

# 开关功率放大器拓扑及控制方案选择\*

## Selectlon of Topologe and control Scheme for Switching Power Amplifier

陈世杰 王武斌 吕征宇 浙江大学电气工程学院(杭州 310027)

Chen Shijie Wang Wubin Lu Zhengyu College of Electrical Engineering; Zhejiang University (310027)

**摘要:**本文介绍了开关功率放大器的拓扑及控制方案的选择,拓扑选择方面介绍了多电平电路已经多电平电路的交错级联,控制方案方面介绍了三角载波移相 PWM 技术。通过两者的结合,开关功率放大器可以获得高质量的输出波形,最后设计了一个 1kW,5kHz 的多电平电路实验模型的,实验结果验证了这一效果。

**叙词:**多电平变换器 交错并联 三角载波移相 PWM

**Abstract:** Paper presents the selection of topology and control scheme for switching power amplifier. In the topology selection side, paper introduces the multilevel inverter and interleave of multilevel inverter, and in the control scheme selection side, the triangular carrier phase shifting PWM technique is introduced. With the combination of these two selections, the switching power amplifier will gain the high quality output waveform, which is verified by the experimental result of a 1kW, 5kHz prototype with multilevel inverter topology.

**Keywords:** Multilevel inverter Interleave Triangular carrier phase shifting PWM

## 1 引言

功率放大器在音频功放、发射系统、伺服系统、声纳探测、振动测试等很多领域都得到广泛的应用。传统的功率放大器采用线性放大电路,开关管工作在线性放大区,输出失真小、相应快、功放的线性好。但是,由于电路存在直流导通损耗,其效率较低,一般只能做到 40%~60%,甚至更低。另外,功率管的散热比较困难,功率难以做大,体积大而笨重,因此在很多领域应用中受到限制。为了解决传统功率放大器的缺点,开关功率放大器应运而生。

由于开关功率放大器对输出波形具有很高的要求,因此,选择一个合适的拓扑及控制方案变得尤为重要。选择一个好的拓扑可以大大的减小输出波形的失真度,同时可以提高整个装置的功率容量。而选择一个好的控制方案,在减小输出失真度的同时,还可以解决开关管最高开关频率瓶颈的问题,也减少了开关管的开关损耗。

## 2 开关功率放大器拓扑选择

(a)单模块的拓扑选择<sup>[1]</sup>

传统的两电平变换器应用于开关功率放大器时,存在许多

问题:难以获得高质量的输出波形;为满足输出波形失真度的要求而提高开关频率,从而造成很高的开关损耗;难以应用于高压场合;功率容量有限等等。

近年来,在高压、大功率应用场合,一种新型的变换器——多电平变换器引起了人们越来越多的关注。多电平变换器的思想最早是由 Nable 等人于 1981 年提出的。它的一般结构由几个电平台阶(典型情况是电容电平)合成阶梯波以逼近正弦输出电压。

多电平变换器与传统两电平变换器相比,拥有更高质量的输出波形,而且可以工作在高压、大功率场合,因此,更适合将其应用于开关功率放大器中。

图 1 所示的为多电平变换器的一种:二极管箝位型多电平变换器。其两个桥臂 Leg11 及 Leg22,每个桥臂拥有三个状态,分别为上面两个开关管导通、中间两个开关管导通及下面两个开关管导通。定义这三种状态对于 Leg11 和 Leg22 分别为(1, 0, -1)和(-1, 0, 1)。这样

$$e_o = \frac{1}{2} V_{dc} (\text{Leg11} + \text{Leg22}) \quad (1)$$

\* 基金项目:台达电力电子科教发展基金项目。

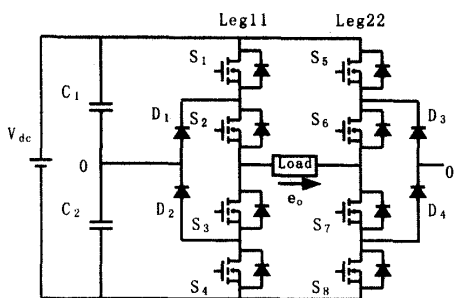


图1 二极管钳位型多电平逆变器

因此,采用合适的控制方案,输出可以为5电平,分别为0、 $\pm 1/2V_{dc}$ 、及 $\pm V_{dc}$ 。

(b)模块间的交错并联<sup>[2]</sup>

在输出频率及功率要求更高的场合,当单个多电平模块难以满足要求时,模块之间的串并是一种解决方案。下面介绍一种模块间的交错并联,图2所示的是两模块间的交错并联, $L_1$ 、 $L_2$ 为两个中心抽头的电感。

