

一种新型的双向交流调压稳压电源

孙频东, 顾雪峰, 陈雪丽, 郭怡倩

(南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 将用于直流电压变换的 Boost 或 Buck 电路应用到交流变压上, 去掉了体积庞大的变压器, 不仅有可能使电源的体积减小, 能量转换效率提高, 还可以使变压电路的输出电压实现连续变化和微调, 在需要稳压的场合采用闭环控制, 使电源的输出电压更加稳定. 在对电路工作原理进行分析和推导的基础上, 用仿真软件进行了校验, 在样机上进行实验后, 给出了实验结果, 结果证明理论和推算正确.

[关键词] 变流器, 变流电源, 脉宽调制, 电压调节

[中图分类号] TN 86 **[文献标识码]** B **[文章编号]** 1672-1292(2009) 01-0018-05

A Novel Bi-direction AC Power Source With Regulated Output Voltage

Sun Pingdong, Gu Xuefeng, Chen Xueli, Guo Yiqian

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract With extensional application of Boost or Buck electric circuit converted by DC converters on AC converted, a novel regulated AC source has been proposed. Compared to the traditional transform, the new AC power source can achieve smaller size, higher efficient and continuously variable output voltage in power conversion, and the output of voltage is not affected by load when the feedback control loop is used in the AC source. Having analyzed the principle of communication and control strategy of the AC source in detail, at the end of the paper we have presented the results of a computer simulation and model test. The results prove that theory and deduction are correct.

Key words converter, AC source, pulse-width modulation, voltage regulator

交流电压的变换虽然能借助于交流电压变压器方便地进行, 但变压器庞大的体积和固定的变比在实际使用中常感到不便. 传统的使用晶闸管构成的交流调压电路, 存在许多缺点, 如体积大、成本高、谐波含量大和转换效率低等, 能否借助于直流电压的电压升降原理, 将其用到交流电压的升、降中来, 是一个值得研究的问题. 目前国际和国内的高校和研究机构都已在这方面开展了初步研究, 相关论文也有发表见文献 [1-4]. 本文将从新的基础上, 提出另一种形式的实用电路. 通常在小功率的应用场合下, 常以单相、降压和要求电压稳定为主, 考虑基于 Buck 电路的降压方式, Buck 电路已成功地在直流电源的降压电路中获得应用; 当需要升压时, 即在某些应用场合下, 需要有高于电源电压时, 可以采用基于 Boost 电路的升压方式, 同样, 在直流电压变换中, Boost 电路也是一个很成熟的电路; 如果需要提升或降低的是三相电源, 也有对应的直流变换电路可供选用.

1 交流变压电路及工作原理

在交流电压变换过程中, 要用到可控的双向电子开关, 有多种双向开关可供使用, 但其中 IGBT 的数目不尽相同, 使用较少的 IGBT 可以减少触发电路的复杂性.

1.1 双向开关

由 IGBT 及辅助二极管构成的双向开关如图 1 所示, 采用图 1(a) 需要 2 个带反并联二极管的 IGBT 管, 对于不带反并联二极管的开关器件还可以采用如图 1(b) 所示的开关结构, 图 1(c) 所示的双向开关, 只带有一个 IGBT 管, 从控制电路的角度考虑, 图 1(c) 所示的开关结构更为简单, 从电路结构看它需要一

收稿日期: 2007-04-18

通讯联系人: 孙频东, 副教授, 研究方向: 电力电子、电气自动化. E-mail: sunpingdong@njnu.edu.cn

个附加的不可控整流桥电路.

