

# 串联 H 桥多电平逆变器输出规律的研究

邱阳, 索迹, 祁春清

(苏州市职业大学 电子信息工程系, 江苏 苏州 215104)

**摘要:** 文章研究了多重移相串联叠加 H 桥多电平逆变器的输出规律, 随着 H 桥单元个数的增加, 输出波形越来越接近正弦波, 谐波含量也就越小; 且应用 MATLAB 进行了仿真实验, 给出仿真波形。

**关键词:** H 桥; 多电平; 多重移相叠加

**中图分类号:** TM464 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-5475(2006)04-0049-04

## 0 前言

串联 H 桥多电平逆变器(简称多单元逆变器 Cascad Inverter)以 H 桥结构为基础, 将具有移相或不同导通角的多个 H 桥单元串联起来, 得到具有多个电平的合成电压, 实现高压大容量输出<sup>[1]</sup>。近年来, 串联 H 桥多电平逆变器在高压大功率应用场合越来越受到重视。

图 1 为单相串联 H 桥多电平逆变器拓扑结构。

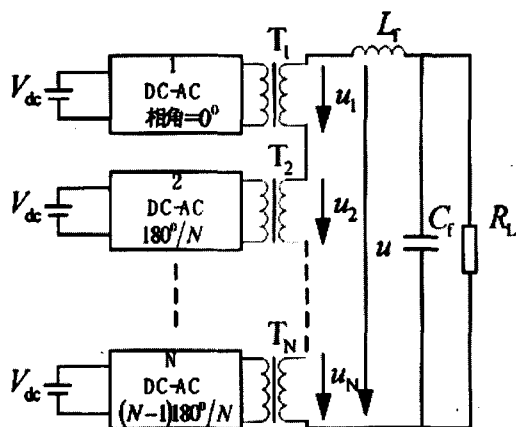


图 1 单相串联 H 桥多电平逆变器拓扑结构

图中,  $V_{dc}$  为输入直流电源, 本文研究的串联 H 桥多电平逆变器的直流输入电源相同, 如果各单元输入直流电源不同, 则称为混合单元级联多电平逆变器; 混合单元级联多电平逆变器输出电平规律较复杂。1, 2, 3...N 为 n 个 H 桥逆变单元, 各单元通过输出隔离变压器串联叠加。有的串联 H 桥多电平逆变器可

以不加输出隔离变压器, 而是各 H 桥单元直接首尾相连, 串联叠加。不论输出是否加隔离变压器, 串联 H 桥多电平逆变器的输出规律都是相同的, 因为输出电平数总是由 H 桥单元的输出状态和串联 H 桥的数目决定的。本文研究的带有输出隔离变压器的串联 H 桥多电平逆变器是指各单元的变压比相同的情况, 如果变压比不同, 那么串联 H 桥多电平逆变器的输出规律也不同<sup>[2]</sup>。

## 1 H 桥单元输出规律

串联 H 桥多电平逆变器是由多个 H 桥单元串联组成的, H 桥单元是串联 H 桥多电平逆变器的基本结构单元, 图 2 是基于 IGBT 的一个 H 桥单元, H 桥单元输出电压与开关器件  $V_{a1}$ 、 $V_{a2}$ 、 $V_{b1}$ 、 $V_{b2}$  的开关状态有关, 通过控制  $V_{a1}$ 、 $V_{a2}$ 、 $V_{b1}$ 、 $V_{b2}$  的开关状态, 可使该 H 桥单元输出不同电平。

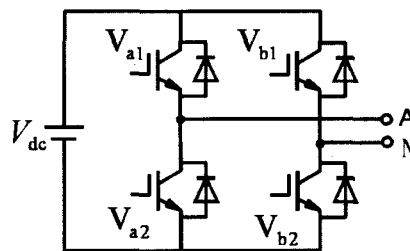


图 2 H 桥单元结构

当  $V_{a1}$ 、 $V_{b2}$  导通,  $V_{a2}$ 、 $V_{b1}$  关断(输出为正电压  $+V_{dc}$ ); 或者当  $V_{a2}$ 、 $V_{b1}$  导通,  $V_{a1}$ 、 $V_{b2}$  关断(输出为负电压  $-V_{dc}$ ), 对应输出为两电平(即方波), 如图 3。

收稿日期: 2006-09-12

基金项目: 江苏省教育厅自然科学基金项目《数字化电源网络的分布式控制技术》(03KJD470207)

