

基于 DSP 控制的多输出并网逆变器

姚志垒¹, 肖 岚²

- (1. 盐城工学院电气与信息工程学院, 江苏省 盐城市 224003;
2. 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)

Research on Multiple Output Grid-connected Inverters Based on DSP Control

YAO Zhi-Lei¹, XIAO Lan²

- (1. Electrical and Information Engineering College, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224003, Jiangsu Province, China;
2. Aero-Power Science-Technology Center(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics), Nanjing 210016, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: According to the different grid voltage in many countries, a novel multiple output grid-connected inverter is proposed based on DSP control. The grid-connected inverter can output many kinds of countries' grid voltage by series or parallel of two inverters and DSP control. The stability of the grid-connected inverter is unaffected at two modes. The operation principle, current sharing of two inverters at parallel mode, voltage sharing of two inverters at series mode, stability and relative stability between series and parallel modes are analyzed in detail. Finally, a 1 000 VA series and parallel combined dual-Buck half-bridge inverters is established based on DSP control. The experimental results verify the theoretical analysis and show the power of each inverter shares well.

KEY WORDS: grid-connected inverter; digital signal processor; distributed generation system; series mode; parallel mode

摘要: 针对世界各国电网电压规格种类较多的情况, 提出一种基于DSP控制的可输出多个国家电网电压规格的并网逆变器。通过DSP控制和2台逆变器的串联和并联, 实现了多种规格电网电压的输出, 且串联和并联2种运行模式不影响系统的稳定性。详细阐述了逆变器的工作原理, 分析了2台逆变器在串联模式下的均压和在并联模式下的均流效果, 及串联和并联2种运行模式对系统稳定性及相对稳定性的影响, 并以一台1 000 VA基于DSP控制的串并联双降压式半桥逆变器进行了实验验证。实验结果表明在串联和并联2种运行模式下2台逆变器具有很好的功率均分度。

关键词: 并网逆变器; 数字信号处理器; 分布式发电系统;

基金项目: 航空科技支撑基金(05C52006); 南京市科技计划(051a150018); 高校科研成果产业推进基金项目(JHB06-02); 重点学科建设开放基金(XKY2006058)。

串联模式; 并联模式

0 引言

随着化石能源的不断紧缺, 用电需求量的不断提高, 急切需要有新的能源来逐步代替化石能源。如今, 风力发电, 水力发电, 太阳能, 潮汐能等已得到大力发展。同时, 分布式发电系统由于具有缓解电网用电紧张、减少发电站的发电量、在电网断电时对关键负载起不间断供电的作用而成为现在研究的一个热点, 逆变器正是其中的一个重要组成部分。然而世界上电网电压规格较多, 如110 V/60 Hz、120 V/60 Hz、240 V/50 Hz、220 V/50 Hz等, 对传统单电压输出的并网逆变器^[1-5]来说, 通用性差。2005年, 美国举办的“世界能源竞赛”要求并网逆变器能输出多种规格的电网电压, 如110/240 V, 50/60 Hz可选, 因此, 研制出适合于多个国家电网电压的逆变器将是未来发展的趋势。

由上面电网电压有效值看出, 较高电网电压近似为较低电网电压的2倍, 因此, 可以通过两台逆变器的串并联组合实现多种电网电压规格的输出。当输出较高电网电压时, 采用2台逆变器串联; 当输出较低电网电压时, 采用2台逆变器并联来实现。

文献[6]提出了一种串/并联双降压式半桥逆变器, 但只能输出两种规格的电压: 100/200 V, 50 Hz, 不具有通用性。在参数不一致的情况下, 并联运行模式下, 该文提出的控制策略不能实现2台逆变器的功率均分; 串联运行模式下, 该控制策略只控制一台逆变器的输出电压, 不能保证总的输出电压具有很好的正弦度。