定义每个桥臂的三种状态对于Leg1及Leg2为(1,0,-1),对于Leg3及Leg4为(-1,0,1)。这样

$$e_o = \frac{1}{4}V_{dc}(Leg1 + Leg2 + Leg3 + Leg4) \quad (2)$$

因此,采用合适的控制方案,输出可以为9电平,分别为0、 $\pm 1/4V_{dc}$ 、 $\pm 1/2V_{dc}$ 、 $\pm 3/4V_{dc}$ 及 $\pm V_{dc}$ 。

采用模块间的级联同样可以输出9电平,但其需要两路独立的直流电源。以上分析的为两个模块间的交错并联,可以将其扩展到多个模块,对于N个模块的交错并联,其输出的电平数可以为 $4N+1$ 。

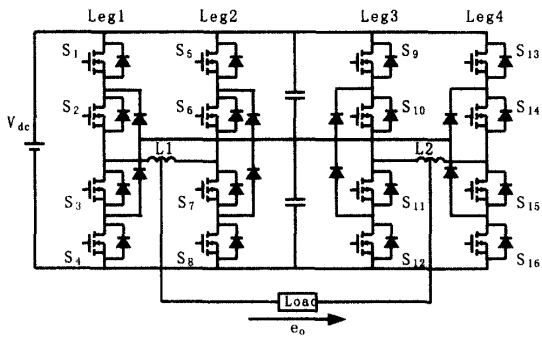


图2 两个多电平模块的交错并联

### 3 开关功率放大器控制方案选择<sup>[3,4,5]</sup>

除了拓扑选择,开关功率放大器的控制方案选择也很关键。一个合适的控制方案可以有效的提高输出波形的质量,这对于开关功率放大器是非常重要的。下面介绍一种三角载波移相

PWM控制方案,它的优点在于:可以提高等效开关频率,从而获得更高质量的输出波形,或者从另一面说,降低开关管的开关频率,减少开关损耗,提高系统效率。

单个桥臂的PWM控制信号如图3所示。调制波 $V_s$ 和 $-V_s$ 分别与三角载波相比较,产生两路信号 $V_p$ 和 $V_n$ ,如图3(b)、(c)所示。 $V_p$ 和 $V_n$ 经过异或门输出 $V_{BD}$ ,如图3(d)。  $V_{BD}$ 分别与触发信号 $V_T$ 及其互补信号相与,输出用来作为开关管 $S_{w1}$ 和 $S_{w2}$ 的门极驱动信号。而开关管 $S_{w3}$ 和 $S_{w4}$ 的门极驱动信号分别与 $S_{w1}$ 和 $S_{w2}$ 的门极驱动信号互补。这样,单个桥臂的输出波形如图3(j)所示,输出为三电平。图3中 $S_{w1}$ 、 $S_{w2}$ 、 $S_{w3}$ 、 $S_{w4}$ 分别对应一个桥臂从上到下4个开关管,Leg11和Leg22分别对应单个多电平模块的两个桥臂。

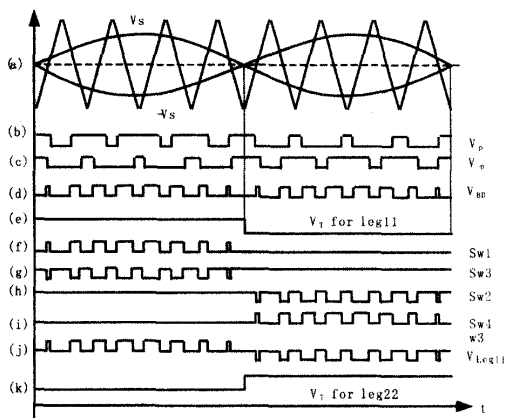


图3 单桥臂PWM控制信号及输出

单个多电平模块的两个桥臂之间采用三角载波移相PWM技术,即每个桥臂采用相同的调制波,而三角载波相互之间间隔 $1/4$ 个载波周期,如图4。利用三角载波移相PWM技术,单个多电平模块的输出如图5所示。

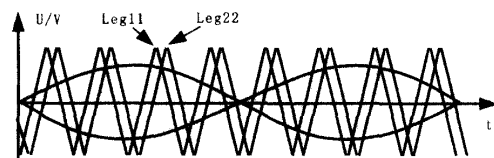


图4 单模块三角载波移相

对于两电平模块的交错并联,除了单个模块都采用上述的三角载波移相之外,两个模块之间也采用三角载波移相,移相的大小为 $1/8$ 个载波周期。假定图2所示的两多电平模块的交错并联,Leg1和Leg3为一个模块,Leg2和Leg4为另一模块,这样其三角载波移相的排列顺序如图5所示,依次为Leg1、Leg2、Leg3、Leg4。经过模块之间的三角载波移相,两模块交错并联以

