

新型 MH 灯用单级逆变器

陈亚爱 张卫平 张东辉 赵徐森 张东彦

(北方工业大学机电工程学院 北京 100144)

摘要 针对金属卤化物灯用镇流器的特殊要求,提出了一种适用于电子镇流器的新拓扑,将 DC/DC 和 DC/AC 两功率级整合成一级 DC/AC 逆变器,形成了一种新型金属卤化物灯用单级逆变器。阐述了新电路的工作原理和控制策略;介绍了新电路的软开关原理;给出了谐振元件参数设计公式。对新电路的仿真结果表明其具有优越的性能,效率约 95%。搭建了输出功率为 200W 的样机,实验结果与理论计算、仿真结果相符,验证了新电路低成本、低 EMI、高效率等特点。

关键词: 单级逆变器 金属卤化物灯 声共振 软开关

中图分类号: TM 464

Study of a Novel Single Stage Inverter for MH Lamps

Chen Yaai Zhang Weiping Zhang Donghui Zhao Xusen Zhang Dongyan

(North China University of Technology Beijing 100144 China)

Abstract Based on special application for electronic ballast applied to metal halide (MH) lamps, a new topology for electronic ballast is proposed, which integrates two power stages of DC/DC and DC/AC to a novel single stage of DC/AC inverter for MH lamps. The principle and controlling strategy for new circuit are put forward; the principle of soft switching is developed; and the designing formulas of the resonance elements parameter are provided. Simulation results of new circuit show that it has good performance and its efficiency is about 95%. A prototype of output power 200W has been made up and the experimental results are agreed with the theoretic results and the simulation results and also show that the new circuit has many merits such as lower cost, low EMI, high efficiency and so on.

Keywords: Single stage inverter, metal halide lamps, acoustic resonance, soft switching

1 引言

金属卤化物 (Metal Halide, MH) 灯能产生连续的光谱,具有日光色,色温 5600K,它的光效是卤钨灯的 3 倍,在同样的照度下,可节能 75%。因其显色性好、光效高、光谱频带宽、寿命长等特点得到广泛的应用。MH 灯具有负增量阻抗特性,在电网与灯之间需插入镇流器限制电流才能使其稳定工作^[1-2]。目前,镇流器已由传统的电感式发展到第

三代高频电子镇流器。由于 MH 灯用高频电子镇流器较传统镇流器在效率、功率密度、成本、体积等诸多方面具有显著的优势,已成为研究热点。

图 1a 所示为传统的 MH 灯用电子镇流器结构图^[2],其中 DC/DC 变换器的主要功能是使其输出电压和电流的特性与 MH 灯的电气特性相匹配,保证 MH 灯的平稳启动和恒功率稳态。MH 灯属于高压气体放电灯,而高压气体放电灯工作在高频下,会出现声共振现象。所谓声共振现象是指高强度气体放电灯在高频电流驱动时,表现出的放电电弧不稳定。电弧的不稳定会造成如电弧电压突然升高,电弧弯曲、摇晃,严重时会使吹断电弧,甚至使电弧管爆裂^[3]。消除声共振是在设计 MH 灯用电子镇流器时必须考虑的问题。DC/AC 逆变器输出低频 ($f < 300\text{Hz}$) 方

国家自然科学基金 (60672009) 和北京市属市管高等学校人才强教计划资助项目。

收稿日期 2008-07-14 改稿日期 2009-05-23

波电压和电流来驱动 MH 灯, 可以消除频闪^[4-6], 但也存在一些诸如功率因数低、效率不理想、可靠性差等问题。为了降低成本, 本文提出了一种适用于电子镇流器的新拓扑, 将 DC/DC 和 DC/AC 变换器整合成单级 DC/AC 逆变器, 图 1b 所示为新电路系统结构图。