针对上述问题，提出了一种基于DSP控制可输出多种电压规格的串并联组合式并网逆变器。本文将详细阐述该逆变器的工作原理，分析两台逆变器在串联模式下的均压和在并联模式下的均流效果，及串并联两种运行模式对系统稳定性和相对稳定性的影响，并以一台 1 000 VA 基于DSP控制的串并联组合式双降压式半桥逆变器进行了实验验证。

1 工作原理

图 1 是多输出串并联组合式逆变器主电路图。其中， L_{f1} 、 L_{f2} 、 C_{f1} 、 C_{f2} 分别是逆变器 1 和逆变器 2 的输出滤波电感和输出滤波电容； u_{o1} 、 u_{o2} 和 u_o 分别是逆变器 1、逆变器 2 和总的输出电压； i_{L1} 、 i_{L2} 分别是逆变器 1 和逆变器 2 的输出滤波电感电流； S_1 是双刀双掷继电器；实现串并联两种运行模式的切换； u_c 是 S_1 的控制信号；参考方向如图所示。

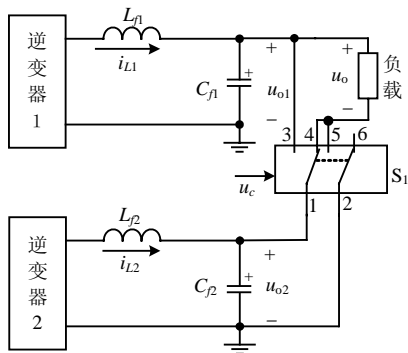


图 1 串并联组合式逆变器主电路
Fig.1 Main circuit of series and parallel combined inverters

图 2 是 DSP 控制框图。其中， u_{ref} 是输出电压给定； S_2 是 50/60 Hz 频率选择开关； S_3 是 110/120 V 输出电压选择开关； S_4 是串联和并联 2 种运行模式的选择开关，其它参数同图 1。开关 S_2 和 S_3 分别确定输出电压给定 u_{ref} 的频率和幅值；开关 S_4 确定串并联两种运行模式。当 S_4 闭合时， u_c 为低电平，控制图 1 中 S_1 的触点 1 与 4 相连、2 与 6 相连（触点 6 悬空），实现串联工作模式；当 S_4 断开时， u_c 为高电平，控制图 1 中 S_1 的触点 1 与 3 相连，触点 2 与 5 相连，实现并联工作模式。

因此，通过 S_2 、 S_3 和 S_4 三者开关状态的不同组合，可实现 110/120/220/240 V，50/60 Hz 多种电网电压规格的输出，实现了并网逆变器的通用性。

图 3 是输出电压反馈控制框图。其中， u_{of1} 、 u_{of2} 、 u_{of} 分别是逆变器 1、逆变器 2 和总的输出电压反馈。采用单刀双置选通芯片 MAX319，对两种运行模式下的输出电压给定进行选择，其控制信

号为 u_c 。当工作在并联模式时，MAX319 芯片支路 1 选通， $u_{of}=u_{of1}$ ；当工作在串联模式时，芯片支路 2 选通，总的输出电压反馈与两逆变器输出电压反馈的关系为

$$u_{of} = (u_{of1} - u_{of2}) / 2 \quad (1)$$

由上面可知，较高电网电压一般为较低电网电压的 2 倍，所以，采用该输出电压反馈控制策略，对具有两倍关系的电网电压来说，可采用同一输出电压给定 u_{ref} ，简化程序设计，提高 DSP 芯片的利用率。同时，该逆变器控制总的输出电压，保证总的输出电压具有很好的正弦度。

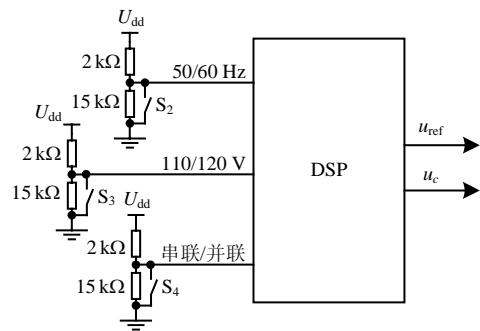


图 2 DSP 控制框图
Fig.2 Control block diagram of DSP

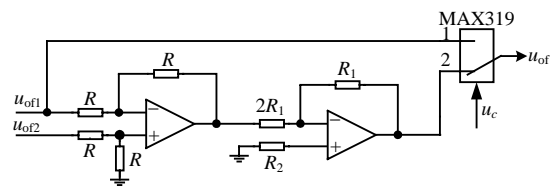


图 3 输出电压反馈的控制框图
Fig.3 Control principle block diagram of the feedback output voltage

