

三电平双降压式全桥逆变器

洪峰, 单任仲, 王慧贞, 严仰光

(航空电源航空科技重点实验室(南京航空航天大学), 江苏省南京市 210016)

A Novel Dual Buck Full Bridge Three-level Inverter

HONG Feng, SHAN Ren-zhong, WANG Hui-zhen, YAN Yang-guang

(Aero-Power Science-Technology Center(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics),
Nanjing 210016, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: A novel dual Buck full bridge three-level inverter (DBFBTLI) was presented. This inverter derived from the traditional dual Buck half bridge dual-level inverter (DBHBI) which had the characteristics of no shoot-through problem, preserving circuit configuration and high efficiency operation. Those merits were remained in proposed inverter. Meanwile disadvantages of DBHBI were overcome in DBFBTLI, such as voltage stress was halved. Though input voltage was higher, the proposed inverter was also suitable. Because the bridge output wave changed to uni-polarity wave from dual-polarity wave of traditional half bridge inverter, the harmonic contents of output voltage were smaller, so the output filter could be reduced. The two big input equalizing capacitors were not need any more in this new inverter. Experiment verifies those analysis.

KEY WORDS: inverter; topology; multilevel; pulse width modulation

摘要: 提出了一种新颖的三电平双降压式全桥逆变器。该逆变器是在两电平双降压半桥逆变器基础上改进得到, 保留了双 Buck 逆变器无桥臂直通、无体二极管反向恢复问题的优点和半周期工作模式, 又克服了其缺点: 器件耐压要求减半, 更适合高压的输出场合; 其桥臂输出不再是传统半桥型逆变器的两电平双极性调制波, 而是直流电压利用率高、谐波含量小的三电平单极性调制波; 其输入侧不再像半桥型逆变器那样需要 2 个大电容进行分压。该逆变器是一种高效高可靠且体积小的性能优异的逆变器。试验验证了以上分析的正确性。

关键词: 逆变器; 拓扑结构; 多电平; 脉冲宽度调制

0 引言

双降压式半桥逆变器^[1-3](dual Buck half bridge inverter, DBHBI)是针对航空航天、不间断电源等

对电源可靠性及效率要求很高的场合提出的一种逆变器拓扑。DBHBI 无桥臂直通和开关管寄生二极管反向恢复问题, 因而能显著降低变换器的开关损耗^[1-3]。工作于半周模式^[1-3]下的 DBHBI 无环流存在, 为同时实现逆变器的高频化和高效率提供了一种简洁的途径。DBHBI 是一种具有独特优点的逆变器拓扑, 近年来研究较多并开始应用于实际。

但 DBHBI 和半桥逆变器^[4-10](本文通称为半桥型逆变器)也存在一些固有缺点^[1-11], 主要有 3 点:

(1) 记输入母线电压为 $\pm U_d$, 则器件电压应力为 $2U_d$, 在高压输入场合应用较困难。

(2) 桥臂只能输出+1 和-1 两态电平, 工作于双极性调制方式, 桥臂输出波形谐波含量大, 需要开关频率高和大滤波器。

(3) 直流侧对母线电压需进行大电容均分, 或者要求输入电压本身就提供正负母线电压和地, 而一般不易满足。

针对以上问题, 本文提出了一种三电平双降压式全桥逆变器(dual Buck full bridge three-level inverter, DBFBTLI)。该逆变器是在 DBHBI 基础上三电平化^[11-15]得到, 即保留了 DBHBI 无桥臂直通、无体二极管反向恢复问题的优点, 也克服了以上半桥型逆变器的缺陷。

1 DBFBTLI 工作原理简介

图 1 为 DBHBI 的电路拓扑图。DBHBI 采用半周期工作模式: 即输出电流为正半周时, 开关管 S_1 、续流二极管 D_1 、滤波电感 L_1 和滤波电容 C_f 构成的 Buck 电路 1 工作; 在输出电流负半周时, 开关管 S_2 、续流二极管 D_2 、滤波电感 L_2 和滤波电容 C_f 构成的 Buck 电路 2 工作, Buck 电路 1 不工作。可见