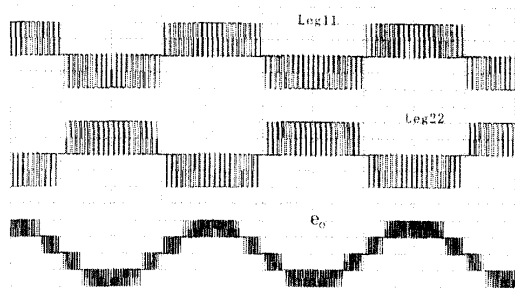


图5 单模块5电平输出实现后的输出如图7所示。

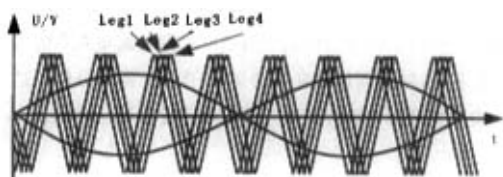


图6 模块之间的三角载波移相

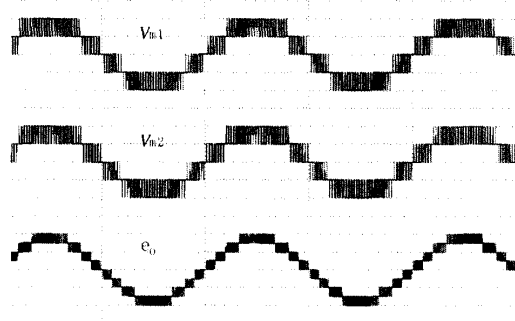


图7 两模块交错并联9电平输出

三角载波移相 PWM 技术同样可以扩展到多个模块的交错并联,对于 N 个模块,相邻两个模块之间的三角载波相移大小为  $1/4N$  个载波周期。

从图 5 可以发现,采用三角载波移相 PWM 技术之后,单个模块输出的等效开关频率为每个桥臂输出等效开关频率的 2 倍。而每个桥臂输出的等效开关频率为开关管一个周期内平均开关频率的 2 倍(从图 3 可以看到,每个开关管都有半个周期内一直处于开或者关状态)。这样,单个模块输出的等效开关频率为开关管一个周期内平均开关频率的 4 倍。而从图 7 可以看到,两个模块交错并联输出的等效开关频率又为单个模块输出等效开关频率的 2 倍。扩展到多个模块, N 个模块交错并联输出的等效开关频率为开关管一个周期内平均开关频率的  $4N$  倍。等效开关频率的提高,可以使开关功率放大器获得更高质量的输出波形,降低开关管的开关频率,

减少开关损耗,提高系统效率。

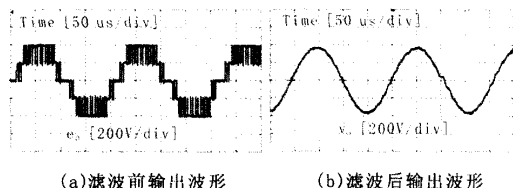
## 4 实验结果

本文设计了一个单模块多电平电路的实验模型,其具体的电路参数及规格如下:

- 输出满载功率:1kW
- 输出最高频率:5kHz
- 输入直流电压:400V
- 开关频率:100kHz

开关管驱动信号由 DSP 提供,驱动信号的产生及三角载波的移相在 DSP 内部完成。

图 8 给出了 1kW、5kHz 的正弦波输出实验波形,(a)、(b)分别为滤波之前和经过两级滤波之后的输出实验波形。图 9、图 10 分别给出了 50Hz 的三角波和 100Hz 的方波经过开关功率放大器以后的输出实验波形(滤波前及滤波后)。图 11 为 5kHz 内的 THD 曲线,可以看到,其 THD 基本上都在 3% 以下。



(a)滤波前输出波形 (b)滤波后输出波形

图8 1kW、5kHz 正弦波输出实验波形

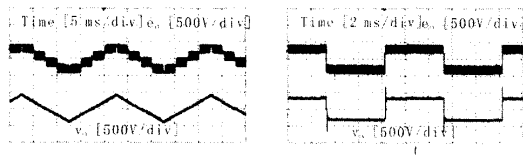


图9 50kHz 三角波输出实验波形

图10 100kHz 方波输出实验波形

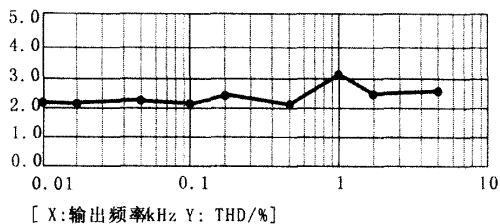


图11 THD 曲线

## 5 结语

本文分析了开关功率放大器的拓扑与控制方案选择。在拓扑选择中,介绍了多电平电路以及多电平电路的交错并联。在控制方案选择中,则介绍了一种三角载波移相 PWM 技术,它能

(下转第 733 页)

