

DOI: 10.13382/j.jemi.B2307123

基于 Buck-Boost 逆变电路的低纹波可调直流稳压电源控制方法*

谈宜雯^{1,2} 张小平^{1,2} 李毅凡^{1,2}

(1. 湖南科技大学信息与电气工程学院 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学海洋矿产资源探采装备与安全技术国家地方联合工程实验室 湘潭 411201)

摘要: 为克服传统低纹波直流稳压电源的主电路拓扑结构存在电路结构复杂、体积大等不足,提出一种基于 Buck-Boost 逆变电路的新型可调直流稳压电源拓扑结构,用 Buck-Boost 逆变环节取代传统结构中高频逆变和变压器升压两个环节,此结构相较于传统结构,在电路结构上可以得到明显的简化。为实现该新型可调直流稳压电源输出低纹波、高稳定度直流电压的要求,针对其 Buck-Boost 逆变电路提出采用基于比例积分-矢量比例积分的复合控制方法,即以 Buck-Boost 逆变电路中电容电压和电感电流作为状态变量,并以电感电流为控制内环,电容电压为控制外环,通过对两个闭环采用比例积分-矢量比例积分复合控制方法,实现对两个状态变量的解耦控制,最后通过仿真与实验对其效果进行了验证,同时与传统低纹波直流稳压电源进行了对比分析。结果表明,文中提出的基于 Buck-Boost 逆变电路的新型可调直流稳压电源拓扑结构及针对该拓扑结构所提出的控制方法不仅输出直流电压纹波小、稳态精度高、动态性能好同时还具有电路结构简单且输出直流电压任意可调等特点,因而具有较好的应用价值。

关键词: 低纹波直流稳压电源; Buck-Boost 逆变电路; 控制策略; 对比分析

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Control method of low ripple adjustable DC regulated power supply based on Buck-Boost inverter circuit

Tan Yiwen^{1,2} Zhang Xiaoping^{1,2} Li Yifan^{1,2}

(1. College of Information and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology Department, Xiangtan 411201, China; 2. National-Local Joint Engineering Laboratory of Marine Mineral Resources Exploration Equipment and Safety Technology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to overcome the deficiencies of the traditional low ripple DC regulated power supply's main circuit topology, such as complex circuit structure and large size, a new type of adjustable DC regulated power supply topology based on Buck-Boost inverter circuit is proposed to replace the two links of high frequency inverter and transformer step-up in the traditional structure with the Buck-Boost inverter link, which can be significantly simplified in terms of the circuit structure compared with the traditional structure. Compared with the conventional structure, this structure can be simplified significantly in terms of circuit structure. In order to realize the requirement of low ripple and high stability DC voltage output from this new type of adjustable DC regulated power supply, a composite control method based on proportional-vector proportional-integral is proposed for the Buck-Boost inverter circuit, that is, the capacitor voltage and inductor current in the Buck-Boost inverter circuit are taken as the state variables, and the inductor current is taken as the inner loop of the control, and the capacitor voltage is the outer loop of the control, and the two closed loops are decoupled by adopting proportional-vector proportional-integral composite control method. The decoupling control of the two state variables is realized by adopting the proportional-integral-vector proportional-integral composite control method for the two closed loops, and finally the effect is verified by simulation and experiment, and at the same time compared and analyzed with the traditional low ripple DC regulated power supply. The results show that the new adjustable DC regulated power supply topology based on Buck-Boost inverter circuit proposed in

收稿日期: 2023-12-11 Received Date: 2023-12-11

* 基金项目: 湖南省自然科学基金省市联合基金(2021JJ50123)项目资助

the paper and the control method proposed for the topology not only have small output DC voltage ripple, high steady-state accuracy and good dynamic performance, but also have the features of simple circuit structure and arbitrary adjustable output DC voltage, which are of good application value.

Keywords: low ripple DC regulated power supply; Buck-boost inverter circuit; control strategy; comparative analysis

0 引言

直流稳压电源在国民经济各领域得到了广泛应用^[1-3],而其应用效果则与其技术性能密切相关,如对于扫描电镜、透射式电镜等精密仪器设备来说,其分辨率就直接取决于其直流供电电源输出电压的纹波系数^[4],因此如何有效降低其输出电压纹波对于提高上述仪器设备的技术性能具有重要意义。

