

# 串联谐振用三相变频电源的研制

朱春阳, 朱孟鑫, 孙浩杰, 李洪杰

(西安交通大学, 电气工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:**研制了一种基于多级线性放大机理的串联谐振用三相变频电源(TPVFPS),该 TPVFPS 主要由信号发生单元、初级放大单元和主放大单元组成,通过单片机控制 DDS 芯片和数字电位器产生可调频调幅的信号,经两级线性功率放大,准确输出满足要求的实验波形。其中主放大单元有 6 种工作模式。在阐明 TPVFPS 的拓扑结构和工作原理的基础上,理论分析与计算了其输出效率和带不同性质负载的影响,并通过仿真和实验验证了该 TPVFPS 的可行性和相关输出特性。

**关键词:**变频电源; 串联谐振; 多级线性放大

**中图分类号:** TN86      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-100X(2016)11-0011-03

## Development of Three-phase Variable-frequency Power Supply Used for Series Resonance

ZHU Chun-yang, ZHU Meng-xin, SUN Hao-jie, LI Hong-jie

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** A three-phase variable-frequency power supply (TPVFPS) based on multilevel linear amplification is developed. The TPVFPS is mainly composed of three units: signal generator unit, primary amplification unit and main amplification unit. DDS and digital potentiometer is controlled by single chip microcomputer, which is used to produce sinusoidal signal of different frequency and amplitude. The two stage power amplification ensures sufficient power output of the TPVFPS. Particularly, the main amplification unit has six different working modes. On the basis of illustrating the topological structure and working principle of TPVFPS, theoretically calculates the output efficiency and analyzes the influence with different nature of the load. Additionally, the feasibility and some related output characteristics of TPVFPS are analyzed and verified by simulation and experiment.

**Keywords:** variable-frequency power supply; series resonance; multilevel linear amplification

### 1 引言

绝缘缺陷是导致电力设备故障的重要因素之一,为预防和及时发现其绝缘故障,常对电力设备进行交流耐压实验和局部放电实验<sup>[1]</sup>。可调频调压串联谐振装置设备控制灵活、电源容量要求小、轻便易携,目前已广泛用于电力电缆、GIS 等大容量电力设备的绝缘状态检测中<sup>[2]</sup>。可调频调压串联谐振装置的关键设备是变频电源。目前,变频电源主要分为开关型变频电源和模拟放大型变频电源<sup>[3]</sup>。以上 2 种变频电源目前大多为单相输出,少部分 TPVFPS 主要为开关型变频电源,其难以对电力设备进行局部放电实验。故在此拟研制一种基于多级线性放大机理的 TPVFPS。

### 2 TPVFPS 的拓扑结构及工作原理

此处所研制 TPVFPS 在单相模拟放大大型变频电源系统拓扑结构基础上,采用与图 1 相似的系统拓扑结构和不同的控制方式,实现了标准三相正弦波的多级线性放大。

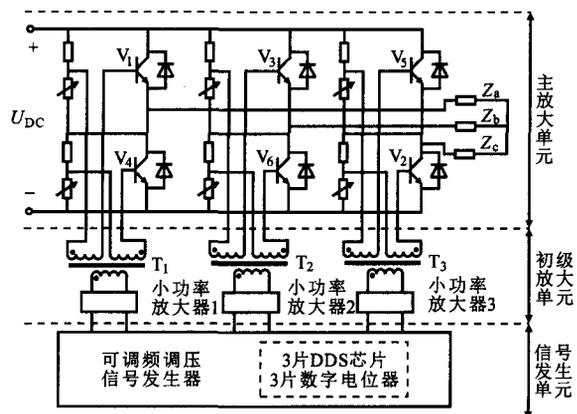


图 1 TPVFPS 的结构拓扑

Fig. 1 Topological structure of TPVFPS

定稿日期: 2016-07-26

作者简介:朱春阳(1991-),男,安徽六安人,硕士,研究方向为电力电子技术在电力设备状态检测中的应用。

TPVFPS 主要由 3 部分构成,分别为信号发生单元、初级放大单元和主放大单元。信号发生单元通过单片机控制 3 片 DDS 芯片,并配合数字电位器,产生可调频调压的标准三相信号源。初级放大单元,由 3 片高保真的音频功率放大器构成。对信号发生单元产生的低功率三相信号进行无失真的功率放大。主放大单元,主要由 6 个桥臂和直流偏置电源构成,是三相变频电源的核心。它将经过初级放大单元的三相信号,线性放大到设计所需的电压和功率要求。

