

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.06.023

高压直流 UPS 电源的研究

王 侃, 李威辰, 杨 波, 何湘宁*
(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对传统通信基站 UPS 供电电源存在的系统结构复杂、电源效率低、可靠性差的问题,研究采用了一种两级结构的高压直流 UPS 电源。在电路结构方面,电源前级采用了 T 型三电平整流电路,改善了输入功率因数和输入电流 THD;后级采用了输入串联输出并联型全桥电路,并采用交错并联技术,减小了输出电流纹波。在控制方面,引入了负载电流前馈控制,提高了电源的动态响应速度,保证电源在负载剧烈波动时输出电压纹波很小。研究表明,高压直流 UPS 电源的最高效率为 96%;其负载突变时恢复时间小于 200 μs ,电压波动小于 5%,动态响应快,输出特性好。

关键词:高压直流 UPS 电源;高效率;高可靠性;负载电流前馈控制

中图分类号:TM762.1

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)06-0760-05

Research of high voltage DC uninterrupted power system

WANG Kan, LI Wei-chen, YANG Bo, HE Xiang-ning
(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at solving the problem of complicated structure, low efficiency, low reliability of the traditional UPS, a high voltage DC UPS was proposed. About the circuit structure, by using the T type three-level rectification circuit as the front-stage circuit of the power supply, the input power factor and THD of input current was improved. By using input-series and output-parallel full-bridge converter as the post-stage circuit, which was applied the interleaving parallel technique, the output current ripple was depressed. By using a new feed-forward control of the load current when the load fluctuated violently, the dynamic performance was improved and the ripple of output voltage was depressed. The results indicate that the maximum efficiency of the power supply is 96%. The recovery time is less than 200 μs and the fluctuation of the output voltage is less than 5% when the load fluctuates violently. It has fast dynamic response and good output characteristic.

Key words: high direct voltage UPS; high efficiency; high reliability; load-current feed-forward control

0 引 言

随着现在越来越多的信息数据化,通信服务器基站的数量也在不断增加,而通信基站中电源的可靠性和效率是关注的重点。一方面,电源的可靠性直接决定机站的稳定性,即使是瞬间的供电中断都会使通信基站全部中断或者瘫痪;另一方面,通信电源的转换效

率影响着电能的损耗,2009 年,我国服务器拥有量约为 366 万台,全国数据中心总耗电量约为 364 亿 kWh,约占当年全国用电量的 1%^[1],至 2015 我国数据中心总量已超过 40 万个,年耗电量超过全社会用电量的 1.5%^[2],电能消耗量很大,电源效率的提升所能节省的电相当可观。

国内传统的通信基站供电电源有工频 UPS 电源、高频 UPS 电源和 -48 V 直流电源 3 种^[3]。工频 UPS

收稿日期:2015-12-28

作者简介:王 侃(1989-),男,浙江杭州人,硕士研究生,主要从事高压直流 UPS 通信电源方面的研究. E-mail:196150042@qq.com

通信联系人:何湘宁,男,教授,博士生导师. E-mail:hxn@zju.edu.cn

电源出现最早,其缺陷也较多,包括结构复杂、输入功率因数低、电流谐波含量大、效率低、噪声污染大、蓄电池匹配能力差、电网适应能力差、体积和重量大等,现已慢慢被淘汰。高频 UPS 电源克服了工频 UPS 电源输入功率因数低、电流谐波含量大和噪声污染大的缺点,并在效率、体积和重量上有了一定改善^[4]。但其结构仍需经过 AC-DC、DC-AC 和 AC-DC 三级变换才能给服务器供电,结构复杂。且蓄电池仍挂接于第一级整流电路输出直流母线上,蓄电池与服务器之间仍有两级电路,可靠性较低。针对交流 UPS 电源存在的问题,研究人员提出了直流电源供电方案并研制了-48 V 直流通信电源。其采用了两级电路结构,前级电路实现功率因数校正和整流功能,后级电路实现隔离和 DC-DC 变换功能,结构简单,体积小重量轻,电源最高效率可达 92%^[5]。且其蓄电池直接挂接于电源输出与通信服务器之间,在发生断电时能瞬时给服务器供电,可靠性高。但因其输出电压为 48 V,导致其输出电流非常大,需要线径较大的线缆,增加了线缆成本和布置难度。为了解决以上问题,高压直流 UPS 电源方案受到了越来越多的关注。根据国际电联 (ITU) 制定的国际标准 ITU L. 1200 和 ITU L. 1201,高压直流 UPS 电源的国际标准输出电压范围为 260 V ~ 400 V,过渡电压范围为 192 V ~ 288 V^[6]。中国国内早期以 240 V 输出电压等级作为过渡,现已逐渐靠近国际标准。