目前国内外在有关低纹波直流稳压电源方面已开展了大量研究,提出了诸如整流-高频逆变-变压器升压-整流等多种主电路方案^[5-7],虽然在输出电压纹波及稳定度等方面都取得了较好的效果,但仍均存在电路结构复杂、体积大等不足。为此,本文从改变直流稳压电源主电路拓扑结构出发,提出一种基于 Buck-Boost 逆变电路的新型可调直流稳压电源主电路结构。该结构相较于目前各种低纹波直流稳压电源主电路方案,在电路结构上得到了明显的简化;然而要实现该直流稳压电源输出低纹波、高稳定度直流电压的控制要求,则仍需研究采用相应有效的控制方法,尤其对于其 Buck-Boost 逆变电路来说,其控制效果将是决定该直流稳压电源能否达到上述技术性能的关键因素,因此对其研究相应有效的控制方法将具有重要意义。

而在针对有关 Buck-Boost 变换器的控制方面目前也已开展了大量研究并提出了多种控制方法。其中,文献[8]针对 Buck-Boost 矩阵变换器提出采用滑模控制策略,实现了系统的稳定运行,并对系统模型误差与参数变化具有较好的鲁棒性;为进一步提高该变换器的动态性能与抗干扰能力,文献[9]对其提出采用双闭环控制策略,取得了较好的效果,但存在稳态控制精度不高的不足;为此,文献[10]针对该变换器提出采用基于重复控制的复合控制策略,有效克服了上述稳态控制精度不高的问题。此外,文献[11]针对非反向 Buck-Boost 变换器提出一种新型死区补偿控制技术,实现了其升降压模式间的平滑转换,并有效抑制了其输出电压纹波;文献[12]针对四开关 Buck-Boost 变换器提出一种基于电感电流均方根值最小的恒频 ZVS 控制方法,有效提高了系统的运行效率;文献[13]则针对基于 Buck-Boost 矩阵变换器的异步电机调速系统提出采用有限时间控制方法,实现了其异步电机的高性能调速控制;文献[14]针对四开关 Buck-Boost 变换器提出采用模型预测电流控制,有效

提高了其电压调节性能并简化了控制方案;文献[15]针对 Buck-Boost 功率变换器提出采用基于线性扩张状态观测器的滑模控制策略,提高了系统的稳态和动态性能及抗扰动能力;文献[16]针对四开关 Buck-Boost 变换器提出采用多模式模型预测控制策略,实现了其不同工作模式间的平滑切换并提高了变换器的动态性能;文献[17]针对储能系统双向 Buck-Boost 变换器提出采用基于自抗扰控制与模型预测控制相结合的双闭环控制策略,有效提高了变换器的调节性能等。

然而上述针对 Buck-Boost 变换器所提出的各种控制方法虽然都取得了程度不同的控制效果,但其变换器均限于工作于低频状态下;而对于本文所提出的新型可调直流稳压电源拓扑结构来说,其 Buck-Boost 逆变电路则工作于中频状态,由于工作频率的大幅提高,致使现有控制方法均难以满足其控制要求。为此,文中针对其 Buck-Boost 逆变电路提出一种基于比例积分-矢量比例积分的复合控制方法,取得了较好的效果。文中对该控制方法的基本原理与具体实现过程进行了说明,并对其效果进行了实验验证。

1 新型可调直流稳压电源基本工作原理

如图1所示,本文所提出的基于 Buck-Boost 逆变电路的可调直流稳压电源主电路拓扑结构包括三相 PWM 整流电路、三相交错并联 Buck-Boost 逆变电路及三相桥式不可控整流电路3个部分。其中,三相 PWM 整流电路用于将三相输入交流电压整流为 PWM 调制的直流电压;三相交错并联 Buck-Boost 逆变电路由3组 Buck-Boost 升降压电路采用相位交错并联的方式构成,其特点是通过调节电路中功率开关的占空比,可实现其输出电压与频率的任意调节,且具有直接输出高品质正弦波而无需滤波环节等特点,通过该逆变电路可将三相 PWM 整流电路输出的 PWM 调制直流电压直接逆变为幅值和频率任意可调的三相对称中频正弦交流电压,也即该逆变电路同时具有中频逆变和升压两方面功能,可取代传统低纹波直流稳压电源中“高频逆变+变压器升压”两个环节,且可获得比这两个环节更好的输出电压波形质量;而三相桥式不可控整流电路则将三相交错并联 Buck-Boost 逆变电路输出的三相中频正弦交流电压整流为直流电压。