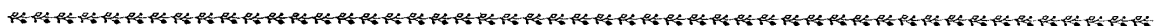
- [8] 卓放,周新,王兆安等. 模块化 PWM 主电路实现的大容量有源电力滤波器,电力系统自动化,2002 年第 16 期,pp. 45—48.
- [9] 卓放,胡军飞,王兆安. 采用多重化主电路实现的大功率有源电力滤波器,电网技术,2000 年第 8 期,pp. 5—7.
- [10] 卓放,何益宏,李红雨,王兆安. 大容量有源电力滤波器实现方法的研究,电力电子技术,2001 年第 2 期,pp. 13—15.
- [11] Woo-Cheol Lee; Taeck-Ki Lee; Sang-Hoon Lee; et al. A master and slave control strategy for parallel operation of three-phase UPS systems with different ratings, APEC '04. 2004 pp. 456 - 462 Vol. 1.
- [12] Bin Shi; Venkataraman, G. ; Parallel operation of voltage source inverters with minimal intermodule reactors, IAS 2004, pp. 162—165.
- [13] Zhihong Ye; Boroyevich, D. ; Jae-Young Choi; Lee, F. C. Control of circulating current in two parallel three-phase boost rectifiers, IEEE Trans. Power Electron. ,2002, Vol. 17, No. 5, pp. 609— 615.
- [14] 姜桂宾,裴云庆,杨旭,王兆安. SPWM 逆变电源的无互联信号线并联控制技术,中国电机工程学报,2003 年 12 期,pp. 94—98.
- [15] 程荣仓,刘正之. 大容量单相逆变装置并联技术的分析,中国电机工程学报,2004 年 07 期,pp. 112—116.
- [16] 周谦之,李定等. 开关-线性复合功率变换技术机理和失效分析,电工技术学报 2002 年第 4 期,pp. 75.
- [17] 周维维,侯振程. 开关型直流稳压系统的一种新的控制方式-交叉双环控制,仪表技术,1989, pp. 2—5.
- [18] 周维维,杜雄. 双频 Buck 变换器,中国电机工程学报,已投稿.

作者简介

王娟,女,1982 年生,重庆大学硕士生,研究方向为变换器理论。

杜雄,男,1979 年生,博士研究生,主要从事变换器理论、有源电力滤波,功率因数校正等方面的研究。

周维维,男,1954 年生,博士,重庆大学电气工程学院教授,博士生导师,高电压与电工新技术教育部重点实验室研究人员,研究方向为电力电子技术,电路理论及应用等。



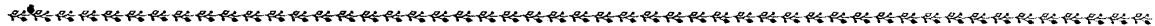
(上接第 739 页)

提高输出的等效开关频率。通过拓扑与控制方案的结合,可以获得高质量的输出波形,这对开关功率放大器是非常重要的。从实验可以看到,单个多电平模块输出 5kHz 时,其 THD 只为 2.65%。

当然,这里还有很多问题要解决,比如多电平电路的中点平衡问题,多电平模块交错并联时的电感电流偏置问题等等,这些都作为下一步的研究工作。

参考文献

- [1] 白威林,李瑞来,张承慧. 一种基于三电平电路的新型开关功率放大器. 电工技术杂志,2003 年第 3 期.
- [2] Isao Takahashi, Fellow and Kazuki Iwaya. 100kHz, 10kW switching type power amplifier using multilevel inverter. 2001 4<sup>th</sup> IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems. Pages: 286—291.



(上接第 764 页)

- [4] Wei Gu, Weihong Qiu, Wenkai Wu, and Issa Batarseh. A Multiphase DC-DC Convert with Hysteretic Voltage Control and Current Sharing. 2002 IEEE. pp. 670—674.
- [5] 林渭勋. “现代电力电子电路”,浙江大学出版社,2004 年 3 月。

- [3] W. H. Lau, B. Zhou, C. K. Lee and Henry Chung. Realization of A Five-Level NPC inverter Using Carrier Phase-shift Technique. Proceedings of IEEE Tencon'02. Pages: 1978—1980.
- [4] 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流器. 高电压技术,第 28 卷,第 7 期,2002 年 7 月.
- [5] 吴洪洋,何湘宁. 级联型多电平变流器 PWM 控制方法的仿真研究. 中国电机工程学报,第 21 卷,第 8 期,2001 年 8 月.

作者简介

陈世杰,男,1979 年生,硕士研究生,现从事电力电子电路拓扑的研究。

王武斌,男,硕士研究生,现从事 DSP 数字控制方面研究。

吕征宇,男,博士,教授,博士生导师,现从事电力电子中的电磁兼容,智能控制,功率变换器和电力电子器件等方面研究。

作者简介

刘日科,男,1972 年生,硕士研究生,方向电力电子与电力传动。

许建平,男,1963 年生,教授,博士生导师,现主要从事高频开关电源的拓扑结构和控制方法的研究。

王凤岩,男,1975 年生,博士研究生,主要从事高频开关电源控制方法的研究。