

双降压式光伏逆变器的电流滞环控制

岳舟

湖南人文科技学院, 湖南娄底 417001

摘要 逆变器是光伏发电系统的核心设备之一,为提高逆变器的可靠性和稳定性,获得比较理想的正弦输出电压,优化逆变器的性能,研究了一种新颖的双降压式光伏逆变器。对 DC/AC 逆变器的构成原理,控制方案等进行了研究。在控制上,采用定环宽两态调节的滞环电流控制策略。深入分析了两态滞环电流控制的逆变器的工作原理,给出了逆变器的输入输出关系,阐述了所采用的双环控制的电流滞环控制基本设计方法。Matlab 软件仿真表明,控制策略简单、有效,使用该控制方法的系统具有良好的稳态和动态特性,输出电压波形好,具有一定的实用价值。

关键词 光伏逆变器;电流滞环;双环控制;仿真

中图分类号 TM921

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.34.010

Dual Buck PV Inverter Based on Current Hysteresis Control

YUE Zhou

Hunan Institute of Humanities, Science and Technology, Loudi 417001, Hunan Province, China

Abstract The inverter is one of the core equipment in a photovoltaic system. To improve the reliability and stability of the inverter, to obtain an ideal sinusoidal output voltage and to optimize the performance of the inverter, a novel two-buck PV inverter is proposed in this paper. The DC / AC inverter principle and the control scheme are discussed. The fixed-width two-state ring adjustable hysteresis current control strategy is adopted. The paper gives an in-depth analysis of a two-state hysteresis current control of inverter, the inverter input-output relationship, the use of the double-loop control of the basic design of hysteresis current control method. Matlab simulations show that the control strategy is simple, and the effective use of the control system will bring about a good steady-state and the dynamic characteristics of the output voltage waveform are good, which would enjoy a practical value.

Keywords PV inverter; current hysteresis; double-loop control; simulation

0 引言

随着传统能源消费的增长、生态环境的日益恶化和人类可持续发展的要求,世界各国都在积极开发无污染可再生的新能源^[1]。太阳能资源丰富、分布广泛、可以再生、不污染环境,使得太阳能光伏发电成为新能源开发中的主流。而光伏逆变器是太阳能光伏发电系统中的核心部分,其效率的高低、可靠性的好坏将直接影响整个光伏系统的性能和投资^[2-3]。逆变器作为光伏发电系统和电网的接入口,在光伏发电中起着至关重要的作用,研究光伏逆变器的控制方法具有重要实用价值。

逆变器的控制方法基本可以分为电压型和电流型两类。电流控制具有动态响应快、电流控制精度高、自然限流、易于并联和能补偿多种因素引起的输入输出电压波动等优点^[4],广泛应用于各种高性能变换器中。目前应用于逆变器的电

流控制方法有很多,可分为线性和非线性两类。滞环控制是一种典型的非线性控制技术^[5],电流滞环控制具有以下特点:(1) 硬件电路简单,容易实现;(2) 不用载波,输出电压波形中不含特定频率的谐波分量;(3) 环宽越窄,开关频率越高,电流脉动越小越接近正弦波,THD 也越小,但开关损耗相应增大,要根据变换器性能要求折衷考虑;(4) 控制无条件稳定,动态响应快,电流跟踪精度高。电流被实时控制,电源或者输出电压变动立即反映到电感电流变化率上,可以快速响应;(5) 变频工作,使得输出电压谐波呈现宽范围带状分布,给输出滤波器的设计带来困难。

本文以发展逆变技术为出发点,在比较目前常用逆变器拓扑优点的基础上,研究了一种新颖的双降压式光伏并网逆变器。文中深入分析了两态滞环电流控制的逆变器的工作

收稿日期:2011-08-29;修回日期:2011-10-15

基金项目:湖南省教育厅资助项目(10C0832)

作者简介:岳舟,讲师,研究方向为电力电子与电力传动,电子信箱:yuezhou2000@163.com

原理,给出了逆变器的输入输出关系。仿真证明,该逆变器综合了传统桥式逆变器的优点,性能优越,非常适用于对可靠性要求高的场合中,给光伏并网逆变器的发展提供了一个很好的方向。

