sin(\omega t + 30^\circ)$$

可见，在原相电压正弦调制波中叠加任一一个直流信号或者 $3k$ 次谐波信号，其线电压的输出没有发生变化。

三相逆变器拖动三相电动机时，一般采用的都是三相三线制，并且逆变器侧中性点和电动机绕组的中性点均不接触，故此不论逆变器的相电压输出信号如何变化，只要保证逆变器的线电压输出信号为正弦波，电动机的运行状态就不会发生变化。这就是调制波变换技术的基本理论依据。

采取SPWM调制时，由于线电压与相电压的幅值存在固定的 $\sqrt{3}$ 倍的关系，所以其波形系数为1.732，当采用双极性调制方式，且调制深度 $M = 1$ 时，相电压的峰值可以达到直流母线线电压的一半，即 $\frac{U_d}{2}$ 。其输出线电压的峰值为 $\frac{\sqrt{3}U_d}{2}$ ，所以说SPWM的直流电压利用率仅有86.6%。

提高电压电流利用率的各种方法，其基本做法就是通过各种变换方式，使相电压的基波峰值超过 $\frac{U_d}{2}$ ，从而使输出线电压的峰值超过 $\frac{\sqrt{3}U_d}{2}$ 。

三次谐波注入法是在相电压的标准正弦波信

号上叠加一个三次谐波，使相电压变成为马鞍形波，如图1所示。

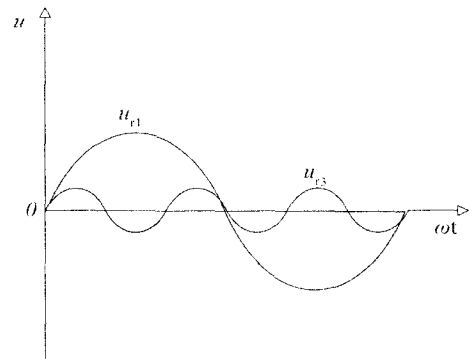
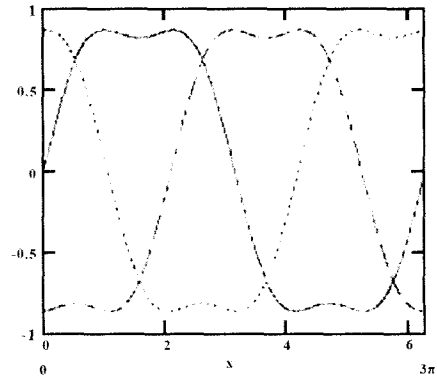