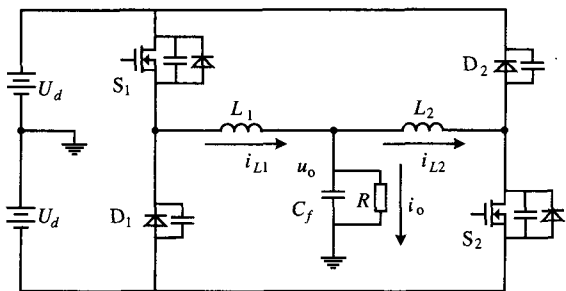


图1 双降压式半桥逆变器

Fig. 1 Dual Buck half bridge inverter

整个电路无桥臂直通的可能, 开关管 S_1 和 S_2 的体二极管并不参与工作过程, 但桥臂中点只能输出 $+U_d$ 或者 $-U_d$ 这 2 种电平, 不能输出 0 电平。

对图 1 DBHBI 电路作如下修改: 将滤波电容 C_f 的原接地处通过 2 个开关管分别接直流母线电压的正极和负极, 且外接的直流母线电压由原来的 $2U_d$ 降为 U_d , 即得到本文提出的三电平双降压式全桥逆变器电路如图 2 所示。图中, 两个电感电流之和为 $i_L=i_{L1}+i_{L2}$; A、C 间电压为 U_{ac} ; B、C 间电压为 U_{bc} 。输出电压正极性的半周, 开关管 S_3 导通, S_4 截止, 逆变器输出电平 U_c 为 $+U_d$ 或 0; 输出电压负极性的半周, S_3 截止, S_4 导通, 逆变器输出电平 U_{bc} 为 $-U_d$ 或 0。电路其它部分的工作模式和 DBHBI 的半周工作模式完全相同, 即输出电流正极性半周, Buck 电路 1 调理工作, Buck 电路 2 不工作; 输出电流负极性半周, Buck 电路 2 调理工作, Buck 电路 1 不工作。

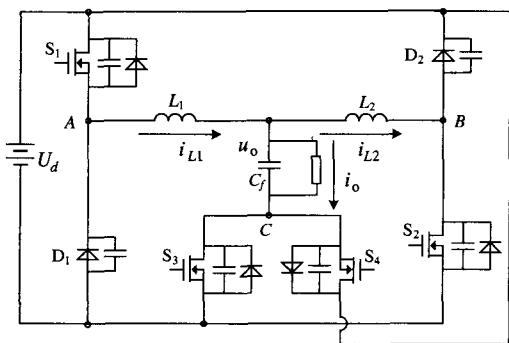


图2 三电平双降压式全桥逆变器

Fig. 2 Dual Buck full bridge three-level inverter

电路具体工作时序如图 3 所示(以空载为例)。可分为 6 阶段 12 个模式, 如图 4 所示。

(1) $t_0 \sim t_1$ 段。

输出电压 u_o 和电流 i_L 均小于 0, 此阶段开关管 S_4 导通, Buck 电路 1 工作, 电路包含 2 个工作模式。

1) 工作模式 1。如图 4(a)所示, 输出电压 $u_o < 0$, 电感电流 $i_{L1} = 0$, 电感电流 $i_{L2} < 0$, 功率开关管 S_3 截止, S_4 导通, S_1 截止, S_2 开通, i_{L2} 线性上升, 变

换器输出电平 U_{bc} 为 $-U_d$ 。

2) 工作模式 2: 如图 4(b)所示, $u_o < 0$, $i_{L1} = 0$, $i_{L2} > 0$, S_3 截止, S_4 导通, S_2 关断, i_{L2} 从功率二极管 D_2 续流, 线性下降, 变换器输出电平 U_{bc} 为 0。