本研究介绍一种输出直流电压为 380 V,采用两级结构的高压直流 UPS 电源系统。在电路结构上,电源前级采用 T 型三电平整流电路,后级采用输入串联输出并联型全桥电路;在控制上,通过引入负载电流前馈控制,提高电源的动态响应速度,保证电源在负载剧烈波动时的稳定输出。本研究针对所提出的方案制作功率为 15 kW 的一台样机,并给出相应实验波形。

1 主电路结构

主电路由两级电路组成。前级为实现整流和功率因数调整功能的 T 型三电平整流电路,后级为实现输出电压调整和隔离功能的输入串联输出并联型全桥电路。

1.1 前级三相 T 型三电平整流电路及工作原理

多电平 PWM 整流技术已逐渐成为功率因数校正技术 (power factor correction, PFC) 的主流,而其中的三电平整流技术较两电平整流技术性能更加优越,其优点如下:

(1) 所使用开关器件少;

(2) 开关管所需承受电压应力仅为直流母线电压的一半、能有效减小器件开关损耗;

(3) 三电平电路开关时因为承受的电压变化小,可以减小电力电子装置产生的电磁干扰;

(4) 三电平电路输入电流波形更接近正弦波,减小了输入电流的 THD,可以有效减小滤波电感,从而减小装置体积,降低成本。

本研究所采用的电路为 T 型三电平整流电路,电路原理图如图 1 所示。

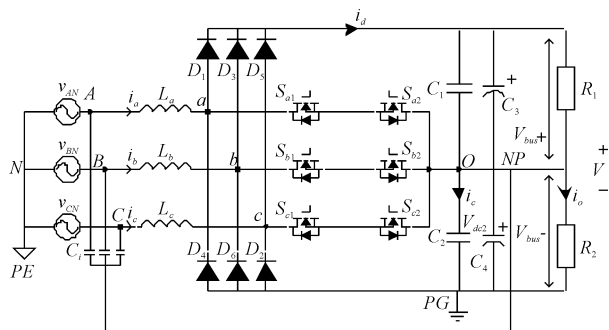


图1 三相 T 型三电平整流电路原理图

L_a, L_b, L_c —输入端起储能和滤波作用的电感; $D_1 \sim D_6$ —升压二极管; $S_{a1}, S_{a2}, S_{b1}, S_{b2}, S_{c1}, S_{c2}$ —三路双向导通的开关通路; C_1, C_2 —正负母线滤波电容; C_3, C_4 —正负母线储能电解电容

其工作原理可参考 T 型三电平逆变电路和 VIEN-NA 整流电路^[7-8]。

1.2 后级交错并联型 DC/DC 变换电路及工作原理

在 DC/DC 变换电路中,变换器的输出功率通常与功率开关管数量成正比^[9],所以本研究选择双管隔离型变换器。其中移相全桥电路与 LLC 谐振转换电路相比,其多模块并联均流控制简单,所以本研究选用了移相全桥电路。整流电路输出母线电压最大值为 800 V,为了减小其对开关管的电压应力,并且减小输出电流纹波,本研究采用了输入串联输出并联的结构,并应用了交错并联技术,其优点如下:

(1) 每个单元全桥电路功率开关器件的电压电流应力仅为原来的一半,降低了开关损耗;

(2) 该电路输入侧上下母线自然均压,产生自然母线中电,降低了控制系统设计难度;