主放大单元电路在 1 个工作周期中有 6 种工作模式,见表 1。上下桥臂待放大信号相位相差 180°,相邻桥臂的待放大信号相位相差 120°。在 1 个周期任何 1 个工作模式中,仅 3 组桥臂导通,且任意时刻,只会出现 2 组上桥臂和 1 组下桥臂或 2 组下桥臂和 1 组上桥臂导通的状态。在 1 个完整的周期中,某个桥臂只在半个周期内处于连续导通。

表 1 主放大单元的工作模式  
Table 1 Working modes of main amplification unit

	工作模式		
	I	II	III
工作时间段	0~π/3	π/3~2π/3	2π/3~π
导通管子	V <sub>1</sub> , V <sub>2</sub> , V <sub>3</sub>	V <sub>1</sub> , V <sub>2</sub> , V <sub>6</sub>	V <sub>1</sub> , V <sub>5</sub> , V <sub>6</sub>
	IV	V	VI
工作时间段	π~4π/3	4π/3~5π/3	5π/3~2π
导通管子	V <sub>4</sub> , V <sub>5</sub> , V <sub>6</sub>	V <sub>3</sub> , V <sub>4</sub> , V <sub>5</sub>	V <sub>2</sub> , V <sub>3</sub> , V <sub>4</sub>

### 3 输出效率的计算与分析

#### 3.1 主放大单元输出功率和损耗

由于线性放大电路有自身发热较严重的缺点,故 TPVFPS 的研制过程中最主要的工作之一就是散热设计<sup>[4]</sup>。主放大单元既是 TPVFPS 的核心,又是其最主要的发热来源。故对其进行输出功率和损耗计算尤为重要,计算过程如下:假定三相电源带三相对称电阻性负载 R<sub>L</sub>。若已知三极管 V<sub>1</sub> 基极待放大信号为 u<sub>v1</sub>=U<sub>om</sub>sin(ωt),则:

$$u_{v2}=U_{om}\sin(\omega t+\pi/3) \quad (1)$$

在一个周期中以 0~π/3 时间段为例,此时的主放大单元的等值电路如图 2 所示。

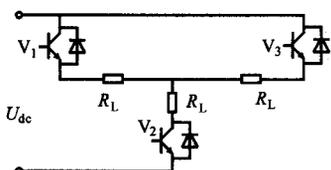


图 2 主放大单元的等值电路

Fig. 2 The equivalent circuit of main amplification unit

若令中性点处为零电位,由式(1)得此时 c 相负载电压为:

$$u_1=-U_o\sin(\omega t+\pi/3) \quad (2)$$

式(2)中输出电压的峰值 U<sub>o</sub> 是 U<sub>om</sub> 放大后的电压值,并且 U<sub>o</sub><U<sub>dc</sub>/√3, U<sub>dc</sub> 为主放大单元的直流偏置电压。那么在 0~π/3 时间段内,TPVFPS 的输入功率为:

$$P_{in}=\frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi/3}U_{dc}\frac{U_o\sin(\omega t+\pi/3)}{R_L}d(\omega t) \quad (3)$$

以此类推可得在 1 个完整的周期内,TPVFPS 的输入功率为:

$$P_V=3U_{dc}U_o/(\pi R_L) \quad (4)$$

在输出电压为 U<sub>o</sub> 时,输出功率为:

$$P_o=3U_o^2/(2R_L) \quad (5)$$

由文献[5]可得,在相同 U<sub>dc</sub> 和负载 R<sub>L</sub> 下,单相变频电源的输入功率为:

$$P_{V0}=2U_{o0}U_{dc}/(\pi R_L) \quad (6)$$

式中:U<sub>o0</sub> 为输出电压峰值, U<sub>o0</sub><U<sub>dc</sub>。

式(6)中输出电压的峰值 U<sub>o0</sub><U<sub>dc</sub>。在 U<sub>o0</sub> 下,单相变频电源的输出功率为:

$$P_{o0}=U_{o0}^2/(2R_L) \quad (7)$$

综上,可绘制出单相和 TPVFPS 的原理示意图见图 3。阴影部分面积为功率损耗部分,阴影部分以下与坐标轴之间的面积是输出功率部分,两部分之和面积为输入功率部分。