(2) $t_1 \sim t_2$ 段。

t_1 时刻, i_L 由负变正, 输出电压 u_o 仍然小于 0, Buck 电路 1 开始工作, Buck 电路 2 不再工作。 $t_1 \sim t_2$ 段(图 3)包含 2 个工作模式。

1) 工作模式 3。如图 4(c)所示, $u_o < 0$, $i_{L1} > 0$, $i_{L2} = 0$, S_3 截止, S_4 导通, S_1 开通, S_2 截止, i_{L1} 线性上升, 变换器输出电平 U_{ac} 为 0。

2) 工作模式 4。如图 4(d)所示, $u_o < 0$, $i_{L1} > 0$, $i_{L2} = 0$, S_3 截止, S_4 导通, S_1 关断, S_2 截止, i_{L1} 从二极管 D_1 续流, 线性下降, 变换器输出电平 U_{ac} 为 $-U_d$ 。

(3) $t_2 \sim t_3$ 段。

t_2 时刻, 输出电压 u_o 由负变正, S_4 关断, i_L 仍然大于 0, Buck 电路 1 保持调理工作。 $t_1 \sim t_2$ 段(图 3)为 S_3 、 S_4 的开关死区时间, S_3 尚未开通, i_L 流经 S_4 的体二极管。包含以下 2 个可能工作模式:

1) 工作模式 5。如图 4(e)所示, $u_o > 0$, $i_{L1} > 0$, $i_{L2} = 0$, S_3 截止, S_4 截止, S_1 开通, S_2 截止, i_{L1} 流经 S_4 体二极管, 线性上升, 变换器输出电平 U_{ac} 为 0。

2) 工作模式 6。如图 4(f)所示, $u_o > 0$, $i_{L1} > 0$, $i_{L2} = 0$, S_3 截止, S_4 截止, S_1 关断, S_2 截止, i_{L1} 从 D_1 续流, 线性下降, 变换器输出电平 U_{ac} 为 $-U_d$ 。