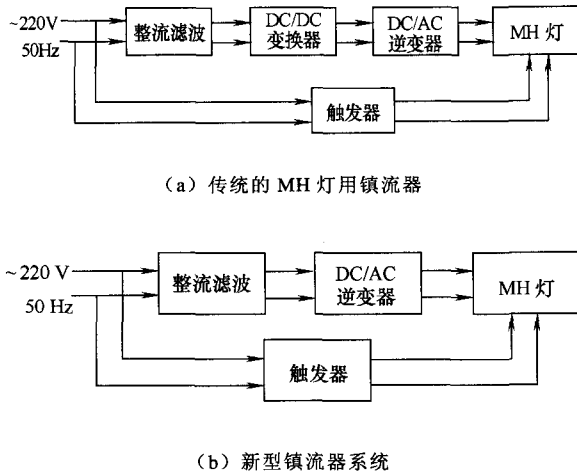


图 1 电路结构框图

Fig.1 The block diagram of circuit

在对新电路的工作原理和控制策略研究的基础上, 搭建了输出功率为 200W 的样机, 实验结果与理论计算、仿真结果相符, 验证了新电路有许多优点和优越的性能, 如 ZVS(Zero Voltage Switching)、MEI、较低成本、高效率等。

2 新型单级逆变器的工作原理

图 2 所示为新型单级逆变器原理图, 图中 M_1 、 VD_1 、 \dots 、 M_4 、 VD_4 组成全桥逆变器, L_o 、 C_o 构成低通滤波器, L_o 、 C_o 、 C_1 和 C_2 为 M_3 和 M_4 创造软开启和软关断条件, 即软开关, 电阻 R_o 代表稳态时的 MH 灯^[4]。 M_1 、 M_2 工作在低频 (f_0) 状态, 它们的驱动信号 V_1 、 V_2 为低于 300Hz (一般约 75~300Hz) 的低频脉冲信号, f_0 等于逆变器的输出信号频率; M_3 、 M_4 工作在高频 (f_s) 状态, 它们的驱动信号 V_3 、 V_4 为高于 20kHz 的高频信号, f_s 等于高频输出纹波的频率。

为了便于分析新电路的稳态性能, 对电路作如下假设: ① MOSFET 管和二极管为理想器件; ② 电感 L_o 工作于临界导电模式, 电感无损耗; ③ 电容器 C_o 容量足够大, 可忽略高频纹波, 电容无损耗; ④ $C_1=C_2$, $C_o \gg C_1$, $C_o \gg C_2$; ⑤ 输入是直流电压源, 无脉动; ⑥ 电路已进入稳态。

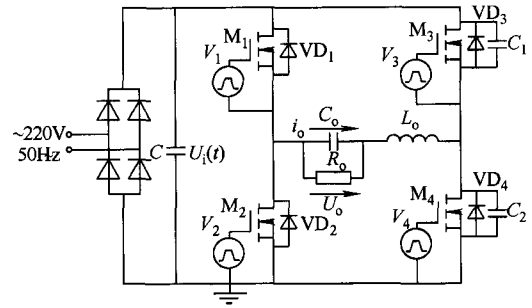


图 2 新型单级逆变器原理图

Fig.2 The diagram of the novel single stage inverter

新型单级逆变器的主要波形如图 3 所示, 图中 V_1 和 V_2 分别为 M_1 和 M_2 的驱动信号, 它们是低于 300Hz (一般约 75~300Hz) 的低频信号 (f_0), 也是逆变器的输出信号频率; V_3 和 V_4 分别为 M_3 和 M_4 的驱动信号, 它们是高于 20kHz 的高频信号 (f_s), 也是高频输出纹波频率。为了简化对新型单级逆变器控制策略的描述, 将图 4 所示的驱动信号 V_1 和 V_2 的波形分成两种类型, 一种是奇数波形用 1、3、5、 \dots 表示, 另一种是偶数波形用 0、2、4、 \dots 表示。在奇数波形中, M_1 总是导通而 M_2 总是关断, 高频 V_3 和 V_4 是 PWM 信号, 是根据逆变器的输出电流、电压或功率来控制的。