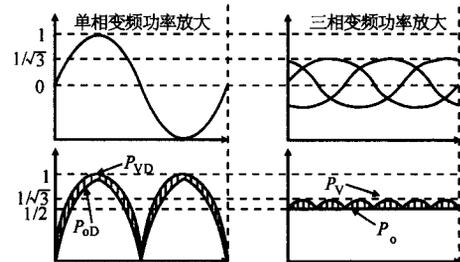


图 3 工作原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of working principle

#### 3.2 系统效率的计算

因主放大单元电路的输入功率约为 TPVFPS 的输入功率,其输出功率即为 TPVFPS 的输出功率,故主放大单元电路的效率可近似等效为变频电源的效率。由式(4),(5)可得,TPVFPS 的效率为:η<sub>1</sub>=P<sub>o</sub>/P<sub>V</sub>=90.69%,故在忽略管压降和输入主放大单元电路的待放大信号足够大的理想情况下,输出效率可达 90.69%。同理,单相变频电源的效率为:η<sub>2</sub>=P<sub>o0</sub>/P<sub>V0</sub>≈78.54%,故在理想情况下,单相变频电源的输出效率仅为 78.54%。

图 4 示出不同输出线电压下,单相变频电源

和 TPVFPS 效率曲线。TPVFPS 较单相变频电源效率有较大幅度提升,表明在相同输出功率情况下,TPVFPS 散热装置可做得更紧凑、轻便。

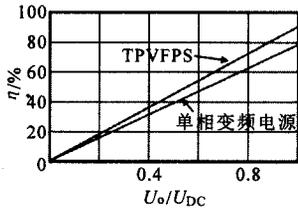


图 4 效率曲线

Fig. 4 Efficiency curve

#### 4 不同性质负载对 TPVFPS 的影响

##### 4.1 纯电阻性负载

串联谐振系统的一个突出优点是,系统工作在谐振状态时,实验电源容量要求较低。当 TPVFPS 输出频率达到系统谐振频率时,其 TPVFPS 等价于带三相对称的纯电阻性负载。由式(4),(5)可得,TPVFPS 的损耗为:

$$P_1 = (3/R_L)(U_d U_j / \pi - U_o^2 / 2) \quad (8)$$

对  $P_1$  关于  $U_o$  进行求导,可得当  $U_o = U_d / \pi$  时,系统的损耗最大,为:

$$P_{1max} \approx 0.152 U_d^2 / R_L \quad (9)$$

令  $U_o = U_d / \sqrt{3}$ ,此时系统的功率损耗为:

$$P_{1rated} \approx 0.051 U_d^2 / R_L \quad (10)$$

由式(9),(10)可得,  $P_{1rated} / P_{1max} \approx 0.338$ 。图 5 为系统损耗随输出电压变化的示意图。系统散热设计时,只有使系统设计的散热功率大于  $P_{1max}$ ,才能使 TPVFPS 在加压全过程中处于安全状态。

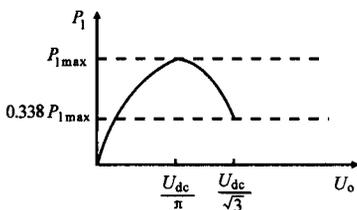


图 5 瞬时功率损耗图

Fig. 5 The instantaneous power loss diagram

##### 4.2 非纯电阻性负载

当串联谐振初始工作时,变频电源相当于带阻容性或阻感性的负载。在寻找到谐振点后,负载才能视为纯电阻性负载。设在系统寻找谐振点的过程中,负载电阻  $R_L = |Z| \cos \theta$ ,其中  $|Z|$  为阻抗的模,  $\theta$  为阻抗角。由式(4),(5)可得,此时损耗为:

$$P_1^* = (1/|Z|)(3U_{DC}U_j/\pi - 3U_o^2 \cos \theta / 2) \quad (11)$$

当  $|Z|$  一定时,阻感性或阻容性负载的  $0 < \cos \theta < 1$ ,而纯阻性负载的  $\cos \theta = 1$ ,由式(11)可得,非纯电