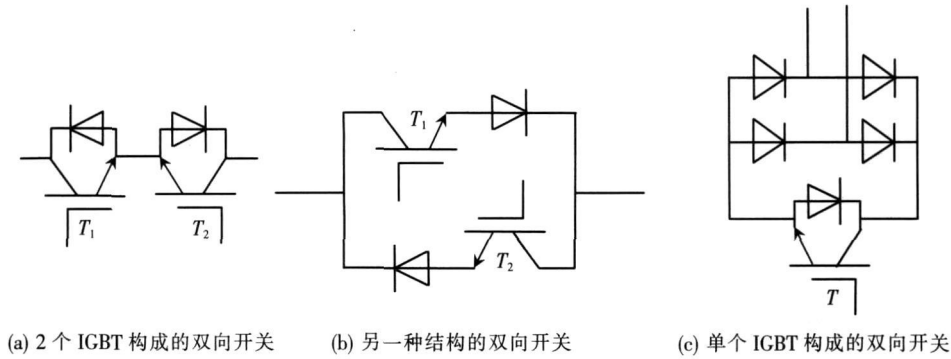


图 1 IGBT 构成的双向开关
Fig.1 Bi-directional switch configuration

1.2 交流升降压变压

交流升压电路如图 2(a) 所示, 需要说明的是, 这里将直流 Boos 电路里的单向开关和二极管都用双向开关代替了, 即 s_1 、 s_2 均为双向可控开关, 其目的是能够在电压负半周时也有相应的电压输出. 输入电压 u_i 和输出电压 u_o 之间的关系如式 (1) 所示, 输出电压和占空比 D 之间的关系为非线性的.

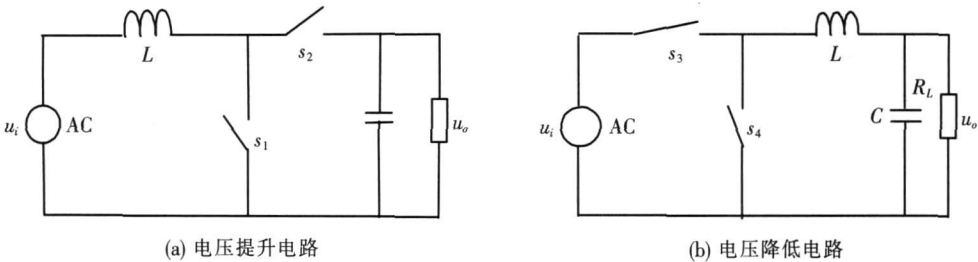


图 2 电压提升及降压电路
Fig.2 Single phase buck-boost AC-AC converter

交流降压电路如图 2(b) 所示, 需要说明的是, 同 Boos 电路, 这里将直流 Buck 电路中的单向开关和二极管也都用了双向开关 s_3 、 s_4 替代了, 以保证能在电压负半周时也有相应的电压输出. 输入电压和输出电压之间的关系如式 (2) 所示, 输出电压 u_o 和占空比 D 之间的关系为线性的, 电压调节的性能应该更好.

$$U_o = \frac{1}{1 - D} U_i \tag{1}$$

$$U_o = D U_i \tag{2}$$

1.3 交流变压的控制策略

从电路的结构看, 图 2(a) 和图 2(b) 所示的电路均具有电能的双向传递性, 因此可以从不同的方向来考虑能量的传送.

1.3.1 正向能量传递控制

以图 2(b) 的降压电路为例, 当采用图 1(a) 所示的双向开关时, 对 s_1 中的 T_1 、 T_2 施加图 3(a) 所示的脉冲触发信号, 触发信号的波形变化和输入电压的极性相关, 而对 s_2 中的 T_1 、 T_2 管, 控制脉冲信号需要和 s_1 中对应的触发脉冲互补; 若使用图 1(c) 所示的开关, 则触发脉冲如图 3(b) 所示, s_3 中的 T 触发脉冲和 s_4 中的触发脉冲互补, 脉冲的控制方法不随输入电压的极性发生变化, 因此控制更为简单.

1.3.2 反向能量传递控制

还是以图 2(b) 所示的电路为例, 正向能量传递时, 它是个降压电路, 当需要进行能量反向传递时, 即需要将输出端能量回送电源时, 给以合适的控制策略可以实现升压能量回送.