2 串并联两种运行模式功率均分控制

图 4 是单台逆变器的控制框图。外环为电压环，控制输出电压跟踪电压给定 u_{ref} 变化；内环采用电流环，电压调节器的输出 i_L^* 作为电流给定，控制输出滤波电感电流 i_L 跟踪 i_L^* 变化， K_p 和 K_I 分别表示电压调节器的比例和积分放大系数， K_1 是输出滤波电感电流反馈系数， K_2 是输出电压反馈系数， $G_o(s)$ 是输出滤波电容与负载并联的传递函数， u_o 是输出电压。

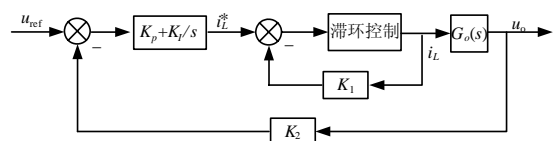


图 4 单台逆变器的控制框图
Fig.4 Control block diagram of single output inverter
图 4 中，输出滤波电感电流环采用滞环控制，

能更好的跟踪电流给定，具有自动限流功能，可提高系统的可靠性和动态响应速度。

图5是输出滤波电感电流给定的控制框图。其中， i_{L1}^* 、 i_{L2}^* 分别是逆变器1和逆变器2的输出滤波电感电流给定，其它参数同图1和图4。采用MAX319芯片，对逆变器2的输出滤波电感电流给定进行选择，其控制信号为 u_c 。当工作在并联模式时，该芯片支路1选通， $i_L^* = i_{L1}^* = i_{L2}^*$ ；当工作在串联模式时，该芯片支路2选通， $i_L^* = i_{L1}^* = -i_{L2}^*$ 。

在并联模式下，采用该控制策略可保证两逆变器输出滤波电感电流相等，当两逆变器输出滤波电容值相等时，两逆变器输出滤波电容电流相等，由于输出滤波电感电流等于输出滤波电容电流与负载电流之和，则负载电流也相等，即并联模式下均流效果好，实现了并联模式下两逆变器的功率均分。

在串联模式下，两逆变器负载电流大小相等，相位相反。采用该控制策略可保证输出滤波电感电流的大小相等，相位相反；当输出滤波电容电流大小相等，相位相反，从而当输出滤波电容值相等时，两逆变器输出电压大小相等，相位相反，这样串联模式下两逆变器均压效果好，实现了串联模式下两逆变器的功率均分。

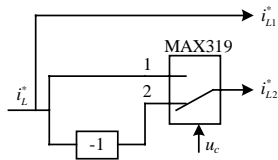


图5 输出滤波电感电流给定的控制框图

Fig.5 Control principle block diagram of the output filter inductor reference current

3 串并联两种运行模式对系统稳定性和相对稳定性的影响

3.1 两种运行模式的稳定性分析

对一个系统来说，系统稳定与否是系统能否正常工作的前提，而该逆变器存在串并联两种运行模式，两种运行模式下系统稳定性和相对稳定性是否发生变化成为系统能否正常工作的关键。

(1) 并联模式。

由于逆变器输出电压频率与开关频率相比很低，该逆变器电流内环可等效为电流放大器。并联模式^[7-13]下，由于两逆变器输出滤波电感电流给定为同一个，即相当于 $i_L^* = i_L/2$ ，所以，输出滤波电感电流反馈系数是单台逆变器的一半，则图4可等效