1 拓扑结构及工作方式

双降压式光伏逆变器主电路拓扑如图 1 所示,它由 2 个双降压式半桥逆变器组成。其中 S_1, S_2, S_3, S_4 为主功率开关管, D_1, D_2, D_3, D_4 为续流二极管,输出滤波器由电感 L_1, L_2, L_3, L_4 及电容 C_f 构成, R_L 为负载。每个桥臂由 1 个功率管和 1 个二极管构成,通过两个滤波电感相连于 2 个桥臂之间。

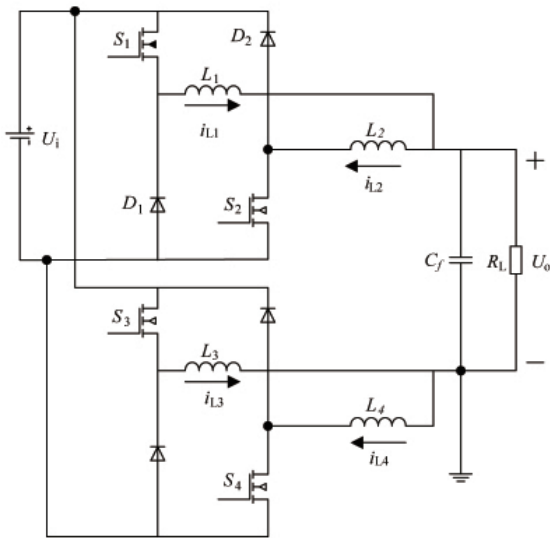


图 1 双降压式光伏逆变器拓扑结构
Fig. 1 Double buck PV inverter topology

双降压式光伏逆变器可工作于 2 种方式:电流全周期工作方式和电流半周期工作方式。电流全周期工作方式的功率

开关管在整个输出周期内工作,且任意时刻每个电感上都有电流,而电流半周期工作方式的功率开关管在半个输出周期内工作,任意时刻只有两个电感上有电流。因此,电流半周期工作方式比电流全周期工作方式的开关损耗小;电流全周期工作方式流过输出滤波电感的电流有效值比电流半周期工作方式大,输出滤波电感所选的导线粗,体积大,重量重,功率管的导通损耗高。基于以上考虑,本文采用电流半周期工作方式,进一步提高效率和功率密度。

2 控制策略

滞环电流控制具有系统动态响应快,跟踪精度高,稳定性高,实现简单等优点,适用于对动态响应要求较高的系统^[6-7]。该逆变器采用电压外环、电感电流内环双环控制,双环控制提高了逆变器的动态响应速度,且拥有内在的限流能力。电压调节器采用 PI 调节器,电流环需要反馈前半个输出周期和后半输出周期分别工作的两个电感电流。当调制频率远远高于输出滤波器频带宽度时,电感电流内环可等效为一个比例环节,其输出阻抗就为滤波电容和负载阻抗的并联。系统由原来的二阶系统降为稳定的一阶系统,消除了滤波电感给系统带来的影响,简化了系统的闭环设计^[8]。

电路工作时,电感 L_1, L_4 中的电流始终保持一样, L_2, L_3 中的电流始终保持一样,所以只需采样 i_{L1}, i_{L2} 即可反映电路整个输出周期工作的电流状态, i_{L1}, i_{L2} 参考方向见图 1。系统控制框图如图 2 所示, h 为滞环宽度, i_{L1}, i_{L2} 分别为 $i_{L1}, -i_{L2}$ 采样信号。

传统桥式逆变器只有一个输出滤波电感,电感电流可正可负,逆变器四象限运行。双降压式光伏逆变器功率开关管和二极管都是半个周期高频开关,半个周期处于关断状态。在每一时刻两个电感同时工作,另两个电感电流为零,电感上只流过单向电流。以电压为横坐标,电流为纵坐标,分析下双降压式光伏逆变器四象限工作运行情况。