阻性负载情况下的损耗大于纯电阻性负载情况下的损耗。在 TPVFPS 带纯电感性或纯电容性负载时,系统损耗  $P_1^* = 3U_d U_j / (\pi |Z|)$ ,即系统全部的输入有功功率全部损耗在管耗上。

综上可得,设计 TPVFPS 的散热系统时,先确定整套电源装置的散热功率  $P_s$ ,且  $P_s > P_{1max}$ ;再考虑在寻找谐振点的过程中系统带的是阻感性或阻容性负载,且  $P_s$  要留取适当的裕度;最后在系统调频升压过程中,要先寻找谐振频率再升压,这样有利于减小非纯电阻性负载对系统的热损坏。

#### 5 仿真和实验

采用 Multisim 仿真过程中,结合串联谐振性质和三极管饱和压降对输出电压的影响,  $U_d = 120 \text{ V}$ ,  $R_L = 4.3 \ \Omega$ ,额定输出总功率为 1 050 W。仿真得到 TPVFPS 在额定情况下输出波形见图 6。

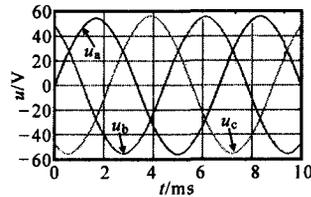


图 6 仿真波形

Fig. 6 Simulation waveforms

输出波形光滑、畸变小,TPVFPS 设计基本满足输出要求。

研制了一套模拟放大型 TPVFPS,输出功率达 1 050 W。主要器件为单片机 STC89C52,DDS 芯片 AD9834,数字电位器 AD5160,小功率放大器 TDA2030,三极管 NJW21994G。主放大电路中每个桥臂是由多个大功率三极管 NJW21994G 串并联得到。 $U_d = 120 \text{ V}$ ,  $R_L = 4.3 \ \Omega$ 。图 7a 为 TPVFPS 额定输出时波形,对比图 6,图 7a 可得,仿真与实验基本吻合;对额定输出时三相电压进行傅里叶分析可得各相输出电压总谐波畸变率(THD),图 7b 为三相输出电压中 THD 最大相分析结果,可见,研制的 TPVFPS 实际输出电压 THD 小于 1%,畸变较小,输出波形满足设计要求;图 7c 为在同一输出频率 150 Hz 和相同三相对称电阻负载下,THD 随输出电流变化关系曲线,可见,输出电压 THD 均小于 1%,畸变率较小,随着电流变化,THD 变化程度也较小,表明输出电流对 THD 影响较小;图 7d 为不同输出频率下,输出电流随输出频率变化关系,可见,输出频率在 20~100 Hz 范围变化时,输出电流变化较大;频率在 100~400 Hz 范围变化时,输出电流变化较小。

(下转第 26 页)

出电压缓慢平稳上升逐渐建立直至平直,没有明显过冲现象,满足设计要求;图 12b 为输入电感电流波形,电感工作于电流连续模式;图 12c 为稳态时输出电压波形,电压纹波为  $1\text{V}/380\text{V} \approx 0.26\%$ 。实验表明系统具有良好的动静态性能。

调节调压器输入电压分别为 24 V, 48 V, 79 V, 设定输出目标电压为 380 V。测试数据绘得变换器效率曲线如图 13 所示,满载下效率高达 93.4%。

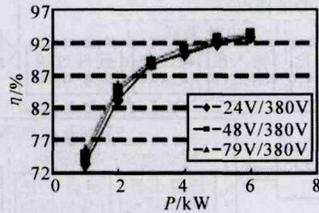


图 13 效率曲线

Fig. 13 Efficiency curves

### 7 结论

对燃料电池 DC/DC 变换器进行设计研究得出:使用 IBFBC 作为主电路分析设计能满足宽输入、大升压、高效率的应用要求;以 TMS320F28335 为主控制芯片,设计了 IBFBC 主控制电路、驱动电路、采样电路等。建立了交流小信号模型,进行

