

# 推挽双向电流源高频环节航空静止变流器研究

## Research on Push-Pull Bi-Directional Current Mode Aviation Static Inverter with High-Frequency Link

陈道炼 (南京航空航天大学自动化学院 210016)

陈兆岭 (江苏省镇江市高等专科学校 212003)

Chen Daolian (Nanjing University of Aeronautics and Astronautics 210016 China)

Chen Zhaoling (Zhenjinag College 212003 China)

**摘要** 提出了推挽双向电流源高频环节逆变器电路拓扑, 分析研究了其稳态原理和电压瞬时值反馈控制方案。设计并研制的 250VA27VDC/115V400HzAC 航空静止变流器原理样机, 具有电路拓扑简洁、双向功率流、控制简单、变换效率高、可靠性高等优点, 在低输入电压小功率逆变场合具有重要应用价值。

**关键词:** 推挽 反激式变换器 高频环节 逆变器 航空静止变流器

**中图分类号:** TM461

**Abstract** A circuit topology of the push-pull bi-directional current mode inverter with high-frequency link is proposed. Steady principle and output voltage instantaneous feedback control of the inverter are investigated. A 250VA 27VDC/115V400HzAC prototype for aviation static inverter is designed and developed. The static inverter has the advantages of simple topology, bi-directional power flow, simple control scheme, high efficiency, and high reliability, and has better application prospect in low input voltage and low power inversion fields.

**Keywords:** Push-pull, flyback converter, high-frequency link, inverter, aviation static inverter

## 1 引言

传统逆变技术虽然技术成熟、性能可靠、应用广泛, 但存在工频变压器和输出滤波器体积大且笨重、音频噪声和动态响应特性差等缺点<sup>[1]</sup>。单向电压源高频环节逆变器<sup>[2]</sup>、双向电压源高频环节逆变器<sup>[1]</sup>有效地克服了传统逆变技术的缺点。

文献 [3] 提出了基于反激变换器的电流源高频环节逆变技术新概念, 并分析研究了单管单向、单管双向和全桥双向电流源高频环节逆变器。该逆变技术具有电路拓扑简洁、控制简单、变换效率

高、动态响应速度快、可靠性高等优点, 适用于小功率逆变场合。但单管单向电流源高频环节逆变器只能单向传输功率、负载适应性差, 仅适用于纯电阻且恒定满载场合; 单管双向电流源高频环节逆变器周波变换电路偏复杂; 全桥双向电流源高频环节逆变器仅适用于高压输入逆变场合。

本文提出了推挽双向电流源高频环节逆变器<sup>[4]</sup>, 兼有单管双向和全桥双向电流源高频环节逆变器二者之优点, 即适用于低压输入且电路拓扑最简洁。

江苏省博士后科学基金资助项目。

陈道炼 男, 1964 年生, 南京航空航天大学电力电子与电力传动学科博士后, 教授, 研究生导师, 主要从事功率电子变换技术和航空电源的研究, 已发表论文 30 多篇, 获两项中国专利和一项国防科学技术成果二等奖。

陈兆岭 男, 1967 年生, 硕士研究生, 从事功率电子变换技术研究。

## 2 推挽双向电流源高频环节逆变器电路拓扑

推挽双向电流源高频环节逆变器电路拓扑, 由高频逆变器、储能式变压器和周波变换器三部分组成, 如图 1 所示。高频逆变器 (由功率开关  $S_1$ 、 $S_2$  实现), 将直流电压能量变换成脉动的电流能量储存在储能式变压器 T 中, 周波变换器 (由功率开关  $S_3$ 、 $S_4$  实现) 将此高频脉动电流低频解调, 经输出滤波电容  $C_o$  滤波后供给交流负载  $Z_L$ 。

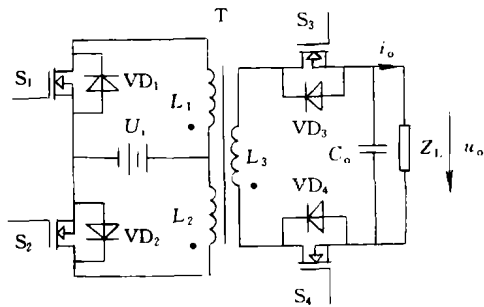


图 1 推挽双向电流源高频环节逆变器电路拓扑

Fig.1 Circuit topology of the push-pull bi-directional current mode inverter with high-frequency link

根据输出电压  $u_o$  和二次侧电感电流  $i_{L3}$  方向的不同, 该电路有四种工作模式, 如图 2 所示。每种工作模式电路拓扑相当于一个反激变换器, 电路工作于电流断续模式 (DCM)。