为

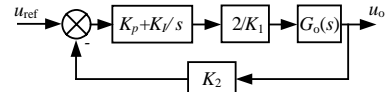


图6 简化后并联模式下逆变器控制框图

Fig.6 Simplified control block diagram at parallel mode

由图6可得逆变器的闭环传递函数为

$$\Phi(s) = \frac{(K_p + \frac{K_I}{s})G_o(s)}{\frac{K_1}{2} + K_2(K_p + \frac{K_I}{s})G_o(s)} \quad (2)$$

设 $C_{f1} = C_{f2} = C_f$ ，则由图1可知，总的输出滤波电容值为单台逆变器的2倍，当空载时输出端只有输出滤波电容 $2C_f$ ，则

$$G_o(s) = \frac{1}{2C_f s} \quad (3)$$

$$\Phi_\infty(s) = \frac{K_p s + K_I}{K_1 C_f s^2 + K_p K_2 s + K_I K_2} \quad (4)$$

阻性负载时输出端为电阻 R_L 和 $2C_f$ 的并联，则

$$G_o(s) = \frac{R_L}{1 + 2R_L C_f s} \quad (5)$$

$$\Phi_R(s) = \frac{K_p s + K_I}{K_1 C_f s^2 + (K_p K_2 + K_1 / 2R_L)s + K_I K_2} \quad (6)$$

(2) 串联模式。

串联模式下，设两逆变器输出电压相反，由式(1)可知，总的输出电压反馈系数为单台逆变器的一半，则等效控制框图为

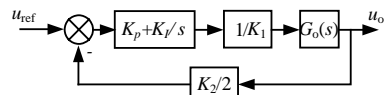


图7 简化后串联模式下逆变器控制框图

Fig.7 Simplified control block diagram at series mode

由图7可得逆变器闭环传递函数为

$$\Phi(s) = \frac{(K_p + \frac{K_I}{s})G_o(s)}{K_1 + \frac{K_2}{2}(K_p + \frac{K_I}{s})G_o(s)} \quad (7)$$

设 $C_{f1} = C_{f2} = C_f$ ，则由图1可知，总的输出滤波电容值为单台逆变器的1/2，当空载时输出端只有输出滤波电容 $C_f/2$ ，则

$$G_o(s) = \frac{2}{C_f s} \quad (8)$$

$$\Phi_\infty(s) = \frac{2(K_p s + K_I)}{K_1 C_f s^2 + K_p K_2 s + K_I K_2} \quad (9)$$

阻性负载时输出端为 R_L 和 $C_f/2$ 的并联，则

$$G_o(s) = \frac{R_L}{1 + R_L C_f s / 2} \quad (10)$$

$$\Phi_R(s) = \frac{K_p s + K_I}{K_1 \frac{C_f}{2} s^2 + (K_p \frac{K_2}{2} + \frac{K_1}{R_L}) s + K_I \frac{K_2}{2}} \quad (11)$$

如果串联模式的输出电压为并联模式输出电压的两倍，对于同样功率的逆变器来说，串联模式的负载阻值为并联模式的四倍，则式(10)和(11)可进一步化为

$$G_o(s) = \frac{4R_L}{1 + 2R_L C_f s} \quad (12)$$

$$\Phi_R(s) = \frac{2(K_p s + K_I)}{K_1 C_f s^2 + (K_p K_2 + K_1 / 2R_L) s + K_I K_2} \quad (13)$$

在同样功率情况下，由式(4)、(6)、式(9)、(13)，以及劳斯判据可知，串并联两种运行模式稳定性不变，而且在任何线性负载下，该系统稳定。闭环系统的增益串联模式为并联模式的 2 倍，主要原因是串联模式输出电压为并联模式的 2 倍，而两种运行模式的输出电压给定相等。