$t_3 \sim t_6$ 段为 $u_o < 0$ 的半周, S_3 工作, S_4 不通过电流,

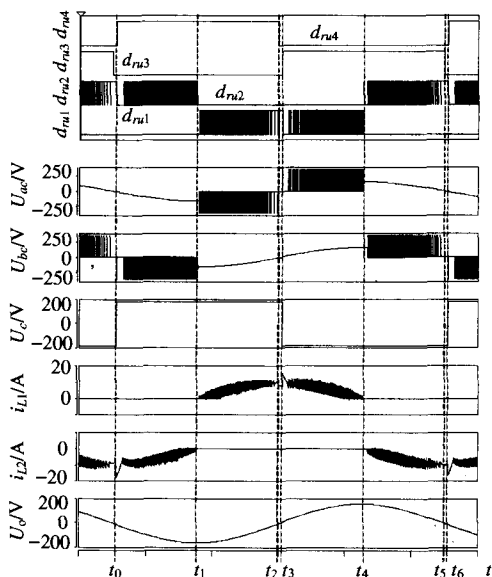


图3 三电平双降压式全桥逆变器时序图

Fig. 3 Key waves of dual Buck full bridge three-level inverter

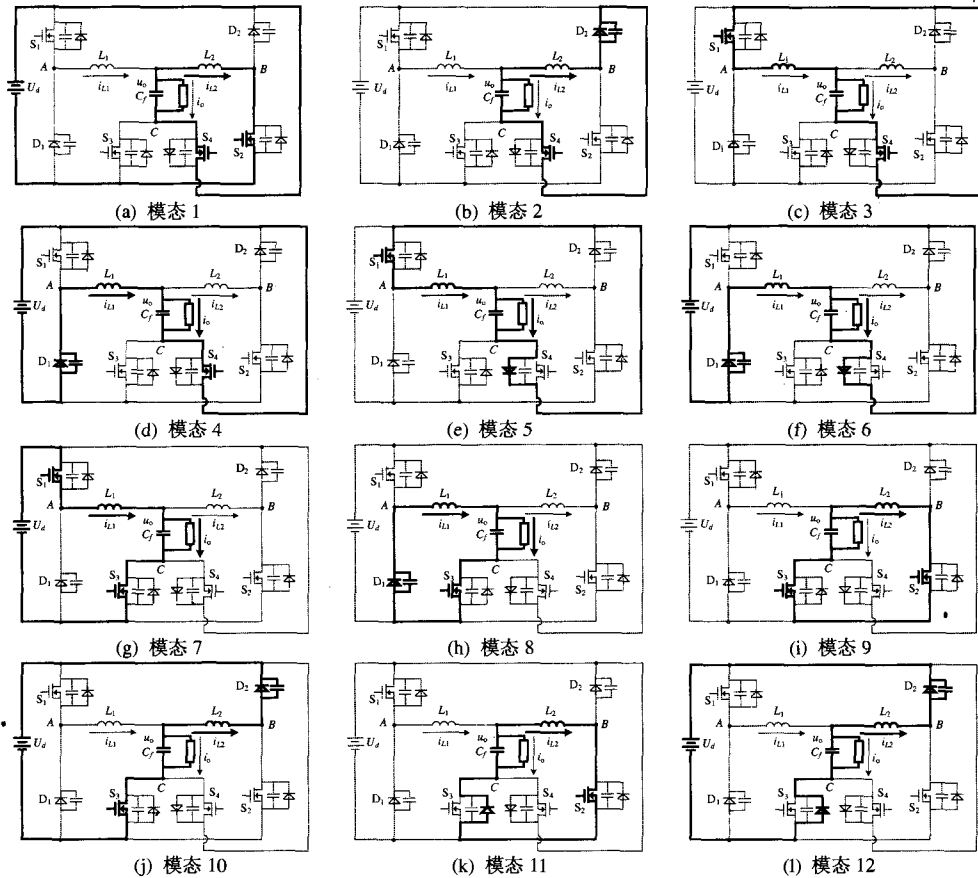


图 4 三电平双降压式全桥逆变器工作模式

Fig. 4 Working models of dual Buck full bridge three-level inverter

电路工作过程同 $u_o > 0$ 的半周，即与 $t_0 \sim t_3$ 段对称，不再赘述。

2 对 DBFBTLI 的简单分析

图 5 为 DBFBTLI 的控制框图，图中， i_r 为电压环输出即电流基准。开关管 S_3 和 S_4 的控制十分简单，采用开环控制，在电压基准大于零的正半周，使 S_3 导通， S_4 截至，电压基准小于零的负半周，使 S_3 截至， S_4 导通即可。 S_3 、 S_4 在整个工频周期均只开关一次，死区影响可忽略不计。将 S_3 、 S_4 通称为工频开关电路，则逆变器输出电压为工频开关电路单元输出电压和双 Buck 电路单元输出电压的叠加。工频开关电路的输出即 C 点电压为一个 180° 导通的工频方波，幅值大小为 U_d 。这部分电路的功能是提供输出电压的基波分量，降低变换器开关损耗。双 Buck 电路单元则采用 PWM 调制，以保证输出电压波形。滞环电流控制方案在双 Buck 电路中得到了成功的应用^[1-3]，具有内在的限流保护能力。通常逆变器采用双环控制，由于电流内环的高度稳定性，电压外环可以做到高增益，系统输出电压精度高，

动态性能得到提高。对双 Buck 逆变器而言，滞环电流控制方案可保证电路在正常工作时不需任何偏置电流，同时克服电感电流断续造成的电压失真，保证逆变器在较高效率和频率下运行^[1-3]。因而在 DBFBTLI 中对双 Buck 电路单元采用滞环电流 PWM 控制方案。