能量反送时的脉冲控制方法和正向能量传送时雷同, 这里不再画出相应的脉冲波形.

1.4 电路元件参数的选择

$$L = \frac{U_i - U_o}{2\Delta I_L} D T_s \tag{3}$$

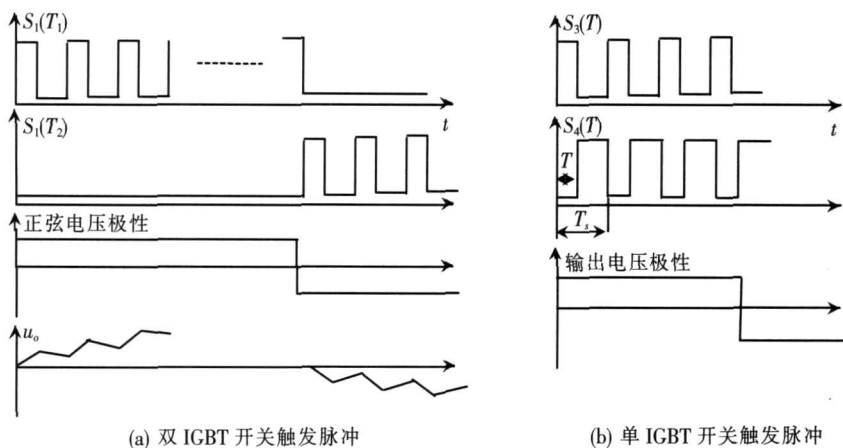


图 3 IGBT 开关触发脉冲波形图
Fig.3 IGBT gate trigger pulse

以图 2(b) 所示的降压电路为例, 能量正向传送, 工频交流电源 50 Hz。若选择 S_3 、 S_4 的开关频率为 20 kHz, 则开关频率是交流电源频率的 400 倍。因此, 在一个开关周期内交流电源的变化量极小, 可以认为是某一固定值, 可以根据 Buck 电路在直流状态下的方法选择电感参数, 如式 (3) 所示。

(3) 式中的 T_s 为开关器件的开关周期; ΔL 为电感电流的纹波值, 一般取均值的 10% ~ 20%; ΔL 大将增大流过电感和半导体开关器件的电流峰值。用叠加原理对电路进行分析, 将高频纹波信号和低频 50 Hz 工频分开计算, 这里电容 C 主要考虑用于滤除高频纹波, 而对工频电源呈现较大的阻抗值。因此, 输出滤波电容的计算, 可根据下列电荷平衡原理得出, 在图 4 所示的电容电压和电流波形中, 电容 C 从 a 点到 b 点储存的电荷 q 的变化, 应该等于这段时间内电流对电容的充电值, 即 (4) 式应该和 (5) 式相等。

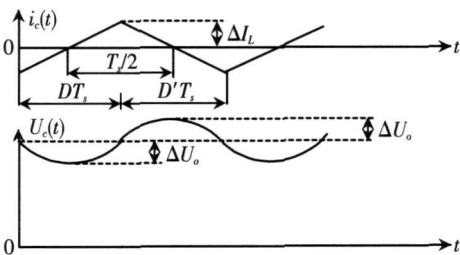


图 4 流过滤波电容的电流和电压波形
Fig.4 Waveform of current and voltage of capacitor C

$$q = C (2 \Delta u) , \tag{4}$$

$$q = \frac{1}{2} \Delta L \frac{T_s}{2}, \tag{5}$$

$$C = \frac{\Delta L T_s}{8 \Delta U_o}, \tag{6}$$

因此, 输出滤波电容的选择可按式 (6) 进行。式中的 ΔU_o 为输出的纹波电压峰值。

$$i_m = i_{lm} + \Delta i_{lm} = (1 + K_i) i_{lm} = \sqrt{2} (1 + K_i) I_L. \tag{7}$$