工作模式 A 当  $u_o > 0$ ,  $i_{L3} > 0$  时, 其等效电路如图 2a 所示。其中  $S_1$  高频斩波,  $S_3$  常通,  $U_i$ 、 $S_1$ 、 $L_1$ 、 $L_3$ 、 $S_3$ 、 $VD_4$ 、 $C_o$  和  $Z_L$  构成一个反激变换器, 电源  $U_i$  向负载  $Z_L$  传输能量。

工作模式 B 当  $u_o < 0$ ,  $i_{L3} > 0$  时, 其等效电路如图 2b 所示。其中  $S_3$  高频斩波,  $S_4$  常通,  $U_i$ 、 $VD_2$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 、 $S_3$ 、 $S_4$ 、 $C_o$  和  $Z_L$  构成一个反激变换器, 负载  $Z_L$  向电源  $U_i$  回馈能量。

工作模式 C 当  $u_o < 0$ ,  $i_{L3} < 0$  时, 其等效电路如图 2c 所示。其中  $S_2$  高频斩波,  $S_4$  常通,  $U_i$ 、 $S_2$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 、 $S_4$ 、 $VD_3$ 、 $C_o$  和  $Z_L$  构成一个反激变换器, 电源  $U_i$  向负载  $Z_L$  传输能量。

工作模式 D 当  $u_o > 0$ ,  $i_{L3} < 0$  时, 其等效电路如图 2d 所示。其中  $S_4$  高频斩波,  $S_3$  常通, 则  $U_i$ 、 $VD_1$ 、 $L_1$ 、 $L_3$ 、 $S_3$ 、 $S_4$ 、 $C_o$  和  $Z_L$  构成一个反激变换器, 负载  $Z_L$  向电源  $U_i$  回馈能量。

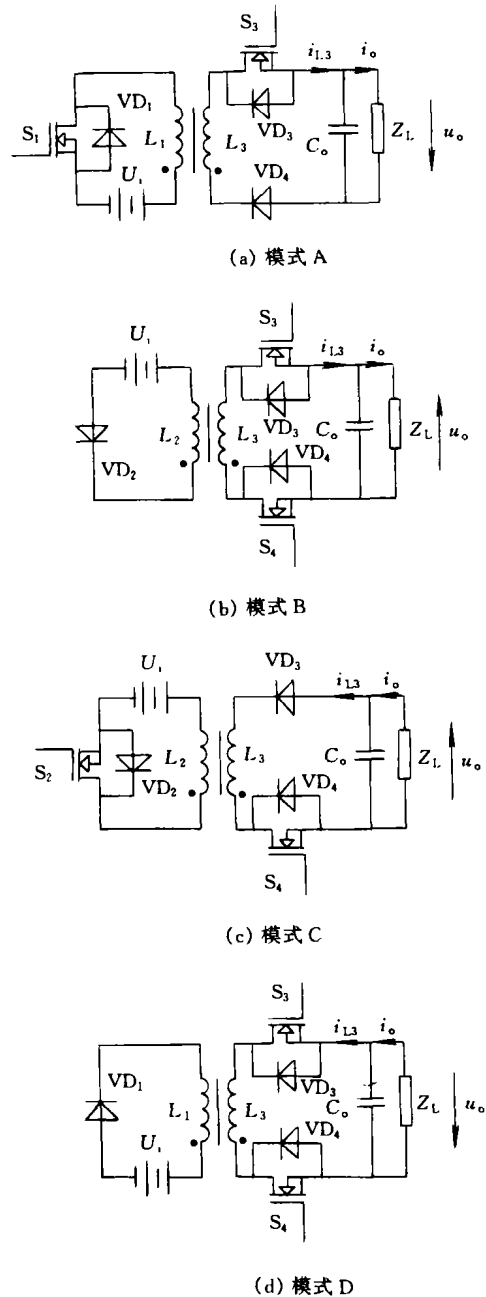


图 2 四种工作模式

Fig.2 Four kinds of operation modes

## 3 控制原理

采用输出电压瞬时值反馈控制方案, 如图 3 所示。  $i_{L31}$  为二次侧电感电流的基波分量。感性负载时的主要波形, 如图 4 所示。感性负载时, 工作模式顺序为 A—B—C—D; 容性负载时, 工作模式顺序为 D—C—B—A; 阻性负载时, 工作模式顺序为 A—C。

