

# 基于综合调制方法的高频电源设计

孙传杰,田凯,杨敬然,楚子林,马洁

(天津电气科学研究院有限公司,天津 300180)

**摘要:**针对某些特种电气设备的测试需求,设计了一种大功率高频电源。该电源采用H桥级联的方式形成五电平拓扑,采用综合调制方法,包括双极性PWM调制、载波移相SPWM调制以及变载波频率PWM调制技术,从而有效避免了同步调制低频时输出谐波大及异步调制无法兼顾高频与低频输出精度的问题,使电源具有良好的谐波特性,满足了电源在全频率输出范围内的输出精度。对于H桥级联拓扑可能存在的直流电压不平衡问题,设计了一种精简而又在工程上可靠应用的方法。所设计的高频电源已经现场应用于模拟直线发电机的场合,证实了设计方案的可行性。

**关键词:**高频电源;双极性PWM调制;载波移相SPWM调制;变载波频率PWM调制;直流电压平衡

**中图分类号:**TM464 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed23086

## Design of High-frequency Power Supply Based on Integrated Modulation Method

SUN Chuanjie, TIAN Kai, YANG Jingran, CHU Zilin, MA Jie

(Tianjin Research Institute of Electric Science Co., Ltd., Tianjin 300180, China)

**Abstract:** A high-power high-frequency power supply was designed for test requirements of some special electrical equipment. In the power supply, cascaded H-bridge was adopted to form five-level topology structure, the integrated modulation method was adopted, including bipolar PWM modulation, carrier phase-shifted SPWM modulation and variable carrier frequency PWM modulation, so as to avoid the disadvantages of high harmonic output when synchronous modulation at low frequency and low frequency output precision when asynchronous modulation unable to take into account both high frequency and low frequency, make the power supply have good harmonic characteristics, the output precision of the power supply in the full frequency output range was met. A simple and reliable engineering application method was designed to solve the potential problem of DC voltage imbalance in H-bridge cascade topology. The high-frequency power supply designed has been applied in the field to simulate the linear generator, which prove the feasibility of the design scheme.

**Key words:** high-frequency power supply; bipolar PWM modulation; carrier phase-shifted (CPS) SPWM modulation; variable carrier frequency PWM modulation; DC voltage balance

随着特种设备的种类越来越多,针对特种设备的测试电源的设计得到广泛关注。对于大功率变频电源来说,采用多电平变换电路具有很大的优势,主要表现在改善输出谐波含量、提高输出精度以及减小功率元器件耐压等级等,其中H桥级联电路因具有模块化设计和可靠性高等优势得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>。

对于H桥级联多电平电路来说,文献[3-4]对常规SPWM技术、双极性SPWM技术以及载波移

相(carrier phase-shifted, CPS)调制技术进行了分析和比较,阐述了双极性调制以及载波移相调制技术具有输出等效开关频率高、输出谐波低以及优良的传输带宽性能等优势。文献[5]提出的一种新型载波移幅的SPWM调制方法虽然具有一定优势,但结构和控制方法均较为复杂,文献[6]提出优化的载波移相调制方法,利用实时改变载波移相角的方式进一步提高了输出特性,对控制系统要求较高。文献[7]分析了载波移相调制的

**基金项目:**天津电气院科研开发创新基金项目(YF2021ZL004)

**作者简介:**孙传杰(1988—),男,硕士,工程师,Email:sun\_c\_j@126.com

原理,并在七电平中进行应用。在直流母线电压平衡方面,文献[8-10]利用数学模型对载波移相调制和直流母线电压波动的关系进行分析和定量控制,实现了H桥模块的功率平衡。文献[11]提出改变零序分量的方法实现功率平衡控制,文献[12]提出一种电压外环采用滑模控制,电流内环采用PI控制的复杂的双闭环控制策略,并进行了仿真研究。

鉴于本文所述电源的特殊性,改善同步调制和异步调制的各自性能缺点,提出了分段变载波频率的方法,结合载波移相倍频调制技术,使该电源具有良好的输出特性。为进一步提高系统稳定性,并兼顾节约控制器资源,提出了一种改变不同H桥模块调制电压的方法用于改善直流母线电压不平衡问题,各H桥模块间直流母线电压的不平衡,不仅影响输出波形质量,严重的还会使直流母线电压过高或过低而产生系统故障,影响电源运行的稳定性。经过现场实际应用,证实了本文设计的有效性。