出电流、逆变电路输入侧直流电压以及电容电压实际值,计算得到电感电流控制内环中电感的参考电流;根据所得电感的参考电流,同时实时检测其电感电流实际值,其偏差同样经比例积分-矢量比例积分复合控制算法处理,得到电感电压的参考值;根据该电感电压参考值以及上述所得逆变电路输入侧直流电压及电容电压实测值,经相关运算处理得到 Buck-Boost 逆变电路中对功率开关的占空比,根据所得占空比及相应的开关周期,对 Buck-Boost 逆变电路中对功率开关进行控制,即可实现该直流稳压电源实际输出直流电压准确跟踪其参考输出电压的控制目标。具体过程如下:

1) 确定 Buck-Boost 逆变电路参考输出电压为消除直流稳压电源实际输出直流电压与设定的参考输出电压间的稳态误差,针对其 Buck-Boost 逆变电路提出一种基于其参考输出电压幅值自适应调整的补偿控制方法,其基本原理是:首先根据设定的直流稳压电源参考输出电压得到其 Buck-Boost 逆变电路参考输出电压幅值的初始值,再根据直流稳压电源实际输出直流电压与其参考输出电压间的偏差并经 PI 控制算法处理,得到其 Buck-Boost 逆变电路参考输出电压幅值的补偿值,利用该补偿值对 Buck-Boost 逆变电路参考输出电压幅值进行补偿后,可达到有效消除该直流稳压电源实际输出直流电压与其参考输出电压间稳态误差的目的。根据上述补偿控制原理,可得 Buck-Boost 逆变电路参考输出电压为:

$$u_{ref} = \left(\frac{U_{DCref}}{\sqrt{3}} + L^{-1} [G_1(s) \cdot \Delta U(s)] \right) \sin(\omega t + \theta) \quad (3)$$

式中: U_{DCref} 为直流稳压电源参考输出电压, $G_1(s)$ 为 PI 控制器传递函数, $\Delta U(s)$ 为直流稳压电源实际输出直流电压与其参考输出电压间偏差的拉普拉斯象函数, ω 和 θ 分别为 Buck-Boost 逆变电路参考输出电压的角频率和初始相位角。

2) 电压电容电压控制外环基本原理

根据式(3)所得 Buck-Boost 逆变电路的参考输出电压,可得该逆变电路中电容的参考电压为:

$$u_{Cref} = k \left(\frac{U_{DCref}}{\sqrt{3}} + L^{-1} [G_1(s) \cdot \Delta U(s)] \right) + u_{ref} \quad (4)$$

式中: k 为直流偏置电压系数, u_{ref} 为 Buck-Boost 逆变电路的参考输出电压。

根据上述所得电容的参考电压,同时实时检测其实际电压,其偏差经比例积分-矢量比例积分复合控制算法处理,得到电容的参考电流为:

$$i_{Cref} = L^{-1} [G_2(s) \cdot \Delta u_c(s)] \quad (5)$$

式中: $G_2(s)$ 为电容电压控制外环中比例积分-矢量比例积分复合控制器的传递函数,其函数关系式为:

$$G_2(s) = a + \frac{b_1 s^2 + b_2 s + b_3}{c_1 s^3 + c_2 s^2 + c_3 s} \quad (6)$$

式中: $a = K_{CP}/r_c$, $b_1 = -K_{CP} + r_c CK_{Cl} + 2r_c CK_{CV}$, $b_2 = -25K_{CP}\omega^2 + 2r_c CK_{CR}$, $b_3 = -25K_{Cl}r_c C\omega^2$, $c_1 = r_c^2 C$, $c_2 = r_c$, $c_3 = 25r_c(1 + r_c C)\omega^2$, K_{CP} 和 K_{Cl} 分别为比例积分控制的比例系数和积分系数, K_{CV} 和 K_{CR} 分别为矢量比例积分控制的比例系数和增益系数,且有 $K_{CR} = 8K_{CV}R/\pi^2 L$, R 为负载电阻, r_c 为电容 C 的等效电阻。

根据式(6)计算得到电容的参考电流值,同时实时检测 Buck-Boost 逆变电路的实际输出电流及该逆变电路输入侧直流电压与电容电压实际值,根据式(7)计算得到 Buck-Boost 逆变电路中电感的参考电流值,具体为:

$$i_{Lref} = \frac{(i_{Cref} - i)(u_c + \bar{u}_{dc})}{\bar{u}_{dc}} \quad (7)$$

式中: i 为 Buck-Boost 逆变电路实际输出电流值, u_c 为电容电压实际值, $\bar{u}_{dc}$ 为 Buck-Boost 逆变电路输入侧直流电压值。