3.2 模式相对稳定性的分析

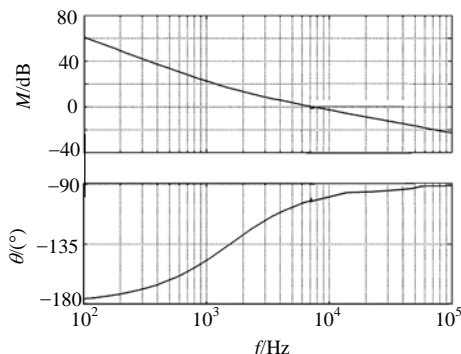
劳斯判据只能判断系统是否稳定，但不能分析系统的相对稳定性，幅值裕度和相角裕度是衡量一个系统整体性能的重要指标。由于一阶和二阶系统的幅值裕度无穷大，因此只要对相角裕度分析即可。

(1) 并联模式。

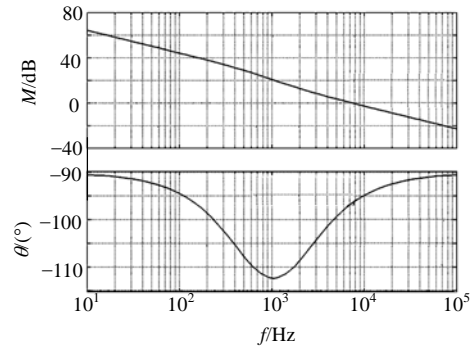
逆变器开环传递函数为

$$G(s)H(s) = \frac{2(K_p + K_I / s)G_o(s)K_2}{K_1} \quad (14)$$

取 $K_I=50\ 000$ ， $K_p=5.1$ ， $C_f=9.4\ \mu\text{F}$ ， $K_1=0.3$ ， $K_2=0.024\ 95$ ， $R_L=12.1\ \Omega$ ，根据式(3)、(5)和(14)可得空载和阻性满载时的波特图，如图 8 所示。可知空载和阻性满载时的相角裕度分别为 78° 和 83.4° ，满足稳定性要求。



(a) 空载时的波特图



(b) 阻性满载时的波特图

图 8 空载和阻性满载并联模式下的波特图

Fig. 8 Bode plot at parallel mode

(2) 串联模式。

逆变器开环传递函数为

$$G(s)H(s) = \frac{(K_p + K_I / s)G_o(s)K_2}{2K_1} \quad (15)$$

对于串联模式输出电压是并联模式两倍的情况，取 $R_L=48.4\ \Omega$ ，其它参数同并联模式，根据式(3)、(5)、(8)、(12)、(14)和(15)可知，串并联两种运行模式空载和阻性满载时具有相同的波特图，因此，两种运行模式具有相同的相对稳定性。

其它线性负载情况下的分析结果与阻性负载时相同。

4 实验结果

为验证以上分析，研制了一台基于 TMS320 F240PQA 的 1 000 VA 串并联组合式双降压式半桥逆变器^[3]的原理样机。样机的主要技术参数为：输入电压 $U_{in}=360\ \text{V}$ ， $L_{f1}=L_{f2}=370\ \mu\text{H}$ ， $C_{f1}=C_{f2}=9.4\ \mu\text{F}$ 。并联模式下输出电压的有效值 $U_o=110\ \text{V}$ ，电网频率 $f=50\ \text{Hz}$ ；串联模式下输出电压的有效值 $U_o=240\ \text{V}$ ，电网频率 $f=60\ \text{Hz}$ 。

图 9 是不同模式下阻性满载时的实验波形。图 9(a)是并联模式下阻性满载时输出电压 u_o 、逆变器 1 输出电流 i_{o1} 和逆变器 2 输出电流 i_{o2} 的实验波形。图 9(b)是串联模式下阻性满载时总的输出电压 u_o 、逆变器 1 输出电压 u_{o1} 、逆变器 2 输出电压 u_{o2} 和输出电流 i_o 的实验波形。

从图 9(a)中可以看出，并联模式下， i_{o1} 和 i_{o2} 有效值分别为 4.746 A 和 4.626 A，因此，该组合式逆变器具有很好的均流效果。输出电压 η_{THD} 为 1.04%，输出电压的正弦度好。