本文的 DBFBTLI 相对半桥型逆变器而言据有以下特点：①当输出电压幅值相同，半桥型逆变器

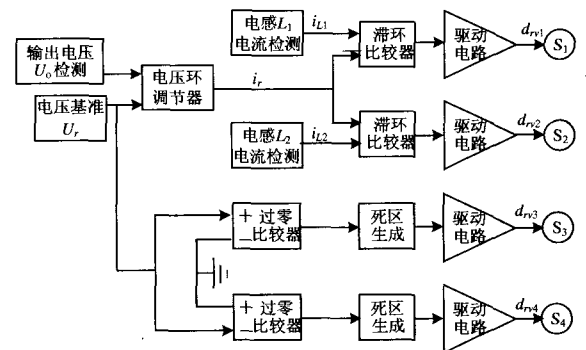


图 5 三电平双降压式全桥逆变器控制框图

Fig. 5 Control method of dual Buck full bridge three-level inverter

的直流侧输入电压大小为 $2U_d$, 而 DBFBTLI 直流侧输入电压大小为 U_d 。半桥型逆变器的器件电压应力为 $2U_d$, 而 DBFBTLI 中的各器件电压应力为 U_d , 这意味着在输出电压相同的情况下, DBFBTLI 可选用耐压定额为半桥型逆变器一半的器件, 器件通态压降和寄生结电容更小, 或者在输入电压相同的情况下, DBFBTLI 的输出电压为半桥型的 2 倍, 因而 DBFBTLI 更适合高压输出的场合。以上也是 DBFBTLI 和全桥电路的类似之处, 因而将其命名为三电平双降压式全桥逆变器, 以和半桥型逆变器相区别。实际上本文提出的逆变器也可以看成是在全桥电路基础上改进, 添加续流直路(D₁、D₂)得到;

②半桥型逆变器的输出电平为两态调制双极性电平, 而 DBFBTLI 的输出电平为三态单极性电平, 谐波含量要小得多, 因而滤波器可大为减小。这方面在电力电子学中早有结论, 本文不再给出数学推导和分析;

③显然 DBFBTLI 的输入侧不再需要半桥型逆变器的输入均压大电容, 也不需要前级电路提供正负电平和地, 但不能采用 3 个 DBFBTLI 电路构成三相逆变, 相对半桥型逆变器而言 DBFBTLI 更适合作为单相逆变器。

3 实验结果

三电平双降压式全桥逆变器的原理样机参数如下: 功率开关管采用 irfp460、功率二极管采用 DSEI60-06A、输出滤波容 $C_f=10\mu\text{F}$ 、输出滤波电感 $L_1=L_2=180\mu\text{H}$, 输入母线电压均为 $U_d=\pm 180\text{V}$ 、输出电压为 $u_o\sim 110\text{V}/400\text{Hz}$ 、额定输出功率为 1000W。为分析比较, 同一台两电平双降压式半桥逆变器的实验结果进行对比, DBHBI 样机参数如下: 开关管采用 irfp460、功率二极管采用 DSEI60-06A、输出滤波电容 $C_f=22\mu\text{F}$ 、输出滤波电感 $L_1=L_2=400\mu\text{H}$, 母线电压 $U_d=\pm 180\text{V}$ 、输出电压 $u_o\sim 110\text{V}/400\text{Hz}$ 、额定输出功率为 1000W。2 台原理样机的差异在于滤波器参数和输入电压的不同。

图 6 为三电平双降压式全桥逆变器空载和满载时的关键实验波形: 输出电压 u_o 、工频开关电路输出电压 u_c 、Buck 电路 2 输出即桥臂中点 B 与 C 点电压之差 u_{bc} 、S₁ 管的驱动信号 u_{GS1} 。对实验波形给出如下解释: 空载(图 6(a))时, 输出电流相位超前输出电压 90° , Buck 电路 2 在输出电流小于零时工作, 对应的是输出电压下降的区间, 此时逆变器滤波前的输出为 B、C 2 点电压的合成 u_{bc} , 在输出电