(3) 该电路能有效降低输出电流纹波,减小输出滤波电感的体积和重量。

该变换器电路原理图如图 2 所示。其由两个移相全桥电路单元组成,两个单元工作频率都为 100 kHz,经副边全桥整流电路后电流纹波频率为 200 kHz,为了使减小输出电流纹波,两单元之间错开 90° 相角进行

驱动控制,每个单元内部采用典型的移相控制方式^[10]。其中, V_{bus+} 和 V_{bus-} 是两个单元的输入,两者自然均压幅值相等;为了提高电源效率, $Q_1 \sim Q_8$ 采用了 8 个 COOLMOSFET 开关管, $D_1 \sim D_8$ 分别为 $Q_1 \sim Q_8$ 的体二极管, $C_1 \sim C_8$ 分别是 $Q_1 \sim Q_8$ 的寄生电容; L_{L1} 和 L_{L2} 是谐振电感,主要由变压器的漏感组成,帮助开关管实现软开关。记 $Q_1 \sim Q_4$ 所在电路为 A 单元, $Q_5 \sim Q_8$ 所在电路为 B 单元。

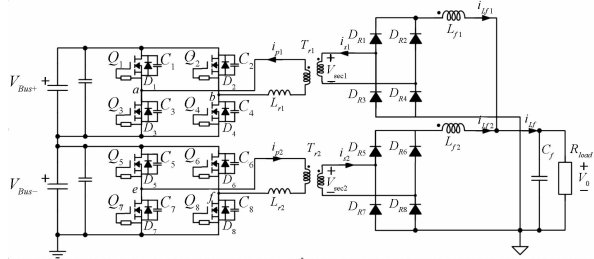


图2 输入串联输出并联型交错并联移相全桥电路

该电路整体工作波形如图3所示。

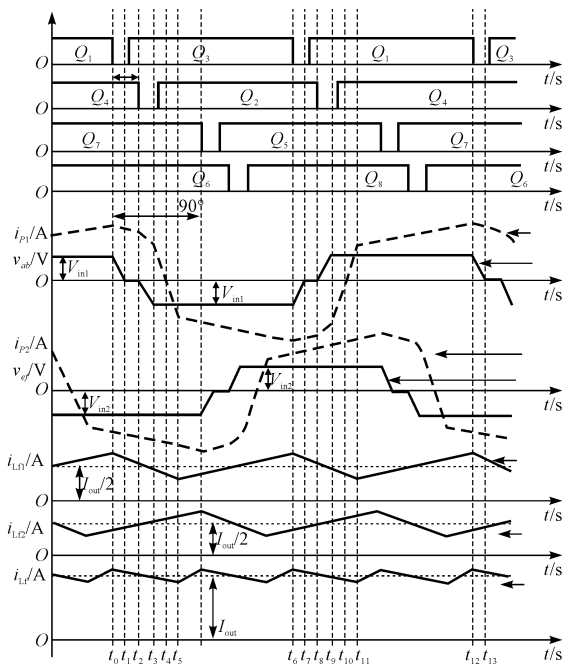


图3 电路工作波形

以 A 单元为例,移向控制其基本工作原理如下,每个桥臂的两个开关管均为互补导通,且设有死区,其中 Q_1 、 Q_3 (Q_5 、 Q_7)组成超前臂能实现零电压开关, Q_4 、 Q_2 (Q_8 、 Q_6)组成滞后臂能实现零电流开关。两个桥臂相应开关管的驱动信号之间相差一定的移相角 δ ,通过调节移相角的大小来调节输出电压幅值,移相角越小,输出电压越高,反之则越低。两单元的输出电流 i_{L1} 和 i_{L2} 相差 180° 相位,如图3所示,两者合并后的电流 i_L 的电流纹波大大小于单个单元电流纹波的两倍,减小了输出电流纹波,同时能减小输出滤波电感和滤波电容的大小。