### 1 综合调制方法

H桥级联电路由  $N$  个 H 桥串联而成 ( $N \geq 2$ ), 本文选用 2 个 H 桥组成级联电路, 其主回路原理如图 1 所示。

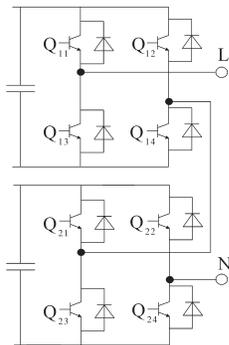


图1 电路原理图  
Fig.1 The schematic of the circuit

#### 1.1 双极性调制

每个H桥输出为三电平,其PWM可采用单极性或双极性调制方法。单极性调制时半个基波周期内为两电平输出,优点是开关次数少、开关器件损耗低,但输出谐波大、波形脉动大、动态响应慢;双极性调制时每个PWM周期均为三电平输出,优点是开关频率相对单极性调制倍频,输出谐波小、波形脉动小、动态响应快。这两种调制方法适于不同应用场合。本文采用双极性PWM方法,满足高频电源对输出高频和高动态响

应要求。双极性调制原理为:用两个相位相反、幅值相同的正弦波作为调制波,与三角载波进行比较,分别得到两个SPWM波相减,即得到单个H桥的输出PWM电压波形,最终H桥的输出电压PWM频率为三角载波频率的2倍,其调制原理如图2所示,其中  $U_c$  为三角载波,  $U_r$  为调制波,  $-U_r$  为调制波取反,  $U_o$  为单个H桥的输出电压。

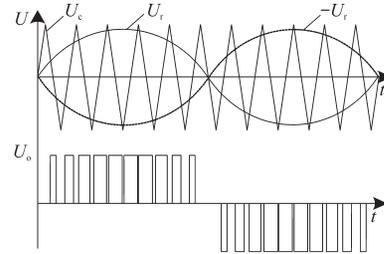


图2 双极性调制原理图

Fig.2 Schematic of bipolar PWM modulation

#### 1.2 载波移相调制

本文所述级联电路采用载波移相调制法, H桥级联电路中的  $N$  个 H 桥采用相同的调制波, 每个 H 桥的三角载波依次相差  $T_c/(2N)$  ( $T_c$  为三角载波的周期), 以本文所述主回路为例, 正半周期调制原理如图 3 所示。

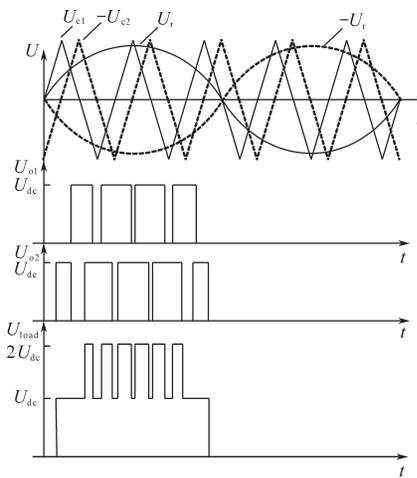


图3 载波移相调制原理图

Fig.3 Schematic of CPS-SPWM

图3中,  $U_{c1}$ ,  $U_{c2}$  分别为第一、第二组H桥的三角载波;  $U_r$  为调制波;  $-U_r$  为调制波取反;  $U_{o1}$ ,  $U_{o2}$  分别为第一、第二组H桥的输出电压;  $U_{load}$  为级联电路的输出电压;  $U_{dc}$  为直流母线电压。

每个H桥模块经过双极性调制后的输出电压进行相加,即得到级联电路最终的输出PWM电压波形,级联电路的输出电压PWM频率是单个H桥输出PWM电压频率的2倍,是三角载波频率的4倍,从而可以在较低的开关频率下使输出电压PWM获得更高的频率,提高系统高频输出精度。

根据以上分析,当单个H桥采用双极性调制,H桥之间使用载波移相调制的条件下,可以获得级联电路输出电压PWM频率与三角载波之间的关系:

$$F_{PWM} = 2 \times N \times F_{\Delta} \quad (1)$$

式中: $F_{PWM}$ 为级联电路输出电压PWM频率; $N$ 为级联电路所含H桥的模块个数; $F_{\Delta}$ 为三角载波频率。

### 1.3 分段变载波频率调制

以载波频率 $F_{\Delta}$ 为基准载波频率,1分频即指异步调制采用载波频率为 $F_{\Delta}$ ,2分频即指异步调制采用载波频率为 $F_{\Delta}/2$ ,4分频即指异步调制采用载波频率为 $F_{\Delta}/4$ ,依次类推,形成分段变载波频率调制,载波频率与输出电压频率的关系如图4所示。