3) 电感电流控制内环基本原理

根据式(7)所得电感参考电流,同时实时检测其实际电流,其偏差经比例积分-矢量比例积分复合控制算法处理,得到电感的参考电压为:

$$u_{Lref} = L^{-1} [G_3(s) \cdot \Delta i_L(s)] \quad (8)$$

式中: $G_3(s)$ 为电感电流控制内环中比例积分-矢量比例积分复合控制器的传递函数,其函数关系式为:

$$G_3(s) = \frac{d_1 s^3 + d_2 s^2 + d_3 s + d_4}{e_1 s^4 + e_2 s^3 + e_3 s^2 + e_4 s} \quad (9)$$

式中: $d_1 = K_{LP}$, $d_2 = K_{LI} + 2K_{LV}$, $d_3 = 2K_{LR} + 25K_{LP}\omega^2$, $d_4 = 25K_{LI}\omega^2$, $e_1 = L$, $e_2 = r_L$, $e_3 = 25L\omega^2$, $e_4 = 25r_L\omega^2$, K_{LP} 和 K_{LI} 分别为比例积分控制的比例系数和积分系数, K_{LV} 和 K_{LR} 为矢量比例积分控制的比例系数和增益系数,其中 $K_{LR} = 8K_{LV}R/\pi^2 L$, R 为负载电阻, r_L 为电感 L 的等效电阻。

根据式(8)计算得到电感参考电压值,同时根据上述实时检测所得 Buck-Boost 逆变电路输入侧直流电压及电容电压实际值,计算得到 Buck-Boost 逆变电路中对功率开关的占空比^[9],具体表达式为:

$$d = \frac{u_c + u_{Lref}}{u_c + \bar{u}_{dc}} \quad (10)$$

通过上述所得占空比 d 及相应的开关周期,对 Buck-Boost 逆变电路中对功率开关进行控制,即可实现该直流稳压电源实际输出直流电压与其参考输出电压保持一致的控制目标。

3 仿真分析

为了验证本文所提出的新型可调直流稳压电源拓扑

结构及其控制方法的效果,采用 MATLAB 构建相应的仿真模型进行验证。设该直流稳压电源主电路参数如表 1 所示,所采用的比例积分-矢量比例积分复合控制相关控制参数如表 2 所示,并设三相输入交流电压为 380 V/50 Hz,Buck-Boost 逆变电路输出电压频率取 1 kHz,仿真分稳态分析和动态分析两种情况进行,具体如下。

表 1 直流稳压电源主电路参数

Table 1 Main circuit parameters of DC regulated power supply

参数	数值
Buck-Boost 电路中电感 L	7 μ H
Buck-Boost 电路中电容 C	9 μ F
输出滤波电容 C_f	100 μ F
负载电阻 R	100 Ω

表 2 比例积分-矢量比例积分相关控制参数

Table 2 PI-VP Irelated control parameters

参数	数值
外环比例积分控制的比例系数 K_{CP}	5.538
外环比例积分控制的积分系数 K_{CI}	4.99×10^{-4}
外环矢量比例积分控制的比例系数 K_{CV}	0.8
外环矢量比例积分控制的增益系数 K_{CR}	9.2×10^6
内环比例积分控制的比例系数 K_{LP}	6.856
内环比例积分控制的积分系数 K_{LI}	7.32×10^{-4}
内环矢量比例积分控制的比例系数 K_{LV}	0.5
内环矢量比例积分控制的增益系数 K_{LR}	5.79×10^6

3.1 稳态分析

稳态分析在于验证该直流稳压电源输出直流电压的稳态精度和纹波系数^[19-20]。任取该直流稳压电源输出直流参考电压分别为 200 和 400 V,得到相应的输出直流电压仿真波形分别如图 3 和 4 所示,其仿真结果如表 3 所示。

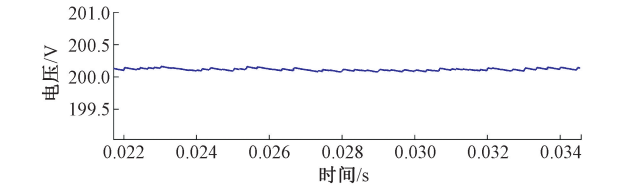


图 3 参考电压为 200 V 时的输出直流电压波形
Fig. 3 Output DC voltage waveform at 200 V reference voltage