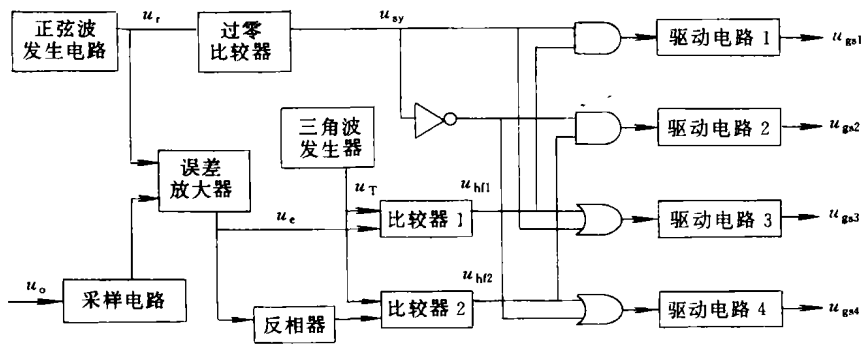


图 3 控制电路框图

Fig.3 Block diagram of control circuit

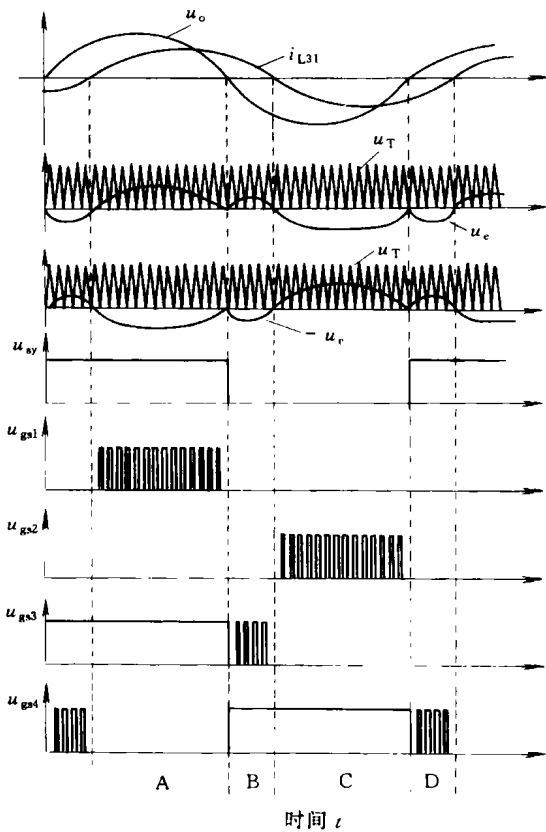


图 4 控制电路波形

Fig.4 Waveform of control circuit

## 4 功率电路关键参数设计

### 4.1 电感 $L_1$

逆变器工作于 DCM 模式，储能式变压器二次侧电感为

$$L_1 = L_2 \leq \frac{\eta D_{\max}^2 T_s U_{i \min}^2}{2 P_{o \max}} \quad (1)$$

式中  $U_{i \min}$ ——最低输入电压

$D_{\max}$ ——最大占空比

$P_{o \max}$ ——电感电流临界连续时最大输出功率

$\eta$ ——变换效率

### 4.2 储能式变压器匝比 $N_3/N_1$

储能式变压器匝比为

$$\frac{N_3}{N_1} = \frac{(1 - D_{\max}) U_o}{D_{\max} U_{i \min}} \quad (2)$$

### 4.3 输出滤波电容 $C_o$

在一个 PWM 开关周期内，当  $L_3$  中的电流大于输出电流  $I_o$  时，输出电压从最小值  $U_{o \min}$  上升到最大值  $U_{o \max}$ ；当  $L_3$  中的电流小于  $I_o$  时，相当于滤波电容  $C_o$  对负载电阻  $R_L$  放电，输出电压从最大值  $U_{o \max}$  下降到最小值  $U_{o \min}$ 。当逆变器输出功率最大且为纯电阻负载时，输出电压纹波最大，输出滤波电容应按此时来设计。 $C_o$  对  $R_L$  放电时输出电压表达式为

$$u_o(t) = U_{o \max} e^{-\frac{t}{R_L C_o}} \quad (3)$$

输出电压从最大值  $U_{o \max}$  下降到最小值  $U_{o \min}$  的时间<sup>[3]</sup>为  $5T_s/8$ ，由式 (3) 可知，输出电压最小值为

$$U_{o \min} = U_{o \max} e^{-\frac{5T_s}{8R_L C_o}} = U_{o \max} e^{-\frac{5T_s}{8R_L C_o}} \quad (4)$$