压大于零时输出电平为 $+U_d$ 和 0, 在输出电压小于零时输出电平为 $-U_d$ 和 0; 在输出电流大于零时(即输出电压上升段)Buck 电路 1 工作(S₁ 驱动见图中 u_{GS1}), Buck 电路 2 不工作, 因而此时 u_{bc} 等于输出电压。满载(图 6(b))时, 输出电压电流相位几乎一致, 因而 Buck 电路 2 工作区间对应输出电压负半周。实验同前文分析的工作原理完全吻合, 很好的实现了逆变器的单极性三电平输出。

图 7 为三电平双降压式全桥逆变器和 DBHBI 的效率 η 比较, 可见三电平双降压式全桥逆变器保持了 DBHBI 高效率的特点。这是在两台原理样机选用相同功率器件下得到的, 一个合理的预计是: 三电平双降压式全桥逆变器可以选用耐压定额减半的功率器件, 器件导通电阻更小、开关速度更快, 进一步减小导通损耗和开关损耗。图 8 为三电平双降压式全桥逆变器和 DBHBI 的输出电压 η_{THD} 比较, 两者在这一项上达到的指标大致相当。而由前文的原理样机参数可知, 三电平双降压式全桥逆变器输

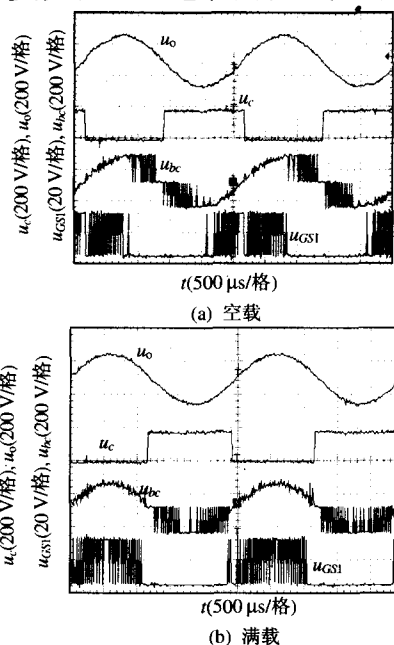


图 6 三电平双降压式全桥逆变器的实验波形

Fig. 6 Experiment waves of dual Buck full bridge three-level inverter

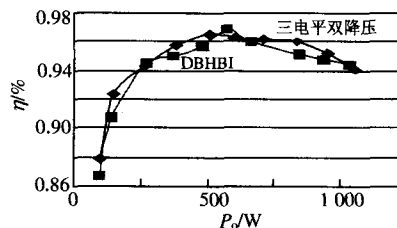
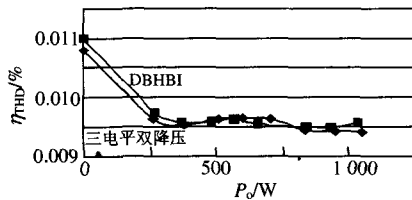


图 7 效率曲线对比

Fig. 7 Comparison of efficiency

图 8 η_{THD} 对比Fig. 8 Comparison of η_{THD}

出滤波器要小得多。

4 结论

本文提出的三电平双降压式全桥逆变器是一种新颖的逆变器电路拓扑, 具有以下特点:

(1) 保留了三电平变换器本身输出电压谐波含量小的优点, 有助于减小滤波器, 同时可以降低 PWM 调制部分的开关频率, 降低开关损耗, 提高效率。

(2) 同半桥型逆变器相比, 直流侧无需均压大电容, 功率器件电压应力低, 使得中小功率的开关器件可适用于高压、大功率的场合。

(3) 继承了双 Buck 电路无桥臂直通、无开关管体二极管反向恢复问题的优点。

(4) 整个电路结构和控制方案均较为简单, 易于实现。

(5) 需 PWM 调制电路单元采用滞环电流控制方案, 逆变器动态性能佳。

本逆变器适用于航空航天等对电源可靠性、功率密度和变换效率要求较高。适合作为单相逆变器, 不适合应用于三相逆变的场合。

参考文献

- [1] Liu Jun, Yan Yangguang. Reliable hysteresis current controlled dual Buck half bridge inverter[J]. Transaction of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2003, 1(1): 67-72.
- [2] 洪峰, 刘军, 严仰光. 滞环电流控制型双 Buck 逆变器[J]. 电工技术学报, 2004, 19(8): 73-77.
Hong Feng, Liu Jun, Yan Yangguang. Hysteresis current controlled dual Buck half bridge inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(8): 73-77(in Chinese).
- [3] 朱成花, 严仰光. 一种新颖的串并联输出双 Buck 逆变器[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(20): 12-15.
Zhu Chenghua, Yan Yangguang. A novel series/parallel output dual Buck inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(20): 12-15(in Chinese).
- [4] 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(in Chinese).

- [5] Yoshida K, Maeoka T, Ishii T, et al. Novel zero-voltage-switched half-bridge converter with active current-clamped transformer [C]. Proceedings of IEEE-PESC'1996, Milan, Italy, 1996.
- [6] Lin B R, Hung T L. Single-phase half-bridge converter topology for power quality compensation[J]. IEE Proceedings on Electric Power Applications, 2002, 149(5): 351-359.
- [7] Hong Mao, Jaber A, Abu-Qahoug, et al. A modified ZVS half-bridge DC-DC converter[C]. Proceedings of IEEE-APEC'2004, Anaheim, Cal., USA, 2004.
- [8] Gao Liliang. Improvement in capacitor voltage balancing using multi-phase diode-clamped multi-level inverters[C]. 3rd IET International Conference on Power Electronics, Paris, France, 2006.
- [9] 费万民, 吕征宇, 姚文熙. 三电平逆变器特定谐波消除脉宽调制方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 11-15.
Fei Wanmin, Lü Zhengyu, Yao Wenxi. Research of selected harmonic elimination PWM technique applicable to multi-level voltage inverters [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 11-15(in Chinese).
- [10] Lai Jisheng, Peng Fangzheng. Multilevel converter: a new breed of power converter[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1996, 32(3): 509-517.
- [11] Fujii K. Comparison of hard-switched multi-level inverter topologies for STATCOM by loss-implemented simulation and cost estimation [C]. IEEE PESC'05, Recife, Brazil, 2005.
- [12] 吴洪洋, 何湘宁. 级联型多电平变换器 PWM 控制方法的仿真研究 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 42-46.
Wu Hongyang, He Xiangning. Research on PWM control of a cascade multilevel converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 42-46(in Chinese).
- [13] 孙宜峰, 阮新波. 级联型多电平逆变器的功率均衡控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(4): 126-133.
Sun Yifeng, Ruan Xinbo. Power balance control schemes for cascaded multilevel inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(4): 126-133(in Chinese).
- [14] Li Li, Czarkowski D, Liu Yaguang, et al. Multilevel selective harmonic elimination PWM technique in series-connected voltage inverters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2000, 36(1): 160-170.
- [15] Tolbert L M, Peng F Z, Habetler T G. Multilevel PWM methods at low modulation indices[J]. IEEE Trans. Power Electron., 2000, 15(4): 719-725.

收稿日期: 2007-11-14.

作者简介:

洪峰(1970—), 男, 汉族, 安徽宁国人, 博士研究生, 研究方向为电力电子功率变换器、航空电源, hongfeng@nuaa.edu.cn;

单任仲(1982—), 男, 汉族, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术、航空电源;

王慧贞(1964—), 女, 汉族, 高级工程师, 研究方向为电力电子技术、航空电源;

严仰光(1935—), 男, 汉族, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子技术、航空电源。

(编辑 王彦骏)