表 3 仿真结果

Table 3 Simulation results

输出参考电压 U_{DCref}/V	稳态精度/%	纹波系数/%
200	0.007	0.041
400	0.007	0.049

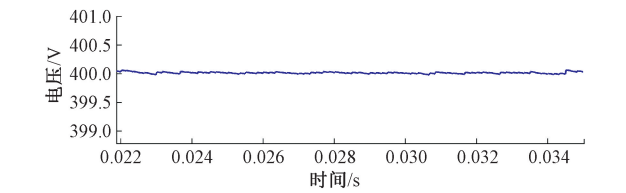


图 4 参考电压为 400 V 时的输出直流电压波形
Fig. 4 Output DC voltage waveform at 400 V reference voltage

3.2 动态分析

动态分析在于验证该直流稳压电源在负载发生突变时对其输出直流电压稳定度的影响,并以负载调整率作为衡量其稳定度的技术指标^[21]。如任取输出直流参考电压为 300 V,并任取系统运行至 0.03 s 时接入 60 Ω 负载电阻,即其负载电流由 0 A 突变至 5 A,其输出电压和电流仿真波形如图 5 所示,其负载调整率指标如表 4 所示。

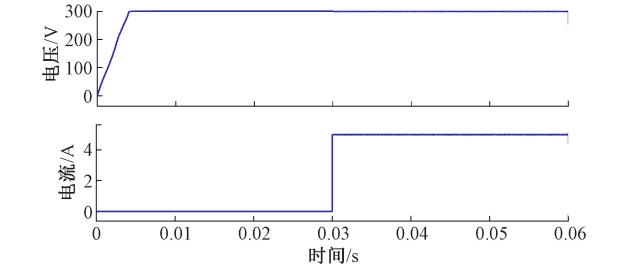


图 5 负载突变时的输出直流电压和电流波形
Fig. 5 Output DC voltage and current waveforms during sudden load change

表 4 仿真结果

Table 4 Simulation results

输出参考电压 U_{DCref}	负载调整率
300 V	0.07%/A

结合图 5 及表 4 可见,针对基于 Buck-Boost 逆变电路的低纹波可调直流稳压电源所提出的控制方法,在突然接入外部负载时,其负载调整率仅为 0.05%/A,输出电压波形基本不受影响,说明该控制方法具有良好的带负载能力及动态性能。

3.3 对比分析

为了进一步验证本文所提直流稳压电源拓扑结构(简称为本结构)的稳压控制效果,将其与文献[5]所提出的基于三相谐振变换器的直流稳压电源拓扑结构(简称为对比结构)进行对比分析,其主电路参数与文献[5]中保持一致。同时为便于比较分析,仍取其输出直流参考电压分别为 200 和 400 V,则得到相应的输出直流电压波形分别如图 6 和 7 所示,其仿真结果如表 5 所示。

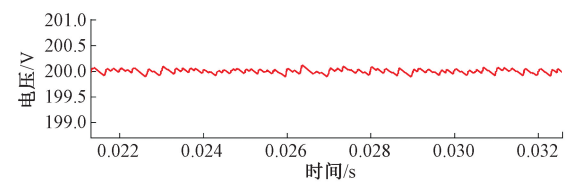


图 6 参考电压为 200 V 时的输出直流电压波形

Fig. 6 Output DC voltage waveform at 200 V reference voltage

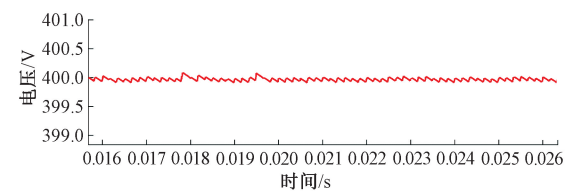


图 7 参考电压为 400 V 时的输出直流电压波形

Fig. 7 Output DC voltage waveform at 400 V reference voltage

表 5 对比结构的仿真结果

Table 5 The simulation results of comparison of structural

输出参考电压 U_{DCref}/V	稳态精度/%	纹波系数/%
200	0.18	0.20
400	0.19	0.26

另外,针对两种电源拓扑结构所用主电路器件数量进行比较分析,得到两种结构的主电路器件数量如表 6 所示。

表 6 两种结构的主电路器件数量

Table 6 Number of main circuit devices for both structures

元器件	本结构	对比结构
变压器	0	3
电容	4	14
电感	3	3
功率开关	12	12
整流二极管	6	6

根据表 3、5 及 6 可见,本文提出的基于 Buck-Boost 逆变电路的低纹波可调直流稳压电源拓扑结构相对于其对比结构,具有如下特点:

1) 稳态控制精度方面:对于任取的 200 和 400 V 参考输出电压,本结构所达到的稳态精度均为 0.007%,而对比结构的稳态精度则分别为 0.18% 及 0.19%,也即在上述两种参考电压下,本结构相对于其对比结构的稳态精度分别提高了 96.1% 及 96.3%,可见本结构及其控制方法具有更好的稳态电压控制精度。

2) 纹波系数方面:同样在 200 和 400 V 参考输出电压下,本结构相对于其对比结构,其输出直流电压纹波系数分别下降了 79.5% 和 81.1%,可见本结构及其控制方

法具有更好的输出电压纹波抑制能力。

3) 在主电路所用器件数量方面:根据表 6 可见,相对于对比结构,本结构减少了 3 个变压器和 10 个电容器,因而有效简化了主电路拓扑结构,极大降低了电源装置的体积、重量及成本。

4 实验研究

为进一步验证本文所提出的基于 Buck-Boost 逆变电路的低纹波可调直流稳压电源及其控制方法的效果,研制了如图 8 所示的实验装置。其中,控制器采用型号为 TMS320F28335 的 DSP,主电路功率开关采用英飞凌 IHW30N120R2 型 IGBT,各主电路参数和相关控制参数与仿真时保持一致,输出参考电压为 200 和 400 V 时对应的输出直流电压波形分别如图 9 和 10 所示,其对应的局部放大图则分别如图 11 和 12 所示,相关实验结果如表 7 所示。

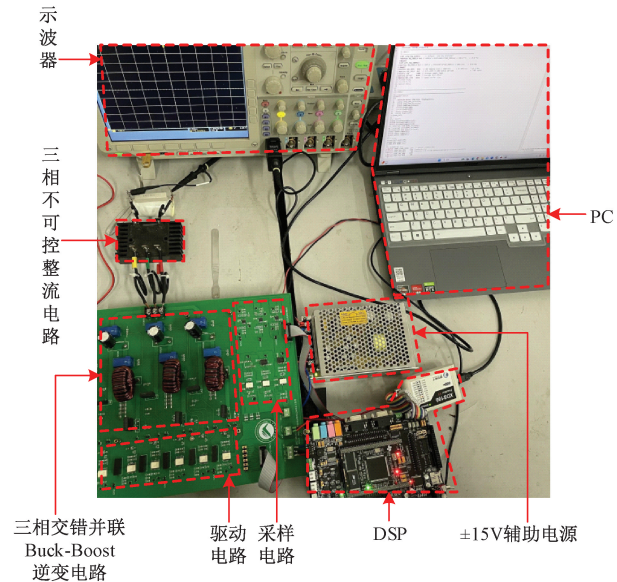


图 8 实验装置

Fig. 8 Experimental setup

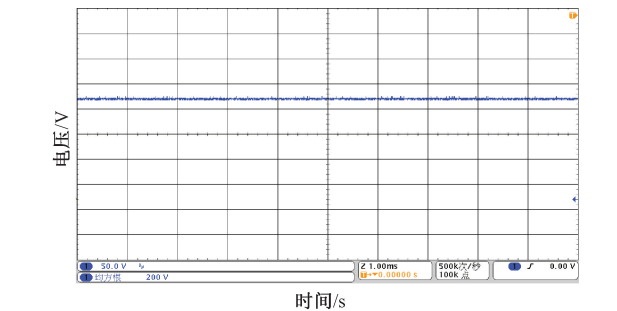


图 9 参考电压为 200 V 时的输出直流电压波形

Fig. 9 Output DC voltage waveform at 200 V reference voltage

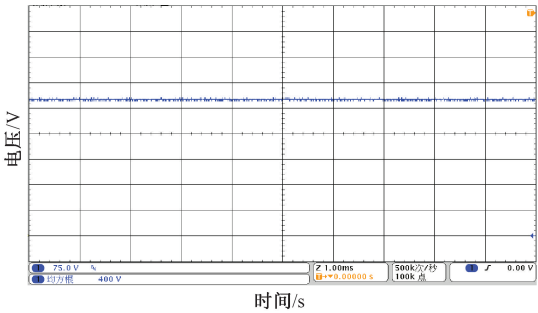


图 10 参考电压为 400 V 时的输出直流电压波形
Fig. 10 Output DC voltage waveform at 400 V reference voltage

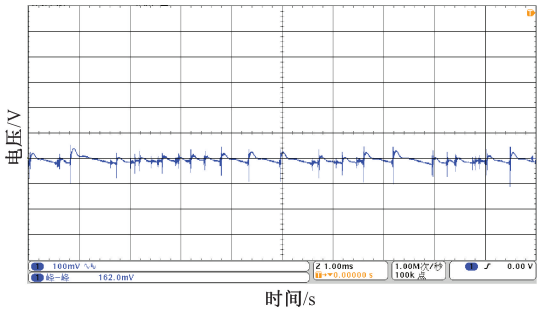


图 11 参考电压为 200 V 时的局部放大图
Fig. 11 Localized magnified view with reference voltage of 200 V