PID 校正确定 PI 值大小并运用 PSIM 仿真验证了系统具有良好的动静态性能。

### 参考文献

- [1] 曹建国,廖然,杨利花.燃料电池电动汽车发展现状与前景[J].新材料产业,2015,13(4):58-63.
- [2] 谢涛,谢运祥,胡炎申,等.光伏发电系统高增益 DC/DC 变换器的研究[J].低压电器,2011,21(8):17-22,35.
- [3] Boscaino V, Miceli R, Buccella C, et al. Fuel Cell Power System With LLC Resonant DC/DC Converter[A]. In Electric Vehicle Conference[A]. IEEE International, IEEE, Florence[C]. 2014: 1-6.
- [4] SeungWoon Lee, KyuSik Choi, BoHyung Cho, et al. A Center-tapped Forward-flyback DC/DC Converter for Low Power Application[A]. Energy Conversion Congress and Exposition[C]. 2013: 4882-4886.
- [5] 吴红飞,刘薇,邢岩.一族宽输入电压范围正激变换器拓扑[J].中国电机工程学报,2012,32(36):29-35.
- [6] Pereira F, Ferreira A, Sobrado V, et al. Push-pull DC/DC Converter With Planar Transformer for PV Applications[A]. Conference of the IEEE Industrial Electronics Society[C]. 2013: 1180-1184.
- [7] Rani B I. Design and Control of Isolated Bi-directional DC/DC Converter for Photovoltaic Applications[A]. IEEE International Conference on Electrical[C]. 2015: 6306-6313.

(上接第 13 页)

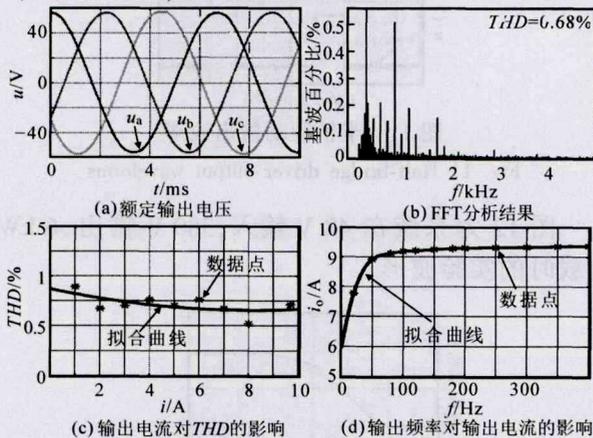


图 7 实验波形

Fig. 7 Experimental waveforms

### 6 结论

在此通过理论分析、仿真研究与实验验证,对三相变频电源的工作方式、系统特性以及实现的可行性开展了相关研究,具体结论为:①给出三相变频电源的系统拓扑结构,由 3 个单元和 2 级线性放大构成;阐述了三相变频电源的工作原理,其中,主放大电路在 1 个工作周期中由 6 种工作模

式组成;②同等输出功率情况下,三相变频电源效率高于单相模拟放大变频电源。与开关型变频电源相比,所研制的三相变频电源畸变较小、高频干扰少,可同时满足对三相电力设备进行耐压实验和局部放电实验的需求;③开展了仿真与实际实验的对比研究,证明了研制的三相变频电源的可行性。实验表明表明,输出电流对总谐波畸变率影响较小,不同输出频率段对输出频率影响不同。

### 参考文献

- [1] 仇新艳,李付亮,彭春燕,等.特高压变压器交流耐压及局部放电实验装置[J].高压电器,2009,45(4):94-96.
- [2] 张文亮,张国兵.特高压 GIS 现场工频耐压实验与变频谐振装置限频方案原理[J].中国电机工程学报,2007,27(24):1-4.
- [3] 黄新波,程文飞,张周熊,等.智能型高压变频串联谐振实验电源设计[J].电力自动化设备,2013,33(8):157-161.
- [4] 刘江明.变频电源在电力变压器局部放电试验中的应用研究[D].杭州:浙江大学,2011.
- [5] 康华光.电子技术基础-模拟部分(第 5 版)[M].北京:高等教育出版社,2006.