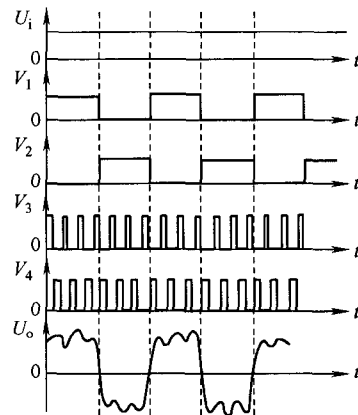


图 3 新型单级逆变器的主要波形

Fig.3 The key waveforms for the novel single stage inverter

由于 M_1 与 M_2 、 M_3 与 M_4 完全对称, V_3 和 V_4 的频率 f_s 远远高于 V_1 和 V_2 的频率 f_0 , 又假设低通滤波器在 M_1 或 M_2 导通期间已达到稳态, 所以可以只研究 M_1 导通 M_2 关断的情况。在 M_1 始终导通而 M_2 关断的时间内, 可用图 4 所示的等效电路讨论输出电压的调节状况, 由图 4 可见, 等效电路是一 Buck 变换器。利用伏秒平衡原理可得

$$(U_i - U_o)T_{on} = U_o T_{off} \quad (1)$$

式中 U_i ——输入电压;
 U_o ——输出电压;
 T_{on} —— M_4 导通时间;
 T_{off} —— M_4 关断时间;
 T_s —— M_4 开关周期;
 D ——高频信号的占空比。

整理式 (1) 后, 可得

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{T_{on}}{T_s} = D \quad (2)$$

上式表明, 可通过改变高频信号的占空比 D 来调节输出电压。

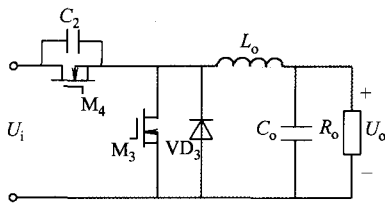


图 4 输出电压调节的等效电路

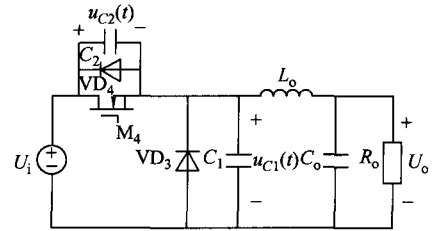
Fig.4 The equivalent circuit for output voltage regulation

3 新型单级逆变器的软开关原理

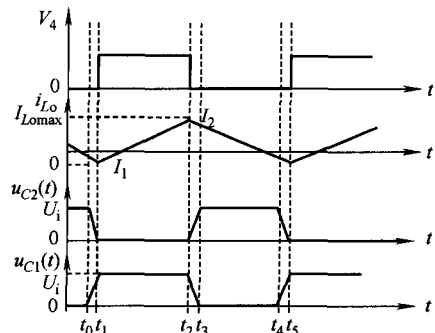
从前面的概述中可知, 新型单级逆变器工作时可形成 ZVS 或 ZCS (Zero Current Switching) 条件, 使逆变器开关工作在 ZVS 或 ZCS 工作方式。所谓 ZVS 或 ZCS 工作方式是指利用谐振现象及有关器件的钳位作用, 使开关管电压或电流在开启或关断过程中维持为零, 这就是软开关技术^[7]。下面进一步分析新型单级逆变器的软开关原理。为了便于分析, 以开关管 M_4 为研究对象。在图 2 中, 如果电感工作在临界导电模式下, 当 M_4 导通时 VD_3 没有反向电流, 但储存在 C_2 上的能量会降低逆变器的效率, 为了克服这一缺点, 提高逆变器的效率, 需要降低开关损耗, 即要创建下列各项 ZVS 导通条件, 实现软开关^[8-9]。