作者简介: 邱阳(1976-), 男, 江苏宜兴人, 工程师, 研究方向: 电力电子及自动控制; 索迹(1972-), 男, 吉林四平人, 硕士, 工程师, 研究方向: 电力电子与电力传动; 祁春清(1973-), 女, 辽宁辽阳人, 硕士, 工程师, 讲师, 研究方向: 电力电子与电力传动。

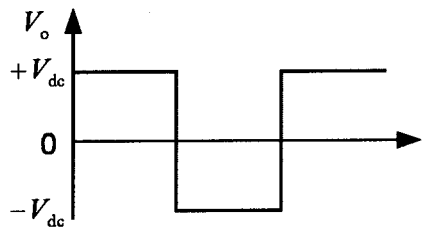


图 3 H 桥单元两电平输出波形

除上述两种状态外,如果  $V_{a1}$ 、 $V_{b1}$  导通,  $V_{a2}$ 、 $V_{b2}$  关断或者  $V_{a2}$ 、 $V_{b2}$  导通,  $V_{a1}$ 、 $V_{b1}$  关断,则 H 桥单元就增加了一个零电压,对应输出电平数为三电平(即矩形波)。波形见图 4。

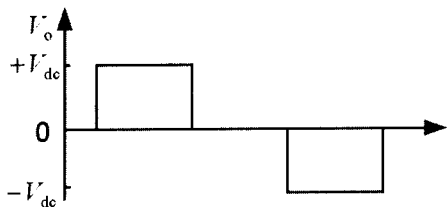


图 4 H 桥单元三电平输出波形

串联 H 桥多电平逆变器属于阶梯波合成逆变器,由  $N$  个依次相移  $\pi/N$  的逆变单元输出的方波或矩形波叠加得到合成阶梯波,即多重移相叠加法<sup>[3]</sup>。多重化逆变器输出阶梯波的阶高按正弦规律变化,如图 5 所示。这种阶梯波中的谐波含量显著减少,阶梯波数目越多,波形越接近正弦波,谐波含量越小<sup>[4]</sup>。

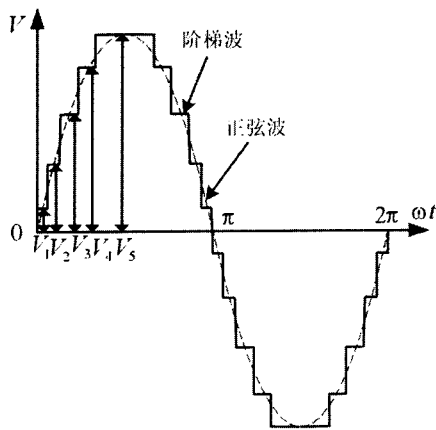


图 5 合成波波形

## 2 串联 H 桥多电平逆变器输出规律

由振荡器输出的方波或矩形波经分相电路输出  $N$  个依次相移  $\pi/N$  的方波信号,经驱动电路后供给各逆变单元的功率开关<sup>[5]</sup>。所以,  $N$  个逆变单元输出  $N$  个依次相移  $\pi/N$  的方波电压  $u_1$ 、 $u_2$ 、 $\dots$ 、 $u_N$ ,其初始相位分别为  $\varphi_1 = 0$ 、 $\varphi_2 = \pi/N$ 、 $\dots$ 、 $\varphi_N = (N-1)\pi/N$ ,多重化逆变器的输出侧就可以得到阶梯波输出,即  $u = u_1 + u_2 + u_3 + \dots + u_n$ 。

如果逆变单元的直流输入电压相同(都为  $V_{dc}$ ),则每相电压可以达到的最大值  $u_{pmax}$  和最小值  $u_{pmin}$  分别为:

$$u_{pmax} = +NV_{dc} \quad u_{pmin} = -NV_{dc}$$

当逆变单元方波输出(即只输出两电平  $+V_{dc}$  和  $-V_{dc}$ )时,由于逆变单元输出两电平,输出电压没有“0”电平,所以每相功率单元的输出电平叠加在一起时每升高或降低一个“台阶”就要跨过两个电平而不是一个电平。因此,每相电压可以实现的电平数  $m$  为:

$$m = (u_{pmax} - u_{pmin})/2V_{dc} + 1 = N + 1$$

即可实现的电平集合为:

$$(+NV_{dc}, \dots, +4V_{dc}, +2V_{dc}, 0, -2V_{dc}, -4V_{dc}, \dots, -NV_{dc}) \quad (N \text{ 为偶数时}) \text{ 或 } (+NV_{dc}, \dots, +3V_{dc}, +V_{dc}, 0, -V_{dc}, -3V_{dc}, \dots, -NV_{dc}) \quad (N \text{ 为奇数时})$$