从图 9(b)中可以看出，串联模式下，两逆变器输出电压有效值分别为 117.1 V 和 117.08 V，因此，

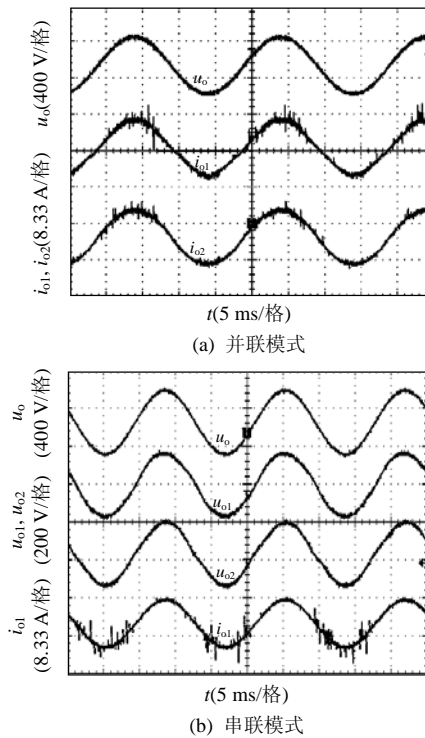


图9 不同模式下的实验波形

Fig. 9 Experimental results at different mode

该组合式逆变器具有很好的均压效果。虽然两台逆变器各自的输出电压正弦度不是很好，但总的输出电压的正弦度很好，其 η_{THD} 为1.4%。主要原因是串联模式下控制的是总的输出电压，每台逆变器各自的输出电压不受控制。

定义 功率均分程度(简称功率均分度)为

$$\text{功率均分度} = \frac{|P_{out1} - P_{out2}|}{P_{out}} \times 100\% \quad (16)$$

式中 P_{out1} 、 P_{out2} 和 P_{out} 分别是逆变器1、逆变器2和总的输出功率。

图10是不同模式下的功率均分度曲线。轻载时2种运行模式的功率均分度效果不是很好，主要原因是轻载时输出滤波电感电流小，输出滤波电感电流内环采用滞环控制，电感电流大小接近滞环宽

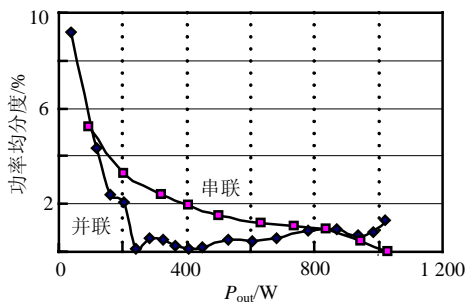


图10 不同模式下的功率均分度曲线

Fig. 10 Degree of power sharing vs output power at different mode

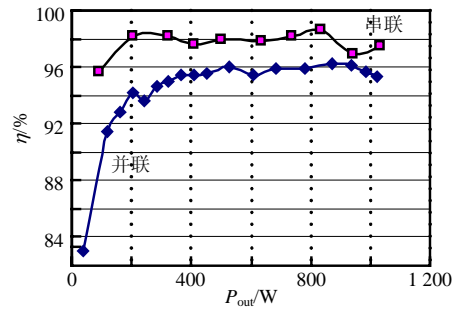


图11 不同模式下的效率曲线

Fig. 11 Efficiency vs output power at different mode

度，输出滤波电感电流不能完全跟踪输出滤波电感电流给定。并联模式下，满载时的功率均分度为1.3%；串联模式下，满载时的功率均分度为0.03%。因此，该组合式逆变器具有很好的功率均分度。

图11是串并联两模式下的效率曲线。串联模式下的效率要比并联模式下的效率高，主要原因是串联模式下的等效输出滤波电感是并联模式下等效输出滤波电感的两倍^[14]，而当两种运行模式滞环宽度不变时，并联模式的开关频率比串联模式下的高，因此，并联模式下的开关损耗比串联模式下的大，则串联模式下的效率比并联模式下的高。