图1 三相谐波注入后的相电压波形

图中， $u_r$ 是标准正弦波叠加三次谐波后的调制波的波形，其表达式如下式所示：

$$u_r = U_1(\sin \omega t + \frac{1}{6} \sin 3\omega t) \quad (3)$$

对式(3)求导，并令其导数为0，可以得到：

$$\cos \omega t + \frac{1}{2} \cos 3\omega t = 0 \quad (4)$$

由式(4)可以解得： $\omega t = 60^\circ$ ，所以调制波的峰值为

$$u_{rp} = U_1(\sin \omega t + \frac{1}{6} \sin 3\omega t) = 0.866U_1$$

相应的调制波的基波的峰值为 $U_1$ 。所以线电压的峰值为 $\sqrt{3}U_1$ ，这种方式的波形系数为

$$m_d = \frac{U_{lp}}{U_{rp}} = \frac{\sqrt{3}U_1}{0.866U_1} = 2$$

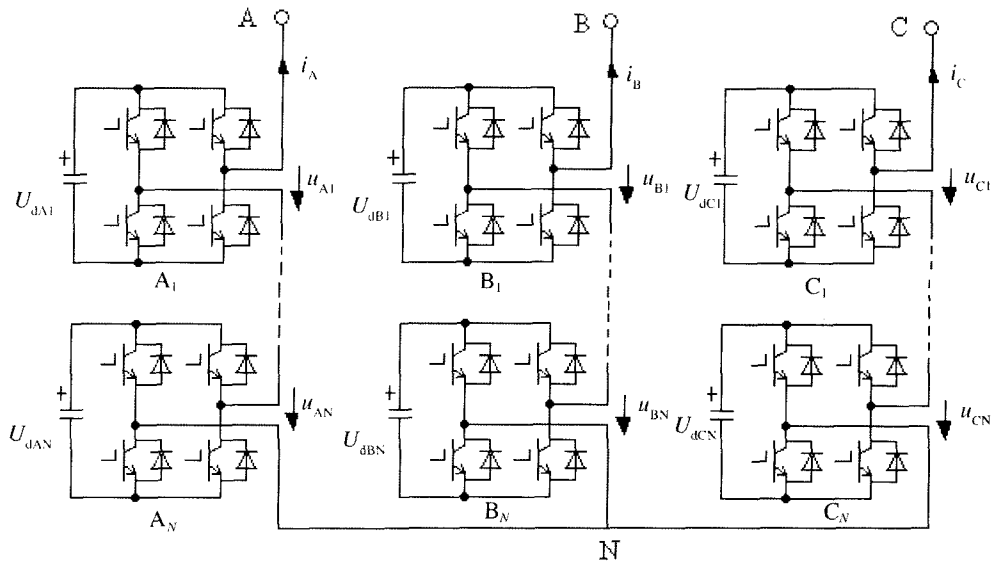


图2 N单元级联的星型连接的拓扑结构

采用这种调制方式可以使波形系数达到2，与SPWM相比，这种方式可以提高变频器输出线电压幅值约为15%。

### 2 基于三次谐波注入的级联多电平逆变器

H桥串联式多电平变换器采用多个功率单元串联的方法来实现高电压输出，每个功率单元采用标准的低压器件IGBT作为主回路开关器件。一般地，每相由N个H桥单元级联而成，逆变电路输出相电压电平数 $M=2N+1$ ，线电压为 $4N+1$ 。图2为N单元级联的星型连接的拓扑结构，输出相电压为 $2N+1$ 电平，线电压为 $4N+1$ 电平。取每相3个单元，即 $N=3$ ，其输出相电压为7电平，线电压为13电平。

### 3 仿真实现与结果

根据三次谐波注入的原理，马蹄形的调制波与三角载波进行对比产生脉冲信号，其关键马蹄形波形由式(3)可得，其波形的仿真模型为如图3所示。

以三次谐波注入法理论为基础，对每相三功率单元串联的级联多电平逆变器进行仿真分析。由于着重考虑三次谐波注入法的正确性，在仿真过程中，不考虑死区时间，最小管压降和电路分布阻抗等因数的影响。仿真中电路参数为，每相

单元的输入电压为115V，负载由一个电阻和一个0.01H的电感串联构成，载波频率为600Hz。

图4为未注入三次谐波时的输出电流波形，图5为注入三次谐波后的输出电流波形。

在调制比M都为1的情况下，图4为未注入三次谐波的三相电流波形，其幅值约为92.6A，图5为注入三次谐波的三相电流波形，其幅值约为107A，是为注入三次谐波的1.15倍。可见，加入三次谐波后，提高了电源电流利用率。

### 4 结束语

多电平逆变器是人们研究的重点，本文通过三次谐波注入法，在级联多电平逆变器中有效地提高了电压利用率，提高了性能。实验验证了文中的相关结论。  
(下转p.37)