在图 4 中, 如果 M_4 导通和 M_3 关断, 等效电路如图 5a 所示, 图中是一 Buck DC/DC 变换器, 其主要波形如图 5b 所示。当 t 在 $[0, t_0]$ 期间, VD_3 导通; 在 t_1 时刻, 通过电感的电流降到零, VD_3 关断, 同时 L_o 和 C_1 谐振, C_2 也谐振, 所以当 t 在 $[t_0, t_1]$ 期间, C_2 放电, u_{C2} 下降, 在同一时间内, C_1 充电, u_{C1} 升高。在 t_1 时刻, $u_{C2}(t)=0, u_{C1}(t)=U_i, VD_4$ 导通, M_4 的 ZVS 开启条件建立, M_4 实现 ZVS 开启。当 t

在 $[t_1, t_2]$ 期间, M_4 导通, 电感电流增加, 在 t_2 时刻, M_4 关断; L_o 和 C_1 谐振, C_2 再次谐振, 所以 u_{C1} 缓慢下降, u_{C2} 缓慢升高, 因而 M_4 关断的 ZVS 条件存在, M_4 实现 ZVS 关断。在 t_3 时刻, $u_{C1}(t)=0, u_{C2}(t)=U_i, VD_3$ 开启的 ZVS 条件建立, VD_3 实现了 ZVS 开启。



(a) 等效电路

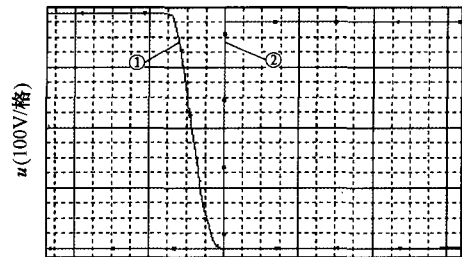


(b) 主要波形

图 5 等效电路和主要波形

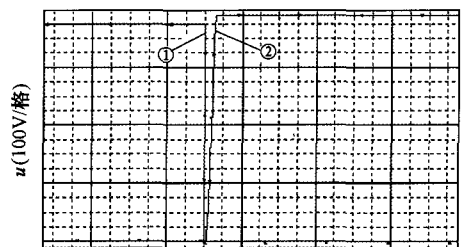
Fig.5 The equivalent circuit and key waveform

图 6 所示为研究新型单级逆变器 ZVS 原理的仿真结果。



$t(2\mu s/\text{格})$

(a) ZVS 开启



$t(4\mu s/\text{格})$

(b) ZVS 关断

图 6 ZVS 的仿真结果

Fig.6 The simulation results with ZVS

在图 6a 中, 曲线①为 M_4 的漏极和源极之间的电压, 曲线②为 M_4 的驱动信号。如图 6a 所示, 在驱动信号到来前电压已达到零, 所以 M_4 实现了 ZVS 开启。

在图 6b 中, 曲线②为 M_4 的漏极和源极之间的电压, 曲线①为 M_4 的驱动信号。如图 6b 所示, 在驱动信号消失后, 电压波形一度在极短时间内保持为零, 所以 M_4 实现了 ZVS 关断。

4 主电路谐振元件 L_o 和 C_o 参数确定

当 M_4 导通, 在 $t_1 \leq t \leq t_2 = DT_s$ 时间内, 电感上的电压为

$$u_{L_o}(t) = U_i - U_o = L \frac{di_{L_o}}{dt} = L \frac{I_2 - I_1}{t_2 - t_1} \quad (3)$$

设 $\Delta I = I_2 - I_1$ 为电感电流峰-峰脉动值, 则有

$$\Delta I = \frac{U_i - U_o}{L} (t_2 - t_1) = \frac{U_i - U_o}{L} DT_s = \frac{U_i - U_o}{Lf_s} D \quad (4)$$