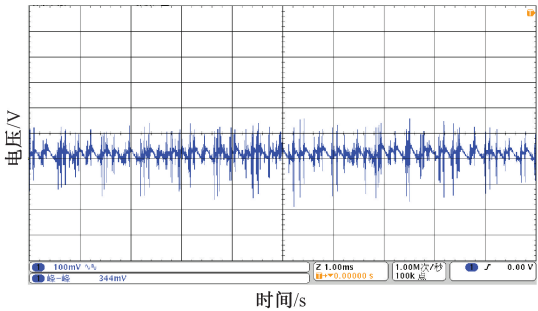


图 12 参考电压为 400 V 时的局部放大图
Fig. 12 Localized magnified view with reference voltage of 400 V

表 7 实验结果		
Table 7 Experimental results		
输出参考电压 U_{DCref}/V	稳态精度/%	纹波系数/%
200	0.014	0.081
400	0.019	0.086

综合表 3、5 及 7, 可得仿真与实验的对比结果如表 8 所示。

由表 8 可见, 其实验结果与仿真结果基本吻合, 从而进一步验证了本文所提直流稳压电源拓扑结构及其控制方法的有效性。

表 8 仿真与实验的对比结果
Table 8 Comparative results of simulation and experiment (%)

	稳态精度		纹波系数	
	200 V	400 V	200 V	400 V
对比结构仿真结果	0.18	0.19	0.20	0.26
本结构仿真结果	0.007	0.007	0.041	0.049
本结构实验结果	0.014	0.019	0.081	0.086

5 结 论

为克服传统低纹波直流稳压电源存在电路结构复杂等不足, 提出一种基于 Buck-Boost 逆变电路的新型可调直流稳压电源拓扑结构, 并针对其 Buck-Boost 逆变电路提出采用基于比例积分-矢量比例积分复合控制的双闭环控制策略。文中介绍了该新型拓扑结构的基本工作原理, 研究了比例积分-矢量比例积分复合控制的具体设计方法, 并通过仿真和实验对其效果进行了验证, 同时与传统基于三相谐振变换器的直流稳压电源拓扑结构进行了对比分析, 结果表明, 本文所提新型可调直流稳压电源拓扑结构及其控制方法具有输出直流电压稳态精度高、纹波小、动态性能好以及电路结构与控制算法简单等特点, 因而具有较好的实际应用价值。

参考文献

[1] 姜月明, 俞洋, 彭喜元. 基于关键特征提取和 Elman 神经网络的开关电源多参数辨识[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(7): 11-19.

JIANG Y M, YU Y, PENG X Y. Multi-parameter identification of switch mode power supply based on key features and Elman neural network [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(7): 11-19.

[2] 黄海宏, 颜碧琛, 王海欣. 改进灰色 GM(1,1) 模型的 EAST 快控电源输出电流预测[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(5): 128-136.

HUANG H H, YAN B CH, WANG H X. Prediction of output current of EAST fast control power supply based on improved grey GM (1, 1) model [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(5): 128-136.

[3] HWANG F, HEN Y, JAYARAM S H. Low-ripple compact high-voltage DC power supply [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42(5): 1139-1145.

[4] 李亚维, 谢敏, 蓝欣, 等. 200 kV 低纹波高稳定度直流高压电源[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(1):