逆变回路接成三角形( $\Delta$ )时,由于线电压等于相电压,此时线电压的电平数和电平集合都与相电压的分析结果相同;逆变回路接成星形( $Y$ )时,每相电压可以实现的电平数  $m'$  为:

$$m' = (u_{pmax} - u_{pmin})/V_{dc} + 1 = 2N + 1$$

即可实现的电平集合为:

$$(+2NV_{dc}, \dots, +4V_{dc}, +2V_{dc}, 0, -2V_{dc}, -4V_{dc}, \dots, -2NV_{dc})$$

这样,逆变单元两电平输出时的输出规律是: $N$  单元串联逆变器合成波相电压是  $N + 1$  电平;线电压是  $N + 1$  电平(角接时)或  $2N + 1$  电平(星接时);最高电压是单元电压的  $N$  倍。

当逆变单元矩形波输出(即输出三电平  $+V_{dc}$ 、 $0$  和  $-V_{dc}$ )时,由于每相功率单元的输出电平叠加在一起时每升高或降低一个“台阶”就要跨过一个电平。因此,每相电压可以实现的电平数  $m$  为:

$$m = (u_{pmax} - u_{pmin})/V_{dc} + 1 = 2N + 1$$

即可实现的电平集合为:

$$(+NV_{dc}, \dots, +2V_{dc}, +V_{dc}, 0, -V_{dc}, -2V_{dc}, \dots, -NV_{dc})$$

逆变回路接成三角形( $\Delta$ )时,由于线电压等于相电压,此时线电压的电平数和电平集合都与相电压的分析结果相同;逆变回路接成星形( $Y$ )时,每相电压可以实现的电平数  $m'$  为:

$$m' = 2(u_{pmax} - u_{pmin})/V_{dc} + 1 = 4N + 1$$

即可实现的电平集合为:

$$(+2NV_{dc}, \dots, (N+1)V_{dc}, +NV_{dc}, \dots, +2V_{dc}, +V_{dc}, 0, -V_{dc}, -2V_{dc}, \dots, -NV_{dc}, -(N+1)V_{dc}, \dots, -2NV_{dc})$$

这样,逆变单元两电平输出时的输出规律是: $N$

单元串联逆变器合成波相电压是  $2N + 1$  电平;线电压是  $2N + 1$  电平(角接时)或  $4N + 1$  电平(星接时);最高电压是单元电压的  $N$  倍。

### 3 仿真分析

为了验证串联H桥多电平逆变器多重移相叠加的输出规律,本文应用 MATLAB 进行了仿真分析。

令基于GTO的串联H桥多电平逆变器的单元数为3,即  $N = 3$ ,根据多重移相叠加原理,每个单元初始相位为  $\frac{(N-n)\pi}{N}$  ( $n = N, N-1, \dots, 3, 2, 1$ ),也就是说,每个单元依次相移  $\frac{(N-n)\pi}{N}$  ( $n = N, N-1, \dots, 3, 2, 1$ )。工频状态下  $f = 50\text{Hz}$ ,则每个单元的触发脉冲时间依次延迟  $\frac{(N-n)0.01}{N}$  ( $n = N, N-1, \dots, 3, 2, 1$ ),由此算出:第1个单元延迟  $0\text{s}$ ,第2个单元延迟  $0.00333\text{s}$ ,第3个单元延迟  $0.00666\text{s}$ 。根据计算所得的延迟时间给出各单元的触发脉冲,脉冲周期  $0.02\text{s}$ ,占空比  $50\%$ ,逆变单元输出方波,逆变回路星形连接。

图6是基于GTO的两电平输出空载仿真波形,三个波形分别是单个单元的仿真波形、相电压仿真波形、线电压仿真波形。从仿真图可以看出,相电压包含4个电平,线电压包含7个电平,验证了前面讨论的逆变单元方波输出时,相电压电平数  $m = N + 1$ ,逆变回路星形连接线电压电平数  $m = 2N + 1$  的输出规律。