当 M_4 关断, 在 $t_2 \leq t \leq T_s$ 时间内, 电感电流按直线规律下降, 到 $t = t_5$ 时, 下降为 I_1 , 则有

$$U_o = L \frac{\Delta I}{t_5 - t_2} \quad (5)$$

或写成

$$\Delta I = \frac{U_o}{L} (t_5 - t_2) = \frac{U_o}{L} (1-D)T_s = \frac{U_o}{Lf_s} (1-D) \quad (6)$$

假定 Buck 电路为无损耗, 则有

$$U_i I = U_o I_o = DU_o I_o \quad (7)$$

$$I = DI_o \quad (8)$$

根据式 (2) 和式 (4), 开关周期为

$$T_s = \frac{1}{f_s} = \frac{LU_i}{U_o(U_i - U_o)} \Delta I \quad (9)$$

由于 $i_{L_o}(t) = i_{C_o}(t) + i_o(t)$, 若假定负载电流 $i_o(t)$ 的脉动很小而可忽略, 则 $\Delta i_{L_o} = \Delta i_{C_o}$ 。又因电容电流在一周期内的平均值为零, 电容上电压峰-峰脉动值为

$$\Delta U_{C_o} = \frac{\Delta Q}{C_o} = \frac{\Delta I}{8f_s C_o} \quad (10)$$

将式 (4) 和式 (6) 代入式 (10), 得

$$\Delta U_{C_o} = \frac{U_o(U_i - U_o)}{8L_o C_o f_s^2 U_i} = \frac{U_o D(1-D)}{8L_o C_o f_s^2} \quad (11)$$

从而有

$$C_o = \frac{U_o(U_i - U_o)}{8L_o f_s^2 U_i \Delta U_{C_o}} = \frac{U_o D(1-D)}{8L_o f_s^2 \Delta U_{C_o}} \quad (12)$$

当变换器工作在临界导电模式时, 负载电流与电感电流之间存在

$$I_o = \frac{1}{2} I_{L_o \max} = \frac{U_i - U_o}{2L_o} DT_s = \frac{U_i - U_o}{2L_o f_s} D \quad (13)$$

所以有

$$L_o = \frac{U_i - U_o}{2I_o f_s} D \quad (14)$$

因此, 只要已知 I_o 、 ΔU_{C_o} 、 f_s 、 U_i 、 U_o 等参数的设计指标, 由式 (12) 和式 (14), 可确定 L_o 和 C_o 的值。

谐振电容 C_1 和 C_2 是开关管漏源端电容 C_{DS} 。实际设计时, 由于元器件参数存在分散性, 可视实际情况通过在开关管漏源端并接一个 pF 级的小电容加以调整, 根据经验, 一般约为 $(1/8 \sim 1/5)C_{DS}$ 。

根据上述确定谐振元件参数的方法, 实验样机上开关管采用型号为 IRFP460 MOS 管, 其 $C_{DS} = 750 \text{pF}$, 外并联一个 100pF 电容, 因此各谐振参数为: $C_1 = C_2 = 850 \text{pF}$, $C_o = 0.9 \mu\text{F}$, $L_o = 226 \mu\text{H}$ 。

5 仿真和实验结果

基于上述分析, 采用 PSpice 软件对新型单级逆变器进行了仿真。新型单级逆变器的参数如下: $U_i = 310 \text{V}$, $U_o = 70 \text{V}$, $I_o = 3 \text{A}$, $D = U_o/U_i = 0.226$, $L_o = 226 \mu\text{H}$, $C_o = 0.9 \mu\text{F}$, $R_o = 25 \Omega$, $f_s = 40 \text{kHz}$ 。

仿真波形如图 7 所示。在图 7a 中由上至下, 第一条曲线是驱动信号 V_4 ; 第二条曲线是电容器 C_2 端电压波形; 最后一条曲线是通过电感的电流波形。图 7a 中的电感工作在临界导电模型下, M_4 在电感电流正好等于零时导通, 所以 M_4 实现了 ZCS 开启。由于电容器 C_2 并接在 M_4 的漏极和源极之间, M_4 的输出电压在 M_4 关断时缓慢升高, 所以 M_4 又是 ZVS 关断。图 7b 所示为低频输出电压的波形。输出电压是一低频方波。因此, MH 灯运行于低频方波信号, 能消除声共振。