在 (6) 式中选择滤波电容足够大, 以使开关频率下, 电容的阻抗值远小于负载的电阻值, 使电感的纹波电流流经电容, 而流过负载的纹波非常小。流过开关管的电流最大值如 (7) 式所示。

在 (7) 式中 i_{lm} 为 50 Hz 电流的最大值; Δi_{lm} 为纹波电流最大值; K_i 为纹波系数; I_L 为流经电感的 50 Hz 电流有效值。开关管承受的最大反电压如下式所示:

$$U_{Tm\max} = u_{in\max} = \sqrt{2} U_{in}, \tag{8}$$

式中, U_{in} 为输入电压的有效值, $u_{in\max}$ 为输入电压峰值。

1.5 闭环控制电路

若 AC 变压电路的输出电压需要稳定, 则应该采用闭环反馈电路, 闭环系统结构框图如图 5 所示, 取交流输出电压的反馈值和输出电压的给定值进行比较, 误差经 PI 调节器后, 加上一个偏移量和三角波进行比较, 以产生占空比值, 调节和控制输出电压的大小, 达到稳定电压的目的。

对于工频 50 Hz 的交流电源而言, 在忽略高频纹波等因素后, 如图 2(b) 所示电路的输出、输入电压的传递函数, 可近似表示为 $W_{30}(s)$, 如 (9) 式所示:

$$W_{50}(s) = \frac{R}{RLC s^2 + Ls + R} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \tag{9}$$

式中, $\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, $\xi = \frac{1}{2R_L} \sqrt{\frac{L}{C}}$, L 为变压电路中的储能电感; C 为滤波电容; R_L 为负载电阻.

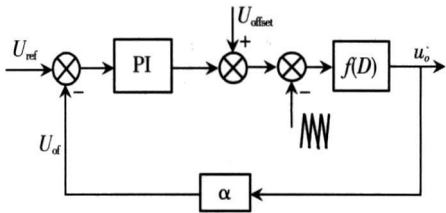


图 5 闭环控制系统结构图
Fig.5 Block diagram of closed loop control system

图 5 所示框图的前向传递函数为 W_{50F} 如下式所示:

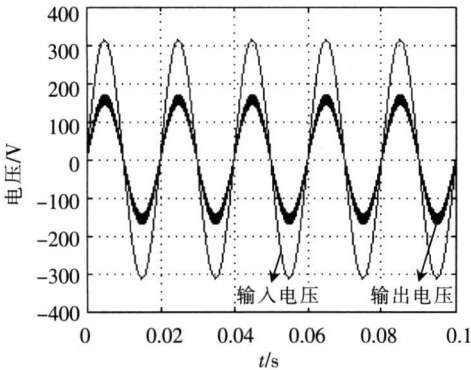
$$W_{50F}(s) = \frac{(K_p s + K_i)R}{s(RLC s^2 + Ls + R)} \tag{10}$$

式中, K_p 和 K_i 分别为比例和积分系数. 选择适当的 PI 调节器参数 K_p 和 K_i 值, 可以得到需要的动态性能.