2 负载电流前馈控制

2.1 传统电压电流双闭环控制

前级 AC/DC 电路和后级 DC/DC 电路的传统电压电流双闭环 PI 控制框图分别如图4所示。其有很好的稳态特性,稳态精度高。

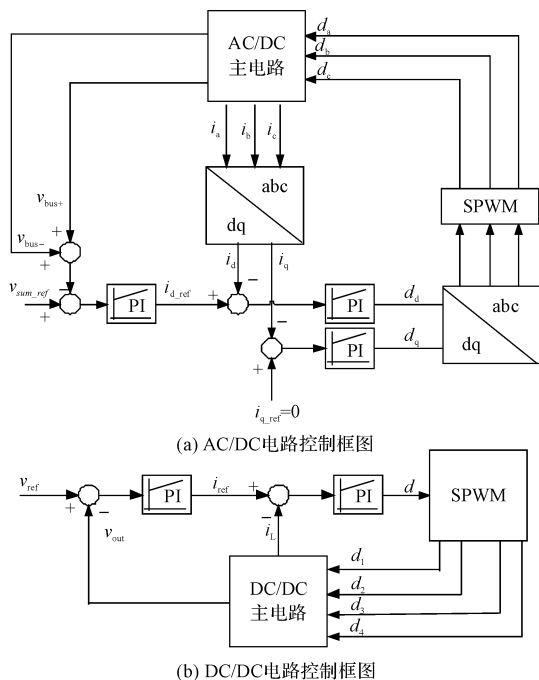


图4 传统双闭环控制框图

AC/DC 电路控制框图如图4(a)所示,其中电压环作为外环,电压环的控制较为简单,将输出直流母线上的正母线电压 V_{bus+} 和负母线电压 V_{bus-} 进行相加,将相加值与电压基准 v_{sum_ref} 做比较,将比较值再经过 PI 运算器运算所得输出作为电流环的基准 i_{d_ref} ;电流环作为内环,电流环的控制较为复杂,首先对流经电感 L_a 、 L_b 、 L_c 的电流 i_a 、 i_b 、 i_c 进行 dq 变换,将 abc 自然坐标系下的电流转换为 dq 旋转坐标系下的电流 i_d 和 i_q ,电流环的控制思路是通过控制 d 轴电流 i_d ,实现母线电压的控制,通过控制 q 轴电流 i_q 使其为 0,实现网侧单位功率因数控制。

DC/DC 电路控制框图如图4(b)所示,其中外环由输出电压 v_{out} 反馈电路形成,内环由霍尔采样输出电感电流 i_L 形成。在该双环控制中,由电压外环控制电流内环,即内环电流在每一开关周期内上升,直至达到电压外环设定的误差电压阈值,电流内环是瞬时快速进行逐个脉冲比较工作的,并且监测输出电感电流 i_L 的动态变化,电压外环只负责控制输出电压。