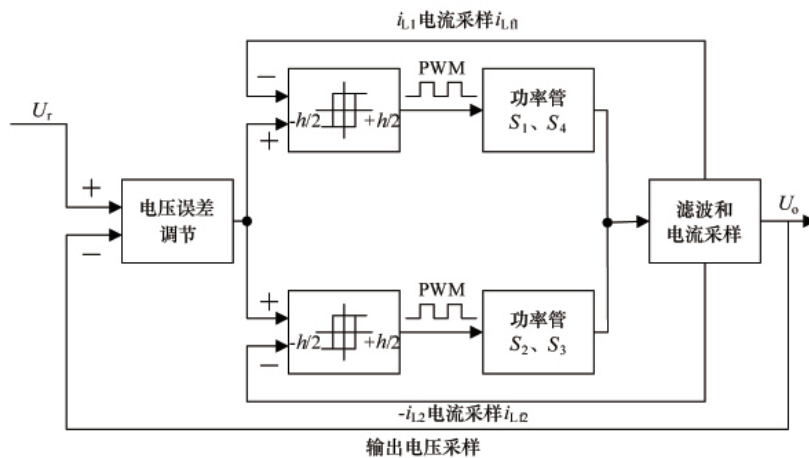


图 2 控制原理图
Fig. 2 Control diagram

当电感电流连续时, 在电流基准 i_r 为正的半周期, S_1 、 S_4 和 D_1 、 D_4 调制工作, 开关管占空比为 d 。当 S_1 、 S_4 同时开通时, 桥臂输出电压 u_{ab} 为输入直流电压 $+U_i$, 开关管开通时间为 dT_s , 当二极管 D_1 、 D_4 续流时, u_{ab} 为 $-U_i$, 二极管续流时间为 $(1-d)T_s$, 则一个开关周期内 u_{ab} 平均电压为 $(2d-1)U_i$, 当 $d < 0.5$ 时, u_{ab} 为负, i_L 为正, 逆变器工作在第 2 象限。当 $d > 0.5$ 时, u_{ab} 为正, i_L 为正, 逆变器工作在第 1 象限。同样, 在 i_r 为负的半周期, S_2 、 S_3 和 D_2 、 D_3 调制工作, S_2 、 S_3 开通时间为 dT_s , D_2 、 D_3 续流时间为 $(1-d)T_s$ 。当 S_2 、 S_3 同时开通时, 桥臂输出电压 u_{dc} 为输入直流电压 $-U_i$, 当 D_2 、 D_3 续流时, u_{dc} 为 $+U_i$, 一个开关周期内 u_{dc} 平均电压为 $(1-2d)U_i$, 当 $d < 0.5$ 时, u_{dc} 为正, i_L 为负, 逆变器工作在第 4 象限。当 $d > 0.5$ 时, u_{dc} 为负, i_L 为负, 逆变器工作在第 3 象限。

当电感电流断续时, 设开关管导通时间为 d_1T_s , 二极管续流时间为 d_2T_s , 且 $d_2 < 1-d_1$ 。在 i_r 为正的半周期, 一个开关周期内 u_{ab} 平均电压为 $(d_1-d_2)U_i$, 当 $d_1 < d_2$ 时, 即 $d_1 < 0.5$ 时, u_{ab} 为负, i_L 为正, 逆变器工作在第 2 象限。当 $d_1 > d_2$ 时, 即 $d_1 > 0.5$ 时, u_{ab} 为正, i_L 为正, 逆变器工作在第 1 象限。同理, 在 i_r 为负的半周期, 当 $d_1 < 0.5$ 时, u_{dc} 为正, i_L 为负, 逆变器工作在第 4 象限。当 $d_1 > 0.5$ 时, u_{dc} 为负, i_L 为负, 逆变器工作在第 3 象限。

综上所述, S_1 、 L_1 、 R_1 、 C_f 、 L_4 、 S_4 、 D_1 、 D_4 所构成的这部分电路工作在第 1、2 象限; S_2 、 L_2 、 R_2 、 C_f 、 L_3 、 S_3 、 D_2 、 D_3 所构成的这部分电路工作在第 3、4 象限。双降压式全桥逆变器可四象限运行, 符合逆变器的工作要求。

3 输入输出电压关系

3.1 电感电流连续时输入输出电压关系

分析输入输出电压关系时假设逆变器工作于 i_L 正半周, 所得结论适用于整个逆变周期。

设此时 i_L 为正, 电感 L_1 、 L_4 同时工作, 且 $L_1=L_4=L$, $i_{L1}=i_{L4}=i_L$ 。当电感电流连续时, 假设开关占空比为 d , 则当 S_1 、 S_4 导通时, 根据 L_1 、 L_4 上电压电流的关系有:

$$2L \frac{di_L}{dt} = U_i - U_o \quad (1)$$

当 S_1 、 S_4 关断时, D_1 、 D_4 导通, 有:

$$2L \frac{di_L}{dt} = U_i - U_o \quad (2)$$

联立式(1)、式(2), 可得电感电流连续时的输入输出电压的瞬时关系为

$$\frac{U_o}{U_i} = 2d - 1 \quad (3)$$

由式(3)可以看出, 当电感电流连续时, 输入输出增益成线性, 它仅和占空比 d 有关。

3.2 电感电流断续时输入输出电压关系

当电感电流断续时, 在关断时间结束前续流二极管电流就下降到零, 由于开关管结电容的存在, 逆变器可能会工作于单次振荡模态或多次振荡模态。由于振荡态的电感电流很小, 所以在推导电感电流断续模式输入输出电压关系时认为振荡模态的电感电流为零, 断续时电感电流示意图见图 3。

仍假设逆变器工作于 i_L 正半周进行分析。假设开关管开

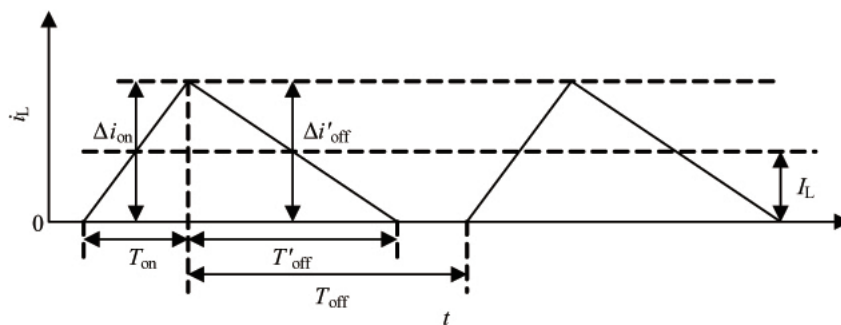


图 3 电感电流断续时电流波形

Fig. 3 Inductor current waveform when the current is discontinuous

关周期为 T_s , 开关占空比为 d , 导通时间为 T_{on} , 导通期间电感电流变化量为 Δi_{on} , 关断时间为 T_{off} , 开关管关断后电流持续时间为 T'_{off} , 电感电流变化量为 $\Delta i'_{off}$, 则此开关周期电感 L_1 、 L_4 电流平均值 I_L 为

$$I_L = \frac{1}{2T_s} (\Delta i_{on} T_{on} + \Delta i'_{off} T'_{off}) \quad (4)$$

式中:

$$\Delta i_{on} = \frac{1}{2L} (U_i - U_o) T_{on} \quad (5)$$

$$\Delta i'_{off} = \frac{1}{2L_1} (U_i - U_o) T'_{off} \quad (6)$$

在一个开关周期内 $\Delta i_{on} = \Delta i'_{off}$, 联立式(4)一式(6)可得

$$\frac{U_i (U_i - U_o)}{U_i + U_o} = \frac{2L_1 L_1}{d^2 T_s^2} \quad (7)$$

由式(7)可以看出, 当电感电流断续时, 输入输出电压关系成非线性, 它不仅与占空比 d 有关, 还与开关周期 T_s 、电感电流平均值 I_L 有关。

根据以上分析可以看出, 当电感电流较小时逆变器工作在断续模态时, 存在很高的非线性内阻, 输入输出增益为非线性, 输出电压的大小不仅与输入电压 U_i 、占空比 d 有关, 还与开关周期 T_s 、开关周期内电感电流平均值 I_L 有关。如果逆变器工作在这一区域, 为了维持一定的输出与输入电压比, 占空

比随负载变化非常大^[9]。如果逆变器动态响应速度较慢,输出电压畸变不能得到很快矫正。所以要求系统有快速的动态响应,使输出电压快速而准确的跟踪正弦基准信号,对输出电压作出校正和调节,所以在选择控制策略时一定要以快速响应为主要目标。

4 系统仿真

采用 Matlab/Simulink 及 S 函数对图 1 所示的双降压式光伏逆变器进行仿真分析,并假设输入电源、功率开关、电感及电容等均为理想元件。仿真参数设置如下:输入直流电压 360V,参考输出电压幅值和频率可任意设置,输出滤波电感 $L_1=L_2=L_3=L_4=550\mu\text{H}$,输出滤波电容 $C_f=4.4\mu\text{F}$,开关频率为 40kHz,滞环宽度 h' 约为 2.3A。为说明双降压式光伏逆变器变