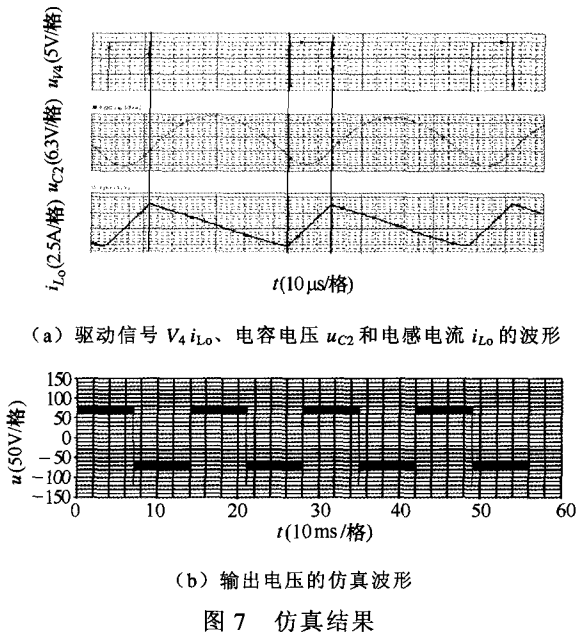


图 7 仿真结果

Fig.7 The simulation results

为了验证新型单级逆变器的特性，搭建了输出功率为 200W 的样机。在样机带 200W MH 灯作负载运行时，实验测量灯的端电压和通过电感的电流，测量结果如图 8 所示，其中图 8a 为输出电压的实测波形，图 8b 为电感电流的实测波形。从这些实测数据和曲线可得出：①灯的端电压是一低频方波信号，所以声共振能消除并能使 MH 灯稳定工作。②电感工作在临界导电模式下， M_3 和 M_4 是软开关。