输出电压纹波峰峰值  $U_{opp}$  为

$$\begin{aligned} U_{opp} &= U_{o \max} - U_{o \min} = (1 - e^{-\frac{5T_s}{8R_L C_o}}) U_{o \max} \\ &\approx \frac{5T_s}{8R_L C_o} U_{o \max} \end{aligned} \quad (5)$$

设输出电压纹波峰峰值与输出电压平均值  $U_o$  的比值为

$$\frac{U_{opp}}{U_o} \leq k \% \quad (6)$$

在一个开关周期内,  $U_o$  约等于  $U_{o,max}$ , 由式 (5)、(6) 可得

$$C_o \geq \frac{5T_s}{8k\%R_L} \quad (7)$$

#### 4.4 功率开关电流、电压应力

DCM 工作模式时, 功率开关  $S_1$ 、 $S_2$  峰值电流  $I_p$ 、平均值电流  $I_{avg}$  和有效值电流  $I$  分别为

$$I_p = \frac{T_{on}U_i}{L_1} = \frac{DT_sU_i}{L_1} \quad (8a)$$

$$I_{avg} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_{on}} \frac{U_i}{L_1} t dt = \frac{D^2T_sU_i}{2L_1} \quad (8b)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T_s} \int_0^{T_{on}} \left(\frac{U_i}{L_1} t\right)^2 dt} = \frac{DT_sU_i}{3L_1} \sqrt{3D} \quad (8c)$$

功率开关  $S_1$ 、 $S_2$  电压应力  $U_{DS(BR)}$  为

$$U_{DS(BR)} = U_i + U_o N_1 / N_3 \quad (9)$$

功率开关  $S_3$ 、 $S_4$  的电流应力为开关  $S_1$ 、 $S_2$  的  $N_1 / N_3$  倍, 其电压应力为

$$U_{DS(BR)} = \sqrt{2}U_o + U_i N_3 / N_1 \quad (10)$$

### 5 航空静止变流器原理样机

变流器原理样机主要元器件参数: 储能式变压器铁心选用 R2KBD 磁心 PM50\*39、一次绕组匝数  $N_1 = N_2 = 2$ 、二次绕组匝数  $N_3 = 20$ , 一次侧电感  $L_1 = L_2 = 1.15\mu H$ 、二次侧电感  $L_3 = 115\mu H$ , 开关频率为 50kHz, 输出滤波电容  $C_o = 4.6\mu F$ , 功率开关  $S_1$ 、 $S_2$  选用 IXFK180N10 (180A/100V), 功率开关  $S_3$ 、 $S_4$  选用 IXFH15N80 (15A/800V)。

主要性能指标为: 输入电压  $U_i = 18 \sim 32VDC$ , 额定容量  $S = 250VA$ , 输出电压  $U_o = 115V$ , 输出电压频率 400Hz, 负载功率因数  $1 \sim 0.75$  (滞后), 变换效率约 80%。