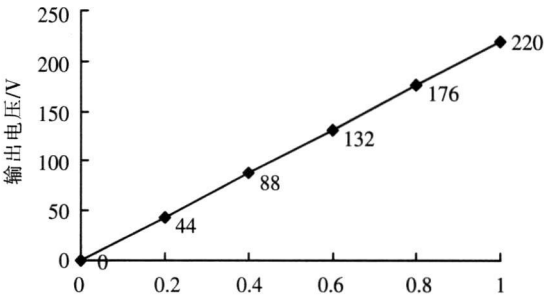
2 电源的仿真和实验结果

2.1 仿真结果

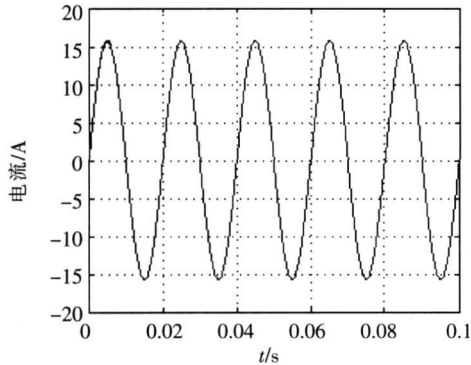
对图 2(b)所示电路进行仿真计算, 并且选择输入电压为 220 V、频率 50 Hz IGBT 开关管的开关频率为 20 kHz 占空比为 0.5 主电路参数为: $L = 1.0\text{mH}$, $C = 10\text{ }\mu\text{F}$, $R_L = 10\text{ }\Omega$. 得到输入、输出电压波形如图 6 (a)所示, 输入、输出的电压关系如图 6(b)所示, 负载电流波形和流过电感的电流波形如图 6(c)、(d)所示.



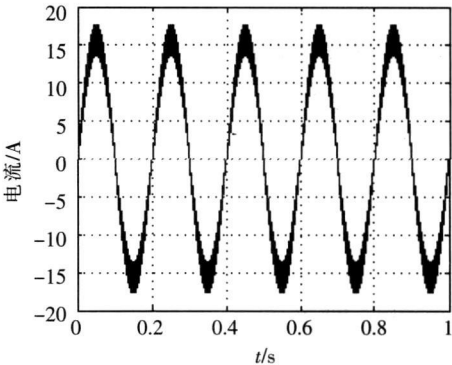
(a) 输入、输出电压波形



(b) IGBT 开关占空比和输出电压之间的关系



(a) 输入、输出电压波形



(b) IGBT 开关占空比和输出电压之间的关系

图 6 AC-AC 电路的仿真波形图

Fig.6 Simulation result of the AC-AC converter

2.2 实验结果

对一台参数如下的样机进行实验, 实验结果如图 7 所示. 输入电压 220V, 频率 50Hz 开关器件的工作频率为 20kHz 占空比为 0.6 样机参数为: $L = 2.0\text{mH}$, $C = 20\text{ }\mu\text{F}$, $R_L = 30\text{ }\Omega$.

图 8 所示为交流调压稳压电源的输出电压随负载变化的曲线, 在一定范围内改变负载电阻值, 输出电压基本不变; 同样, 在一定范围内增加输出电流值, 输出电压也能维持不变.