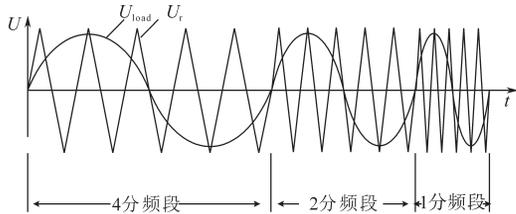


图4 变载波频率PWM调制原理图

Fig.4 Schematic of variable carrier frequency PWM modulation

系统输出低频时,选择较低的载波频率,可避免高载波频率造成的死区影响,提高输出精度;系统输出高频时,选择高载波频率,可有效降低输出电压波形的纹波,从而使全频段的调制比均处在一个较为合理的范围。

## 2 直流电压平衡

由于元器件的差异和调制策略均会对级联电路中各H桥模块的直流电压产生影响,为避免直流母线电压偏移,由两组H桥的直流母线电压 $U_{dc1}$ 与 $U_{dc2}$ 作差,该误差经PI调节器产生输出补偿电流的模值 $U_i$ , $U_i$ 与给定输出电压模值 $U_m$ 相加、相减,则分别产生两组H桥的给定电压模值,从而改变两组H桥模块的调制比,控制框图如图5所示。

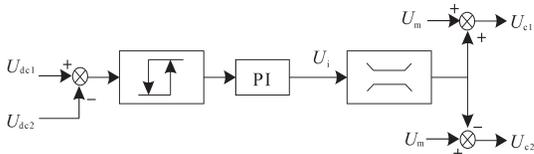


图5 直流电压平衡控制框图

Fig.5 Block diagram of DC voltage balance

经直流电压平衡控制后的两组H桥的给定电压变化如图6所示,当第一组H桥直流电压增高时,通过改变调制电压、提高调制比,增大该组H桥的有功输出;反之亦然。

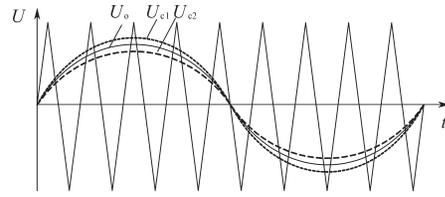


图6 调制电压调制原理图

Fig.6 Schematic of modulating voltage regulation

## 3 设计与实验

该电源首次应用于某直线电机相关的电气设备检验当中,作为直线发电机的模拟电源,输出频率的变化对应其加减速过程,其要求高响应速度、高精度要求,且最高输出频率为2 kHz。

为满足相关技术指标,本文选用基准三角载波频率为20 kHz,采用综合调制的手段,级联电路可输出电压的PWM频率最高达80 kHz。

### 3.1 基准频率的选定

以给定输出电压基波频率2 kHz标定为100%,实际需求的最低启动频率为2.5%,当给定频率在2.5%~20%的区间,选择4分频,载波频率为5 kHz,调制比在12.5以上,电源输出PWM频率为20 kHz;当给定频率在20%~50%的区间,选择2分频,载波频率为10 kHz,调制比在10~25之间变化,电源输出PWM频率为40 kHz;给定频率在50%~100%之间,选择1分频,载波频率为20 kHz,调制比在10~20之间变化,电源输出PWM频率为80 kHz;控制系统根据装置输出频率的具体指令,在线自动分频,实现分段变载波频率的异步调制功能,调制波频率 $F_{PWM}$ 、调制比 $N$ 以及载波频率 $F_{\Delta}$ 三者的关系图如图7所示。

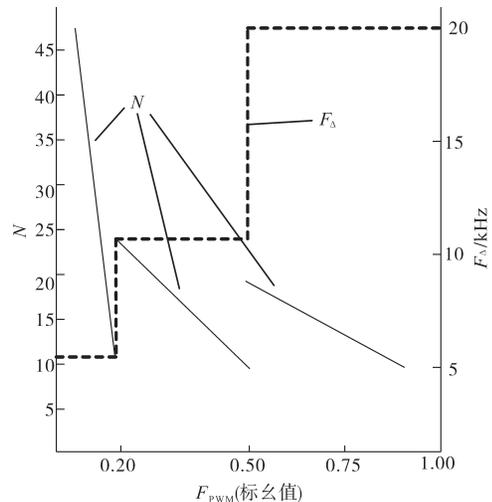


图7 调制波频率、调制比以及载波频率三者的关系图

Fig.7 The relation schematic among  $F_{PWM}$ ,  $N$  and  $F_{\Delta}$

### 3.2 在线曲线拟合

为达到高频下的高响应速度,系统选用开环控制方法,为避免开环控制条件下的输出误差,系统在对特定负载首次运行时,对输出电压与理想输出电压的偏差 $\Delta U$ 进行记录,并通过曲线拟合的方法,获得给定电压的修正值 $U_{cor}$ ,最终对拟合曲线进行存储,其控制策略如图8所示。