5 结论

本文提出了一种基于DSP控制的可输出多个国家电网电压规格的串并联组合式并网逆变器，阐述了该逆变器的工作原理，分析了两台逆变器在串联模式下的均压和在并联模式下的均流效果，及串并联两种运行模式对系统稳定性和相对稳定性的影响，并以一台1000VA基于DSP控制的串并联组合式双降压式半桥逆变器为例，进行了实验验证。该逆变器具有以下优点：

- (1) 串联模式下通过控制总的输出电压，保证总的输出电压具有很好的正弦度。
- (2) 通过对输出滤波电感电流给定的控制，实现了并联模式下的均流和串联模式下的均压，两逆变器具有很好的功率均分度。
- (3) 当串联模式输出电压为并联模式两倍时，串并联两种运行模式下系统的稳定性和相对稳定性不变。

参考文献

[1] Huang Yi, Shen Miaosen, Peng F Z, et al. Z-source inverter for residential photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(6): 1776-1782.
 [2] 顾和荣, 杨子龙, 邬伟扬. 并网逆变器输出电流滞环跟踪控制技

- 术研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 108-112.
- Gu Herong, Yang Zilong, Wu Weiyang. Research on hysteresis-band current tracking control of grid-connected inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(9): 108-112(in Chinese).
- [3] 姚志垒, 王赞, 肖岚, 等. 一种新的逆变器并网控制策略的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(18): 61-64.
- Yao Zhilei, Wang Zan, Xiao Lan, et al. Research on a novel grid-connected control strategy of inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(18): 61-64(in Chinese).
- [4] 王赞, 肖岚, 姚志垒, 等. 并网独立双模式控制高性能逆变器设计与实现[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 54-59.
- Wang Zan, Xiao Lan, Yao Zhilei, et al. Design and implementation of a high performance utility-interactive inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 54-59(in Chinese).
- [5] 王建元, 纪延超, 赵般多. 一种新的单相逆变电源及其调制方式的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 62-66.
- Wang Jianyuan, Ji Yanchao, Zhao Banduo. Research on a novel single phase inverter source and its modulation technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 62-66(in Chinese).
- [6] 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).
- [7] Guerrero J M, Matas J, De Vicuna L G, et al. Decentralized control for parallel operation of distributed generation inverters using resistive output impedance[J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2007, 54(2): 994-1004.
- [8] Guerrero J M, Matas J, De Vicuña L G, et al. Wireless-control strategy for parallel operation of distributed- generation inverters[J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2006, 53(5): 1461-1470.
- [9] Schonknecht A, De Doncker R W A. A novel topology for parallel connection of soft-switching high-power high-frequency inverters [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(2): 550-555.
- [10] Guerrero J M, Garcide V L, Matas J, et al. Output impedance design of parallel-connected UPS inverters with wireless load-sharing control [J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2005, 52(4): 1126-1135.
- [11] 程荣仓, 刘正之. 大容量单相逆变装置并联技术的分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 112-116.
- Chen Rongcang, Liu Zhengzhi. Analysis of parallel single-phase inverters of large capacity[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 112-116(in Chinese).
- [12] Guerrero J M, Matas J, De Vicuña L G, et al. Decentralized control for parallel operation of distributed generation inverters using resistive output impedance[J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2007, 54(2): 994-1004.
- [13] Ertl H, Kolar J W, Zach F C. A novel multicell DC-AC converter for applications in renewable energy systems[J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2002, 49(5): 1048-1057.
- [14] 姚志垒. 基于 DSP 控制的串并组合式逆变器及并网控制策略的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
- Yao Zhilei. Research on serial-parallel combined inverter and grid-tied control strategy based on DSP control[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006(in Chinese).



姚志垒

收稿日期: 2007-12-28。

作者简介:

姚志垒(1981—), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为功率变换器、并网逆变器及其控制策略等, nhyzl@163.com;

肖岚(1971—), 女, 博士, 教授, 研究领域为航空电源系统、逆变器并联、并网逆变器等。

(编辑 王彦骏)