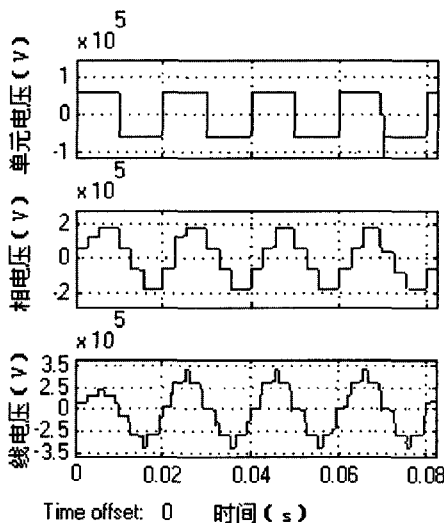


图6  $n = 3$  两电平输出时仿真波形

基于GTO逆变单元三电平输出时,采用各单元逆变器导通角不同的方法合成阶梯波。每个逆变单元一个周期内正负半周各导通一次,可以把理想电压输出波分为  $3 \times 4 = 12$  份,每份占一个周期的  $\frac{1}{12}$ 。

则:第1个单元导通  $\frac{1}{12}$ ,导通开始时间分别为  $\frac{0.02}{12}$

$$\times 3 = 0.005\text{s} \text{ 和 } \frac{0.02}{1} \times 9 = 0.015\text{s};$$

第2个单元导通  $\frac{3}{12}$ ,导通开始时间分别为  $\frac{0.02}{12}$

$$\times 2 = 0.00333\text{s} \text{ 和 } \frac{0.02}{12} \times 8 = 0.013333\text{s};$$

第3个单元导通  $\frac{5}{12}$ ,导通开始时间分别为  $\frac{0.02}{12}$

$$\times 1 = 0.0016667\text{s} \text{ 和 } \frac{0.02}{12} \times 7 = 0.0116667\text{s}.$$

可以看出,每个逆变单元正负半周开始导通时间都相差  $0.01\text{s}$ ,正好半个周期,这和理论相符。根据这3个单元的开始导通时间给出触发脉冲,就可以得到多重叠加的输出波形,图7是基于GTO三电平输出空载仿真波形。仿真图中前三个波形是3个单元的输出波形,每个单元一个周期内导通两次,各单元导通时间不同。第四个是合成后的输出相电压波形,波形中包含7个电平,符合前面讨论的逆变单元三电平输出时,合成波电平数  $m = 2N + 1$  的输出规律。

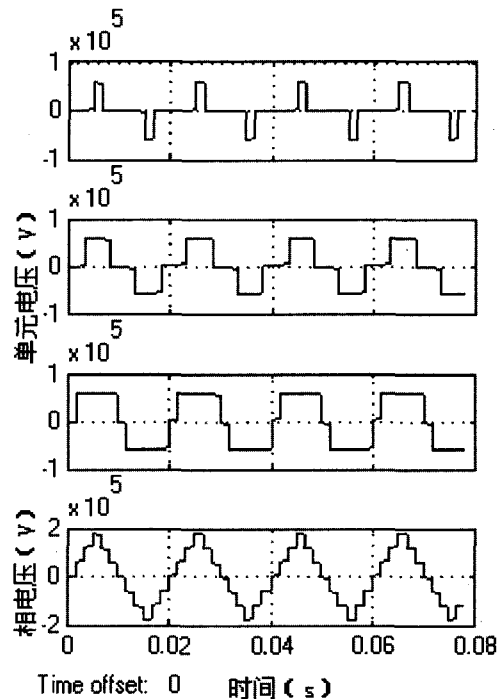


图7  $n = 3$  三电平输出时仿真波形

依据上述脉冲生成方法,对  $n = 5$  进行了仿真。图8是基于IGBT两电平输出空载仿真波形,三个波形分别是单个单元的仿真波形、相电压仿真波形、线电压仿真波形。从仿真图可以看出,相电压包含6个电平,线电压包含11个电平,符合  $N = 5$  时的电平输