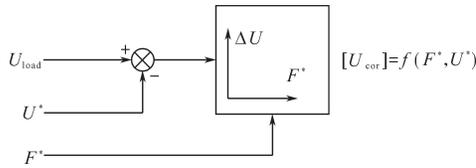


图8 曲线拟合控制框图

Fig.8 The block diagram of control system with curve-fitting

曲线拟合公式为

$$U_{cor} = U^* + a \times F^{*3} + b \times F^{*2} + c \times F^* + d \quad (2)$$

式中: $a, b, c, d$ 为拟合曲线多项式中的系数; $U^*$ 为理想输出电压; $F^*$ 为理想输出频率。

### 3.3 总逻辑框图

根据前文所述给定输出电压曲线拟合查表获得的给定电压修正值,再叠加上由直流电压平衡控制获得的给定电压补偿值,从而改变给定电压模值,经过变载波频率调制、载波移相调制和双极性调制的综合调制方法,使系统输出电压达到精度要求。

总控制逻辑框图如图9所示。

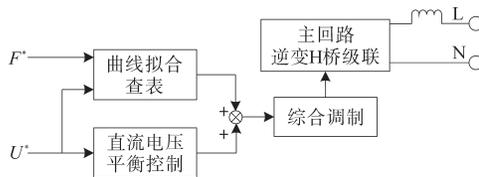


图9 总控制逻辑框图

Fig.9 Block diagram of general control logic

### 3.4 实验结果

图10给出了采用常规异步调制、分频变载波调制以及曲线拟合查表法与理想输出曲线之间的对比,满足了输出精度要求。图10中,输出电压模值 $U$ 和输出频率 $F$ 均为标么化值。

当系统在一组逆变H桥中投入一定功率的不平衡负载时,此时两组逆变H桥的给定电压模值之间出现一个差值,当不平衡负载断开之后,两组逆变H桥的给定电压模值相等(两组逆变H桥的给定电压模值之差为0),如图11所示。

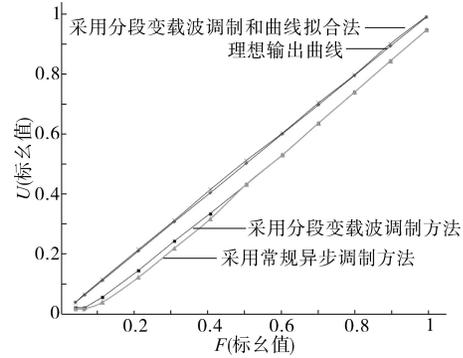


图10 不同模式下输出电压模值对比

Fig.10 Comparison of output modulus voltage value in different modes

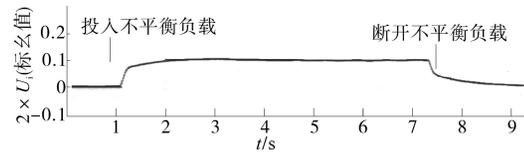


图11 不平衡负载与给定电压模值的关系

Fig.11 Relation between unbalanced load and given voltage modulus

当系统输出电压最高基波频率为2 kHz时的输出波形如图12所示。经验证,该级联电路的设计满足了作为直线发电机特定条件下的模拟电源的作用。

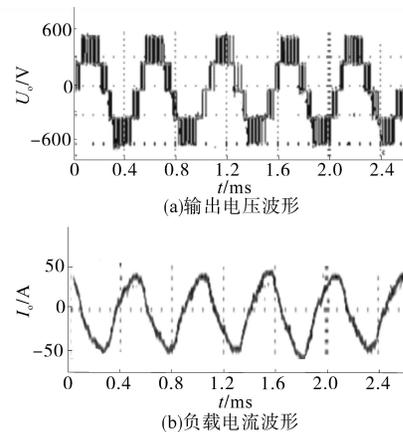


图12 输出电压与负载电流波形

Fig.12 Waveforms of output voltage and load current

图12中,级联电路输出 $U_o$ 为五电平PWM波形,负载电流 $I_o$ 为某特定负载条件下的电流波形。

## 4 结论

根据实际项目需求,采用综合调制方法,设计了该大功率高频电源装置。

1)提出一种综合调制方法,使全频段都处于一个合理的调制比区间。当变频电源低频输出时,采用较低的载波频率,提高低频输出精度,降低了低频输出时的谐波含量;当变频电源高频输