另外，在样机上进行了效率测试实验，实验测得输入功率 $P_{in}=194W$ ，输出功率 $P_{out}=184W$ ，计算所得效率约为 95%。

6 结论

本文提出了一种适用于电子镇流器的新拓扑，并对新电路的结构和工作原理进行了深入的理论分析、仿真研究和实验验证。新电路具有如下特点：

(1) 新型 MH 灯用单级逆变器拓扑，将 DC/DC 和 DC/AC 两功率级整合成一级 DC/AC 逆变器，电路更加简单，成本降低。

(2) 新型单级逆变器适用于低功率场合，其最大输出功率低于 400W。

(3) 对新电路的仿真结果表明其具有优越的性能，效率约 95%。

(4) 理论分析结果表明，新型单级逆变器工作时可形成 ZVS 或 ZCS 条件，使逆变器开关工作在 ZVS 或 ZCS 工作方式，大大降低了开关损耗。

(5) 搭建了输出功率为 200W 的样机用以驱动

MH 灯，运行结果表明，灯稳定、频闪和声共振消除。实验结果与理论计算及仿真结果相符。

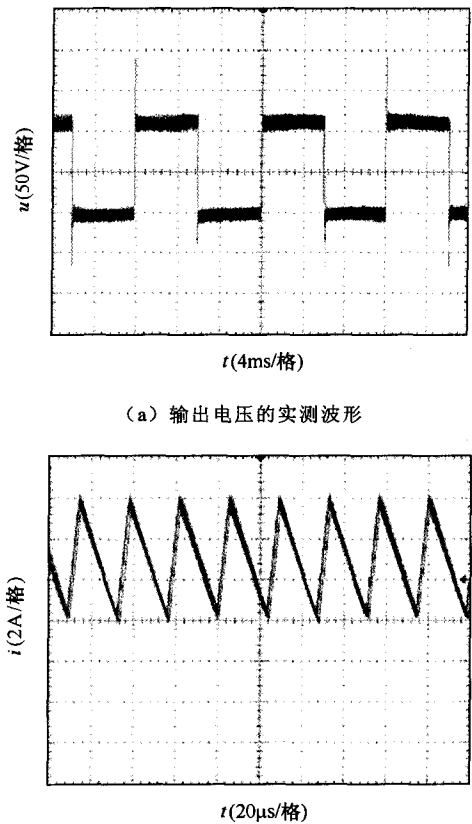


图 8 实验波形

Fig.8 The experimental waveforms

这种逆变器是在 MH 灯的背景提出的，但同样适用于其他纯电阻性负载。

参考文献

- [1] 张卫平, 张晓强, 陈振更, 等. 一种新型软开关 BUCK 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(22): 110-115.
Zhang Weiping, Zhang Xiaoqiang, Chen Zhengeng, et al. A novel soft switching for buck converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(22): 110-115.
- [2] Rasch E, Statnic E. Behavior of metal halide lamps with conventional and electronic ballast[J]. Journal of Illuminating Engineering Society, 1991, 1 (1): 88-96.
- [3] Zhang Weiping, Zhang Dongyan. Design of LCC resonant inverter for metal halide lamp ballast[C]. Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC, 2004, 3: 1558-1562.

- [4] 鲍志云, 王卫, 张伟强, 等. 金属卤化物灯电子镇流器消除声共振的几种方法[J]. 中国照明电器, 2002(9):1-5.
Bao Zhiyun, Wang Wei, Zhang Weiqiang, et al. Several methods of eliminating acoustic resonance in electronic ballast for metal halide lamp[J]. China Light & Lighting, 2002(9):1-5.
- [5] Steigerwald R L. A comparison of half-bridge resonant converter topologies[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1988, 3: 174-182.
- [6] Bhat A K S. Fixed-frequency PWM series-parallel resonant converter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1992, 28: 1002-1009.
- [7] 张卫平, 等. 绿色电源——现代电能变换器技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [8] 谢小高, 张军明, 蔡拥军, 等. 半桥变流器的软开关控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 48-52.
Xie Xiaogao, Zhang Junming, Cai Yongjun, et al. Research on soft-switching control strategies for half-bridge converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (3) :48-52.
- [9] 杨旭, 裴孕情, 王兆安. 开关电源技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.

作者简介

陈亚爱 女, 1961年生, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力电子及电力传动。

张卫平 男, 1957年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子技术及应用。

////////////////////////////////////
(上接第 83 页)

- power supply[J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2004, 19(3): 1-8.
- [8] 杨玉岗, 于庆广, 李洪珠, 等. 四相电压调整模块中平面型可消除直流偏磁集成磁件研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 179-185.
Yang Yugang, Yu Qingguang, Li Hongzhu, et al. Research on planar integrated magnetics whose DC-bias can be eliminated in 4 phase interleaving VRM[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 179-185.
- [9] Li Jieli, Charles R Sullivan, Aaron Schultz. Coupled-inductor design optimization for fast-response low-voltage DC-DC converters[C]. IEEE APEC, 2002: 817-823.
- [10] Li Jieli, Anthony Stratakos, Aaron Schultz, et al. Using coupled inductors to enhance transient performance of multi-phase Buck converters[C]. IEEE APEC, 2004: 1289-1293.
- [11] Anatoli V Ledenev, et al. Multiple power converter system using combining transformers: US, 6545450 B1[P]. 2000-04-08.
- [12] 蔡宣三, 龚邵文. 高频功率电子学[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [13] 卢增艺, 陈为. 应用于多通道 VRM 的耦合电感研究[C]. 第十七届全国电源技术年会, 2007: 38-40.

作者简介

李洪珠 男, 1974年生, 硕士, 讲师, 从事电力电子及磁集成理论方面的研究。

杨玉岗 男, 1967年生, 博士, 教授, 研究领域为电力电子及磁集成技术。