2.2 引入负载电流前馈的电压电流双闭环控制

传统双闭环控制能获得非常理想的稳态特性,但

引入负载电流前馈后负载突变时波形如图 7 所示。

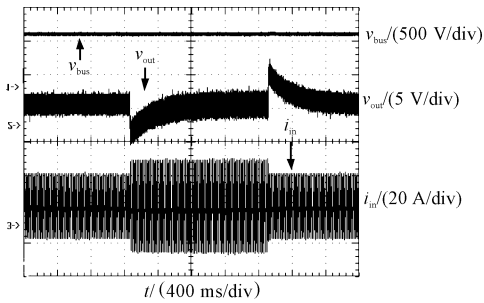


图 7 引入负载电流前馈后负载突变时波形

从 50% 负载突变为 75% 负载时波形如图 8 所示。

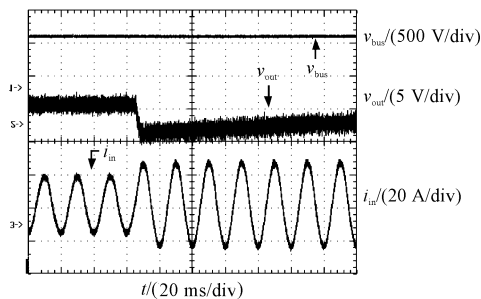


图 8 从 50% 负载突变为 75% 负载时的波形

从 75% 负载突变为 50% 负载时的波形如图 9 所示。

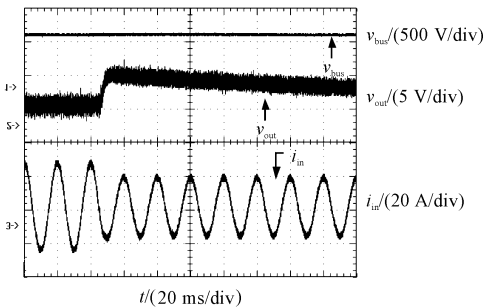


图 9 从 75% 负载突变为 50% 负载时的波形

本研究所做样机效率曲线如图 10 所示。

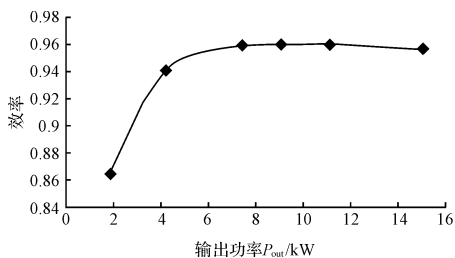


图 10 效率曲线

在 50% 负载至 75% 负载之间系统效率较高,最高效率为 96%,相对传统 -48 V 直流电源和高频 UPS 电

源提高了 3% ~ 4% 的效率。

4 结束语

本研究提出了一种高压直流 UPS 电源的设计方案,并进行了参数设计,研制了一台 15 kW 样机。采用了前级三相 T 型三电平电路和后级交错并联型移相全桥电路,电路结构简单,最高效率高达 96%,在控制方面引入了负载电流前馈控制,实验证明其动态性能良好,负载突变时系统跟随非常及时。

本研究仍存在不足之处。首先在输出电流较小的轻载工作状态下系统不稳定,后续研究中考虑在轻载下使用其他控制模式;另外 DC/DC 电路中全桥整流电路的二极管尖峰使用了电阻吸收,后续研究中可改进为能量回馈电路吸收。

参考文献 (References):

- [1] 郭亦兴. 数据中心电源系统分析与节能探讨[D], 西安: 长安大学信息学院, 2013.
- [2] 工信部联合. 三部门联合印发国家绿色数据中心试点工作方案[J]. 石油和化工节能, 2015(3): 1-4.
- [3] 郑子欣. 基于单片机实现 48 V 直流开关电源的监控及模块休眠功能研究[D]. 广东: 华南理工大学电子信息学院, 2013.
- [4] 肖 斌, 曲学基. 高频机 UPS 与工频机 UPS 优劣势分析-访肖斌高级工程师[J]. 电源技术应用, 2010, 17(9): 19-21.
- [5] 宋卫平. 高压直流通信电源中高频开关整流模块的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学自动化学院, 2012.
- [6] 刘希禹, 祁澎泳. 电信和数据中心高压直流供电系统的目标电压范围(260 V_{DC} ~ 400 V_{DC}) [J]. 电源世界: 标准解读, 2014, 17(7): 59-65.
- [7] 权运良. 三相三线制 VIENNA 整流器的研究与设计[D]. 广州: 华南理工大学电力学院, 2014.
- [8] KOLAR J K, ZACH F C. A Novel Three-Phase Utility Interface Minimizing Line Current Harmonics of High-Power Telecommunications Rectifier Modules[J]. IEEE Transactions on industrial electronics, 1997, 44(4): 456-467.
- [9] 林渭勋. 现代电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [10] 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: 科学出版社, 1999.
- [11] 马海啸, 龚春英. 负载电流前馈双闭环控制逆变器的研究[J]. 南京邮电大学学报: 自然科学版, 2012, 32(3): 30-35.

[编辑: 周昱晨]

本文引用格式:

王 侃, 李威辰, 杨 波, 等. 高压直流 UPS 电源的研究[J]. 机电工程, 2016, 33(6): 760-764.

WANG Kan, LI Wei-chen, YANG Bo, et al. Research of high voltage DC uninterruptible power system[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016, 33(6): 760-764.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>