- 120-124.
- LI Y W, XIE M, LAN X, et al. A 200 kV high voltage DC power supply with high stability and low ripple[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(1): 120-124.
- [5] AHN S H, RYOO H J, GONG J W, et al. Low-ripple and high-precision high-voltage DC power supply for pulsed power applications [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42(10): 3023-3033.
- [6] ZARGHANI M, MOHSENZADE S, HADIZADE A, et al. An extremely low ripple high voltage power supply for pulsed current applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(8): 7991-8001.
- [7] SAHA T, BAGCHI A C, ZANE R A. Analysis and design of an LCL-T resonant DC-DC converter for underwater power supply [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 36(6): 6725-6737.
- [8] 张小平, 朱建林, 唐华平, 等. 一种新型 Buck-Boost 矩阵变换器[J]. 信息与控制, 2008, 36(1): 40-45.
- ZHANG X P, ZHU J L, TANG H P, et al. A novel Buck-Boost matrix converter [J]. Information and Control, 2008, 36(1): 40-45.
- [9] 张小平, 朱建林, 唐华平, 等. 新型 Buck-Boost 矩阵变换器的双闭环控制策略[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(2): 203-208.
- ZHANG X P, ZHU J L, TANG H P, et al. A double-loop control strategy for the new Buck-Boost matrix converter [J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(2): 203-208.
- [10] 张小平, 唐水平, 周兰, 等. Buck-Boost 矩阵变换器的复合控制策略[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(6): 931-936.
- ZHANG X P, TANG SH P, ZHOU L, et al. Composite control strategy for Buck-Boost matrix converter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(6): 931-936.
- [11] CALLEGARO L, CIOBOTARU M, PAGANO D J, et al. A simple smooth transition technique for the noninverting buck-boost converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 33(6): 4906-4915.
- [12] ZHOU Z, LI H, WU X. A constant frequency ZVS control system for the four-switch buck-boost DC-DC converter with reduced inductor current [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 34(7): 5996-6003.
- [13] 刘继, 张小平, 张瑞瑞. 基于 Buck-Boost 矩阵变换器的异步电机调速系统控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 156-162.
- LIU J, ZHANG X P, ZHANG R R, et al. Control strategy of induction motor speed control system based on Buck-Boost matrix converter [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 156-162.
- [14] LI X, LIU Y, XUE Y. Four-switch buck-boost converter based on model predictive control with smooth mode transition capability[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68(10): 9058-9069.
- [15] LINARES-FLORES J, JUAREZ-ABAD J A, HERNANDEZ-MENDEZ A, et al. Sliding mode control based on linear extended state observer for dc-to-dc buck-boost power converter system with mismatched disturbances [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(1): 940-950.
- [16] 吴岩, 王玮, 曾国宏, 等. 四开关 Buck-Boost 变换器的多模式模型预测控制策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(10): 2572-2583.
- WU Y, WANG W, ZENG G H, et al. Multi-mode model predictive control strategy for the four-switch Buck-Boost Converter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(10): 2572-2583.
- [17] 龚春阳, 林嘉伟, 黄冬梅, 等. 储能系统双向 Buck-Boost 变换器控制策略研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(2): 229-238.
- GONG CH Y, LIN J W, HUANG D M, et al. Research on control strategy of bidirectional Buck-Boost converter in energy storage system [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2023, 44(2): 229-238.
- [18] 张夏辉, 韩民晓, 杨景刚, 等. 直流侧电压波动对 MMC 的环流影响机理分析及抑制方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(15): 122-131.
- ZHANG X H, HAN M X, YANG J G, et al. Analysis on influence mechanism of DC-side voltage fluctuation on circulating current of modular multilevel converter and its suppression method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(15): 122-131.
- [19] 马海啸, 严仰光. 半桥双降压式逆变器的电压谐振控制策略[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(7): 66-70.
- MA H X, YAN Y G. Voltage resonant control strategy for half-bridge dual-Buck inverters [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(7): 66-70.
- [20] 张葆青. 100 kV/25 mA 低纹波高压直流电源研制[J]. 强激光与粒子束, 2023, 35(8): 135-139.
- ZHANG B Q. Development of 100 kV/25 mA high voltage DC power supply with lower ripple [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2023, 35(8): 135-139.
- [21] 来新泉, 王晓光, 叶强, 等. 新型高速高精度峰值电流

模 PWM 控制结构设计[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(3): 84-87.

LAI X Q, WANG X G, YE Q, et al. Peak current-mode PWM control structure with high speed and high precision[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2010, 38(3): 84-87.

作者简介



谈宜雯, 2021 年于湖南科技大学潇湘学院获得学士学位, 现为湖南科技大学硕士研究生, 主要研究方向为电力电子与电力传动。

E-mail: 1299367901@ qq. com

Tan Yiwen received a B. Sc. degree from Xiaoxiang College of Hunan University of Science and

Technology in 2021. She is currently a M. Sc. candidate in the College of Information and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology Department. Her main research interests include power electronics and power transmission.



张小平(通信作者), 博士, 现为湖南科技大学博士生导师, 教授, 主要研究方向为电力电子与电力传动、智能控制等。

E-mail: zxp836@ 163. com

Zhang Xiaoping (Corresponding author), Ph. D. He is currently a professor and Ph. D. supervisor at Hunan University of Science and Technology. His research interests include power electronics and power transmissions, intelligent control, and power transmission.