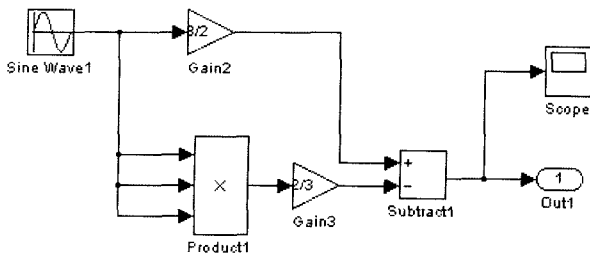
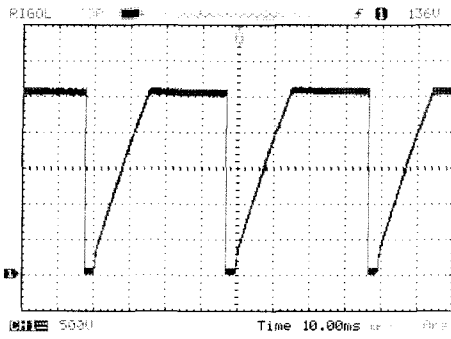
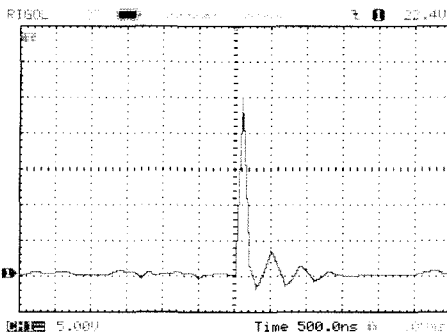


图3 马蹄形波形的仿真模型



(a)高压电容充电电压波形



(b)高压电容放电电流波形

图7 电源输出波形

体积小, 成本低廉; 尤其在转换效率、工作稳定性和可靠性等方面进一步得到了优化。

### 参考文献

- [1] 胡力群, 沙爱民, 袁文豪. 多功能道路检测车在道路养护管理中的应用[J]. 筑路机械与施工机械化, 2000, 11(2):5~8.
- [2] 单纯玉, 孙大军, 宋建中等. 全桥ZVS PWM电容器充电变换器[J]. 高电压技术, 2007, 33(3):159~162.
- [3] 阮新波, 严仰光. 脉宽调制DC/DC全桥变换器的软开关技术[M]. 北京: 1999.
- [4] 王永强. 新型相移谐振PWM控制器UCC3895及其应用[J]. 电源技术应用, 2005, 8(6):39~43.

### 作者简介

肖站 (1983-) 男, 哈尔滨工业大学, 硕士研究生, 研究方向为功率电力电子变换技术。

国海峰 (1961-) 男, 硕士生导师, 研究方向为电力电子技术与电力传动。

(上接p.9)

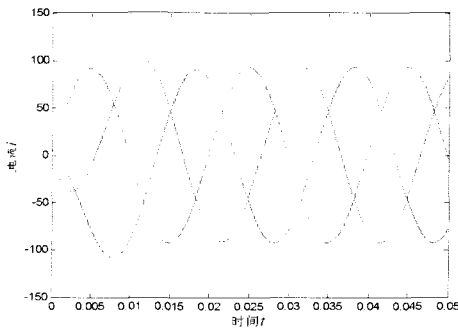


图4 未注入三次谐波时输出电流波形

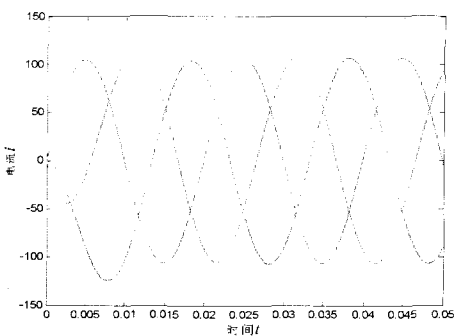


图5 注入三次谐波后输出电流波形

### 参考文献

- [1] 张皓, 续明进, 杨梅. 高压大功率交流变频调速技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [2] 李永东, 肖曦, 高跃. 大容量多电平变换器: 原理. 控制. 应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [3] 官二勇, 宋平岗, 叶满园. 基于三次谐波注入法的三相四桥臂逆变电源[J]. 电工技术学报, 2005, 20(12): 43-45.
- [4] 何金平, 毛承雄, 陆继明, 王丹. 三相线电压级联多电平变化器原理及仿真研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(4): 170-174.

### 作者简介

谢峰 (1981-) , 男, 西南交通大学硕士研究生, 主要研究方向为电力电子与电力传动。

关振宏 (1967-) , 男, 西南交通大学副教授, 主要研究方向为电力电子与电力传动。