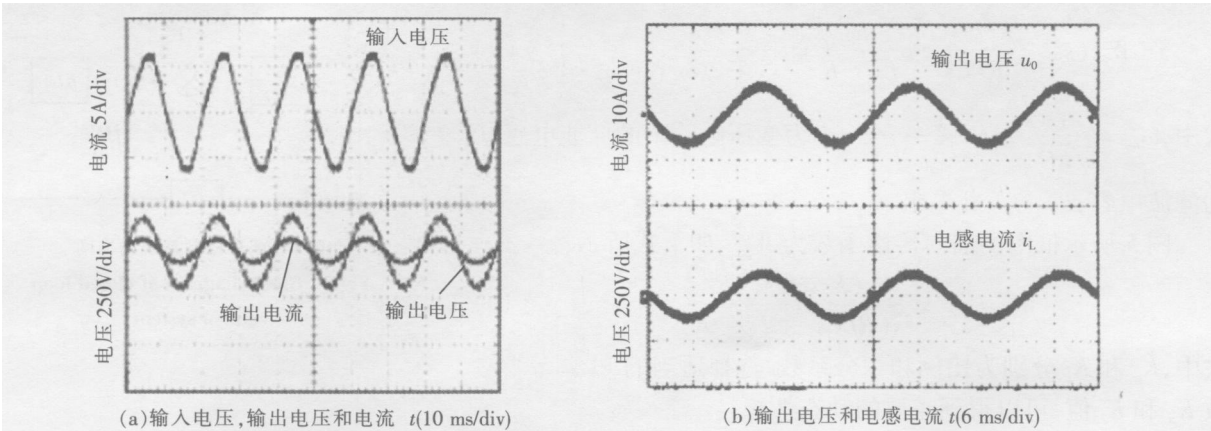


图 7 AC-AC 电路的实验波形图

Fig.7 Experimental result of AC-AC converter

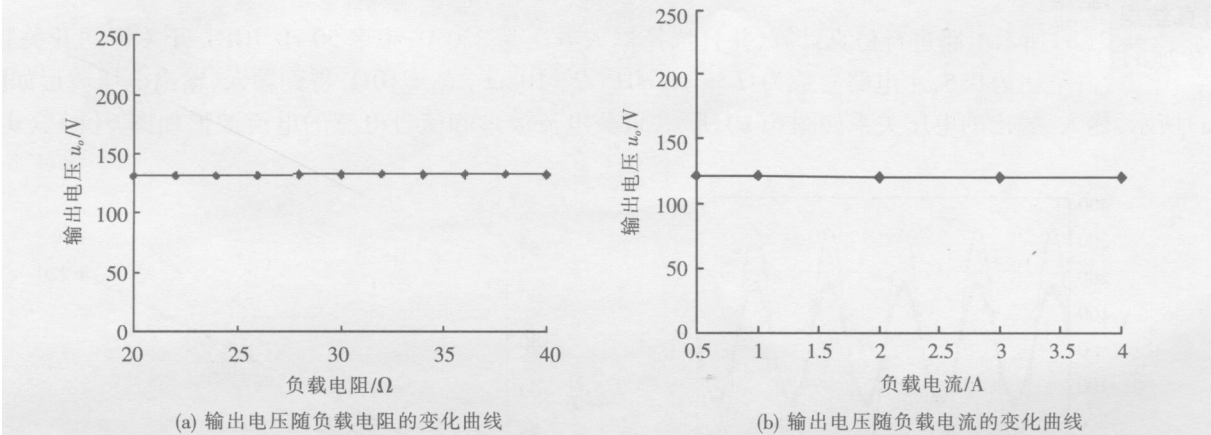


图 8 输出电压随负载的变化曲线

Fig.8 Output voltage varied with load

3 结 论

交流电子调压稳压电路具有输出电压稳定、无级可调、能量转换效率高、控制方法和直流 DC-DC 电路相似等特点。对于闭环控制的电源,当电网电压波动时,也能获得稳定的输出电压。另外,电路还具有能量可双向传递的特点,根据输出的要求,可对应选用直流电源中的升压、降压及升降压电路作为主电路。电子调压电路很容易从单相推广到三相电源中。

[参考文献] (References)

[1] Fang Z P, Chen L, Zhang F. Simple topologies of PWM AC- AC converters [J]. IEEE Power Electronics Letters, 2003, 1 (1): 10-13

[2] Hietaps S M, Naden M. Automatic voltage regulator using an AC- AC voltage-voltage converter [J]. IEEE Tans Ind Application, 2000 36 33-38

[3] 张超华, 汤雨, 谢少军. 基于 Buck-Boost 的 AC- AC 变换器设计 [J]. 电工技术学报, 2007, 22(8): 52-56
Zhang Chaohua Tang Yu Xie Shaojun Design of AC regulator based on buck-boost converter[J]. Transactions of China Electro Technical Society, 2007, 22(8): 52-56 (in Chinese)

[4] 陈道炼, 李磊, 张海涛, 等. 单极性移相控制电压源高频交流环节 AC/AC 变换器研究 [J]. 中国电机工程学报, 2003 23(11): 29-32
Chen DaoLian Li Lei Zhang Haitao et al Research on the unipolarity phase-shifted controlled voltage mode AC/AC converters with high frequency AC link [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 29-32 (in Chinese)

[责任编辑: 刘 健]