出时,采用较高的载波频率,提高高频输出精度。

2)为抑制直流母线电压不平衡问题,计算H桥直流电压之差,经PI调节后直接反馈的方式对调制电压进行微调,提高了系统稳定性,精简的算法程序也节约了控制器芯片资源。

3)根据直线发电机特定的应用场合,采用曲线拟合查表的方法,满足其高频条件下的高动态响应要求。根据初始给定频率和初始给定电压调整控制过程中的最终给定电压,消除了开环控制过程中,输出电压精度不高的问题。

#### 参考文献

- [1] 吕飞,张松涛,吉哲.多电平变换装置主电路拓扑及控制策略研究[J].船电技术,2020,40(3):12-15.  
Lü Fei, Zhang Songtao, Ji Zhe. Control strategy study on main circuit of multilevel converter topology[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2020, 40(3): 12-15.
- [2] 周京华,汪凡,籍祥,等.级联型H桥储能功率变换系统关键控制策略综述[J].电器与能效管理技术,2018(1):8-17.  
Zhou Jinghua, Wang Fan, Ji Xiang, et al. An overview of key control strategy based on cascaded H-bridge power conversion system[J]. Electrical&Energy Management Technology, 2018 (1): 8-17.
- [3] 张国荣,颜丽花.单极倍频CPS-SPWM传输带宽的研究[J].电力系统保护与控制,2018,46(12):1-8.  
Zhang Guorong, Yan Lihua. Study on the transmission bandwidth of unipolar frequency doubled CPS-SPWM[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 1-8.
- [4] 陈轶涵,郭鸿浩,陈家伟.基于载波移相控制的模块化串并联逆变器非理想条件谐波特性分析[J].电工技术学报,2020,35(8):1690-1704.  
Chen Yihan, Guo Honghao, Chen Jiawei. Analysis of harmonic characteristics in non-ideal conditions of modular series/parallel inverter based on carrier phase shift control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35 (8) : 1690-1704.
- [5] 胡文华,张军仁,董运.一种新型载波移幅SPWM调制策略[J].电气传动,2019,49(8):53-56.  
Hu Wenhua, Zhang Junren, Dong Yun. A new type of carrier shift SPWM modulation strategy[J]. Electric Drive, 2019, 49 (8): 53-56.
- [6] 粟忠来,杨勇,杨波,等.级联H桥变换器的优化载波移相SPWM方法[J].电器与能效管理技术,2019(8):43-52.  
Su Zhonglai, Yang Yong, Yang Bo, et al. The optimization carrier phase-shifted SPWM for cascaded H-bridge converter[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2019(8):43-52.
- [7] 龚秋英,马鑫金,李艳.一种级联型多电平并网逆变器控制策略的研究[J].电气传动,2020,50(11):13-16.  
Gong Qiuying, Ma Xinjin, Li Yan. Research on control strategy of a cascade multi-level grid-connected inverter[J]. Electric Drive, 2020, 50(11):13-16.
- [8] 张利华,姜攀攀.级联五电平电容钳位逆变器及功率平衡控制策略[J].电气传动,2020,50(10):40-45.  
Zhang Lihua, Jiang Panpan. Research on cascaded five-level capacitor-clamped inverter and power balance control strategy[J]. Electric Drive, 2020, 50(10):40-45.
- [9] Wang Kun, Zhou Leyuan, Deng Yan, et al. Application range analysis and implementation of the logic-processed CPS-PWM scheme based MMC capacitor voltage balancing strategy[J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2019, 4(1):1-9.
- [10] Xu Chen, Chen Jingjing, Dai Ke. Carrier-phase-shifted rotation pulse-width-modulation scheme for dynamic active power balance of modules in cascaded H-bridge STATCOMs[J]. Energies, 2020, 13(5):1052.
- [11] 许运华,王清,孟红秀.电网畸变级联H桥逆变器控制研究[J].电气传动,2019,49(10):44-47.  
Xu Yunhua, Wang Qing, Meng Hongxiu. Control research for cascaded H-bridge inverter under grid distortion[J]. Electric Drive, 2019, 49(10):44-47.
- [12] 张承畅,罗建昌,张华誉,等.基于滑模电压控制的级联H桥整流器研究[J].电气传动,2018,48(11):34-38.  
Zhang Chengchang, Luo Jianchang, Zhang Huayu, et al. Research on cascaded H-bridge rectifier based on sliding mode voltage control[J]. Electric Drive, 2018, 48(11):34-38.

收稿日期:2021-02-19  
修改稿日期:2021-05-19