输入电压 27V、感性负载时原理试验波形, 如图 5 所示。

### 6 结论

(1) 变流器原理样机具有优良的性能指标, 证实了推挽双向电流源高频环节逆变器的可行性。

(2) 该电路拓扑在低输入电压、小功率逆变场合具有重要应用价值。

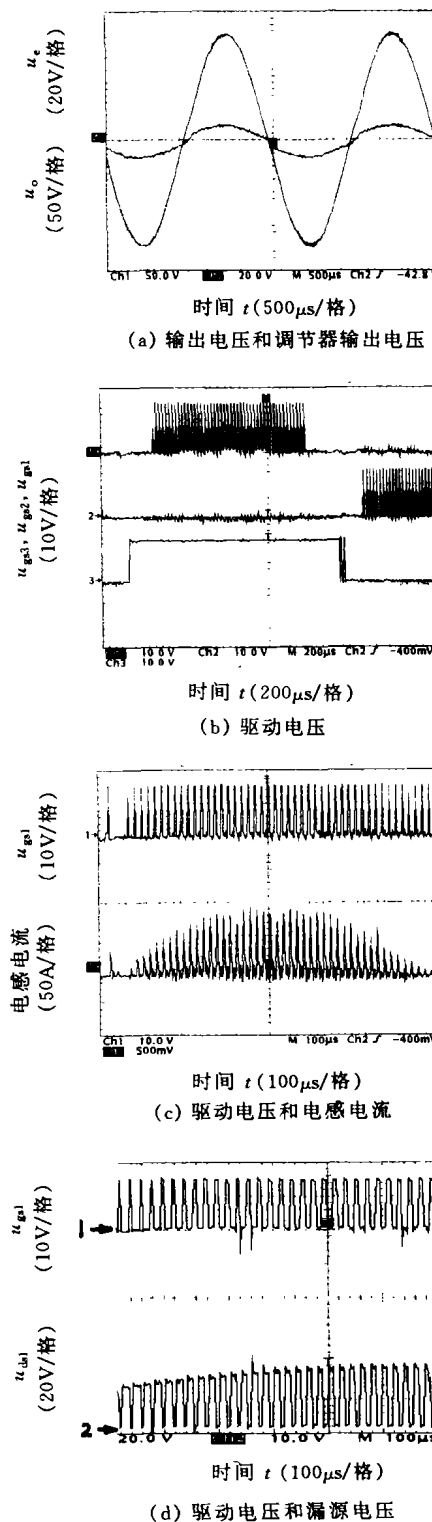


图 5 输入电压 27V、感性负载时原理样机试验波形

Fig.5 Schematic experimental waveforms under inductive load and 27V input voltage

## 参考文献

- 1 I. Yamato, et al. New conversion system for UPS using high frequency link, IEEE PESC, 1988, Rec: 658~663
- 2 A. K. S. Bhat, et al. A novel utility interfaced high frequency link photovoltaic power conditioning system. IEEE

Trans. on IE. 1988, 35 (1) :153~159

- 3 黄敏超. 高频链逆变技术的研究: [学位论文]. 杭州: 浙江大学, 1998.
- 4 陈道炼. 高频环节航空静止变流器研究. [博士后研究报告]. 南京: 南京航空航天大学, 2001.

收稿日期 2001-12-28

## 《电力电工新技术研讨会及产品发布会》征文通知

随着我国加入 WTO, 电工技术领域如何面对挑战、把握机遇、谋求发展成为业内人士普遍关心的问题。为了推动电工技术领域的理论研究, 促进科技成果转化成为生产力, 了解国内外研发应用现状, 掌握最新动态, 把握发展趋势, 扩大技术交流, 促进产业发展, 值《电工技术杂志》创刊 20 周年之际, 《电工技术杂志》、《电工技术学报》编辑部拟于 11 月举办《电力电工新技术研讨会及产品发布会》, 以增进设计、生产制造企业与运行部门的交流, 共同推进电工新技术在电气行业的应用。

### 一、研讨会主题

1. 配电自动化: 真空开关、SF<sub>6</sub> 开关、箱变及智能化电器、智能化开关、智能配电系统、故障恢复系统。

2. 柔性交流输电技术的研究与应用。

3. 无功补偿: 智能补偿、动态补偿、补偿方式及计算 (包括高、低压电网、道路照明无功补偿等)、城乡电网改造和建设中的电力电容器无功补偿技术, 高、低压并补成套装置及元器件的开发研究。

4. 绝缘材料与绝缘技术: 电力电缆、电气绝缘测试、绝缘配合、网地绝缘监控技术。

会议将突出技术研讨、产品推介的特点, 并邀请相关领域知名学者做专题报告。欢迎电力、电气行业科研、设计、制造和使用部门的电气技术人员、管理、销售人员及大专院校师生投稿并参加研讨会, 同时欢迎厂商在会上推介企业及产品。其他

事宜将在报名时通知。

经专家评审后, 研讨会的论文将在《电工技术杂志》或《电工技术学报》上发表, 新产品介绍也将在《电工技术杂志》上发布。论文征集、研讨会报名截止日期为 9 月 30 日。

### 二、征文要求

1. 论文必须是未在国内刊物或全国性学术会议、技术研讨会上公开发表过的。

2. 论文应反映该领域的先进水平或具有实用价值。

3. 论文形式可以是综述, 研究开发, 应用技术, 产品介绍与选用, 市场、行业分析与预测, 工艺设备与材料, 行业信息与动态等。

4. 论文要求写作规范, 量、单位和符号符合国家标准。

5. 论文结构包括: 题目, 作者姓名, 单位, 摘要, 关键词, 正文, 参考文献, 英文题目, 汉语拼音姓名, 英文单位, 英文摘要, 英文关键词。

6. 论文一般不超过 5000 字, 4 号字通栏打印, 并附软盘。

7. 请注明作者详细地址、邮政编码、电话、电子信箱等, 并注明作者职务 (职称)。

8. 来稿请注明“征文”字样。

论文初稿寄至: 北京百万庄大街 22 号《电工技术杂志》编辑部 (100037)

联系方式: 电话: (010) 68994469、68997265

e-mail: [etj@mail.machineinfo.gov.cn](mailto:etj@mail.machineinfo.gov.cn)

联系人: 于苏华 张晓龙