压变频的性能,仿真分稳态仿真和动态仿真两种情况进行。

4.1 稳态仿真

稳态分析在于验证系统对频率和幅值固定的参考信号的跟踪情况。仿真时任取参考信号分别为 100V/100Hz、220V/50Hz 和 300V/25Hz。仿真波形如图 4 所示,仿真结果见表 1 (表中 THD 表示总谐波失真度)。图 5 为电感 L_1 电流 i_{L1} 、电感 L_2 的反向电流 $-i_{L2}$ 的仿真波形。

表 1 稳态分析的仿真结果

Table 1 Steady-state analysis of simulation results

电压/V	频率/Hz	THD/%
99.35	100	0.74
218.7	50	0.31
298.3	25	0.22

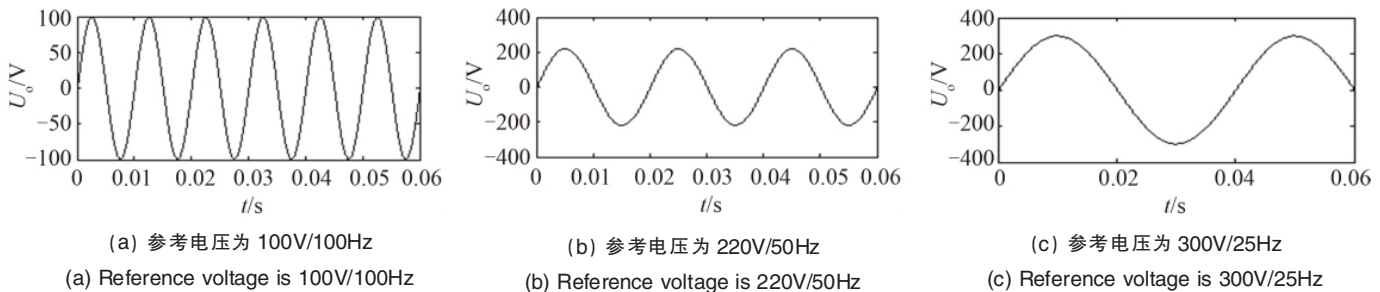


图 4 稳态时输出电压仿真波形

Fig. 4 Steady-state output voltage simulation waveform

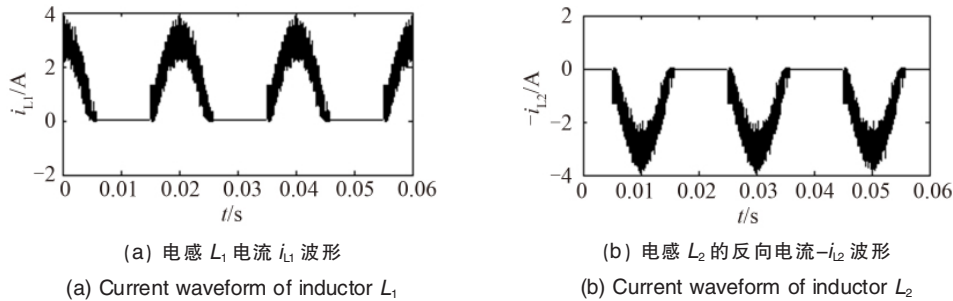


图 5 参考电压设为 220V/50Hz 的仿真波形

Fig. 5 Simulation waveform of the reference voltage set to 220V/50Hz

4.2 动态仿真

动态分析在于考核系统在运行过程中若其参考输出电压、频率或负载发生突变时的运行情况,仿真分两种情况进行:

(1) 参考信号发生突变,负载不变。如取参考信号由 220V/50Hz 突变至 100V/25Hz,又回到 220V/50Hz。仿真波形见图 6。

(2) 负载发生突变,参考信号不变。如取参考信号为 220V/50Hz,负载由 50Ω 突变至空载又回到 50Ω,相应的输出相电压 U_o 与相电流波形 i_r 见图 7。

由仿真波形及表 1 可见:

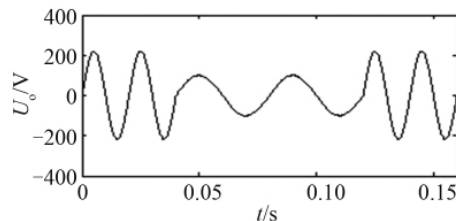
(1) 双降压式光伏逆变器能在一定范围内实现输出电压

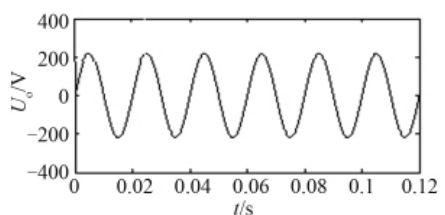
图 6 参考电压频率与幅值发生突变时的电压波形

Fig. 6 Voltage waveform when reference voltage frequency and amplitude are mutated

的任意调节,且输出电压能较准确地跟踪参考值的变化;

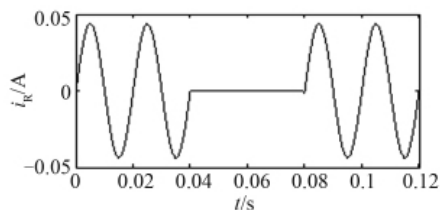
(2) 双降压式光伏逆变器能在一定范围内实现输出频率的任意调节,且输出频率和设定的参考值一致;





(a) 输出电压波形

(a) Output voltage waveform



(b) 输出电流波形

(b) Output current waveform

图7 负载由50Ω突变至空载又回到50Ω的仿真波形

Fig. 7 Simulation waveform when mutation is released to zero from load 50Ω back to 50Ω

(3) 双降压式光伏逆变器可直接输出高品质的正弦波而无需滤波环节,波形失真度小。

(4) 从动态仿真波形可见,系统在运行过程中若参考信号发生突变,系统可迅速进入新的稳态,过渡过程很短;当负载发生突变时,输出电压几乎不受影响,可见系统具有很好的动态性能。

5 结论

本文针对既可独立运行又可并网运行的双降压式光伏逆变器,介绍了该拓扑结构的基本构成及其工作原理,分析了双降压式光伏逆变器的输入输出关系,阐述了所采用的双环控制的电流滞环控制基本设计方法,并通过仿真对其有效性和可行性进行了验证。结果表明,采用电容电压外环、电感电流内环的双环控制,电流滞环控制的双降压式光伏逆变器

具有良好的动态和稳态性能,能在一定范围内实现输出电压和频率的任意调节,且直接输出高品质的正弦波,谐波成分少,具有较好的应用价值。

参考文献 (References)

- [1] Myrzik J M A, Calais M. String and module integrated inverters for single-phase grid connected photovoltaic systems: A review [C]// Proceedings of IEEE Power Tech Conference, 2003 IEEE. Bologna: IEEE, 2003: 2-8.
- [2] Calais M, Myrzik J, Spooner T, *et al.* Inverters for single-phase grid connected photovoltaic systems: An overview [C]//Proceeding 33th IEEE Power Electronics Specialists Conference. Cairns, Qld, Australia: IEEE, 2002: 1995-2000.
- [3] Nayar C V. Control and interfacing of bi-directional inverters for off-grid and weak grid photovoltaic power systems [C]//Power Engineering Society Summer Meeting, 2000 IEEE. Seattle, WA, USA: 2000: 1280-1282.
- [4] Chen Yaoming, Liu Y C, Hung S C, *et al.* Multi-input inverter for grid-connected hybrid PV/wind power system [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2007, 22(3): 1070-1077.
- [5] 应建平, 沈红, 张德华, 等. 双滞环控制的三相双幅有源箝位谐振直流环节逆变器 [J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(2): 8-12.
Ying Jianping, Shen Hong, Zhang Dehua, *et al.* *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(2): 8-12.
- [6] 马海啸, 龚春英, 严仰光. 电流滞环控制半桥双降压式逆变器输出滤波器设计 [J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(13): 98-103.
Ma Haixiao, Gong Chunying, Yan Yangguang. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(13): 98-103.
- [7] 洪峰, 刘军. 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. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2004, 19(8): 73-77.
- [8] 王赞, 肖岚, 姚志全, 等. 双Buck电压源逆变器的半周期电流调制方法 [J]. *电工技术学报*, 2007, 22(5): 104-110.
Wang Zan, Xiao Lan, Yao Zhilei, *et al.* *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2007, 22(5): 104-110.
- [9] 谢小高, 张军明, 蔡拥军, 等. 半桥逆变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.* *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(3): 48-52.

(责任编辑 林祥磊, 代丽)

《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映我国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域我国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。