出规律,波形更接近正弦波。

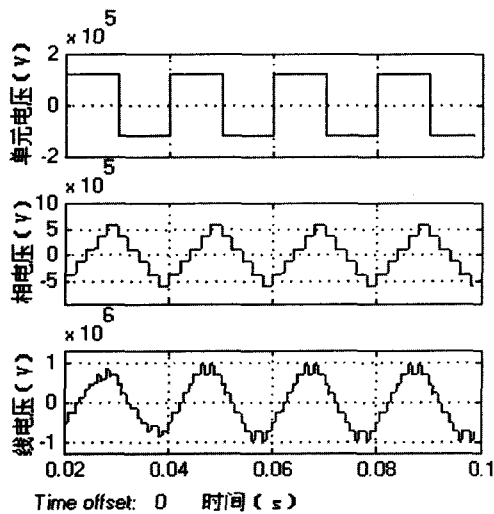


图 8  $n=5$  两电平输出时仿真波形

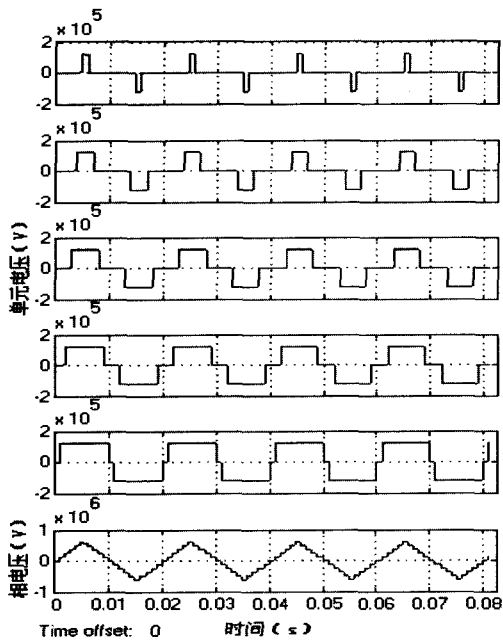


图 9  $n=5$  三电平输出时仿真波形

图 9 是基于 IGBT 三电平输出空载仿真波形。仿

真图中前 5 个波形是 5 个单元的输出波形,每个单元在一个周期内导通两次,各单元导通时间不同。最下一个是合成后的输出相电压波形,波形中包含 11 个电平,符合前面讨论的逆变单元三电平输出时合成波电平数  $m=2N+1$  的输出规律。

#### 4 结论

串联 H 桥多电平逆变器是一种新型结构的逆变器,该逆变器每个功率单元构造相同,便于模块化设计和制造,系统可靠性高;当某一级逆变桥出现故障时,就被旁路掉,剩余模块可不间断供电,以尽量减少生产损失;输出电压波形电平数较多,非常接近正弦波,对电网谐波污染小,无需任何功率因数补偿。这些特点决定了串联 H 桥多电平逆变器具有较好的发展前途和广泛的应用前景<sup>[5]</sup>。

本文研究了多重移相串级叠加 H 桥多电平逆变器的输出规律,进行了仿真实验。并且可以看出,随着 H 桥单元个数的增加,输出波形越来越接近正弦波,谐波含量也就越小。

#### 参考文献:

- [1] Hiu zhe ren. Solution electrical network peak valley difference and environmental protection question effective method. Hunan electric power, 2001 (5): 59-60.
- [2] Bai hong sheng, Zhu li, Li gan sheng. The form diverse gathers can the power plant. Conserves energy, 2000 (4): 44-46.
- [3] Han B, Back S, Kim H, et al. Dynamic Characteristic Analysis of SSSC Based on Multibridge Inverter. IEEE Trans on Power Delivery. 2002, 17 (4): 623-629.
- [4] Wu hong yang. Cascade multilevels converter PWM control method research. Chinese electrical engineering journal, 2001, 21 (8): 42-46.
- [5] J. S. Lai et al. A novel resonant snubber based soft-switching inverter. IEEE APEC, 1995: 797-803.

(责任编辑:李政)

## Research on the output law of H-bridge cascaded multiple inverter

QIU Yang, SUO Ji, QI Chun-qing

(Suzhou Vocational University, Suzhou 215104, China)

**Abstract:** The paper studies the multiple phase shifting cascade to superimpose the H bridge multi-levels inversion output rule, along with the H bridge unit integer increase, the output wave shape more and more approached the sine wave, and the harmonic content is also smaller. the paper also discusses application of MATLAB simulation software simulate and analysis, the certification of its rationality and feasibility.

**Key words:** H-bridge cascaded; multiple inverter; multiple phase shifting