

输入串联输出并联逆变器及其控制策略

Input-series Output-parallel Inverter and Its Control Strategy

南京航空航天大学航空电源重点实验室 庄凯 阮新波 Email: zhuangkai@nuaa.edu.cn

摘要：本文根据模块化设计的思想，提出应用输入串联输出并联逆变器，满足高电压输入、大电流输出的交流供电需求。为了实现输入均压、输出均流，提出了一种输入均压控制策略。该方法采用均压控制环校正两个电流内环的给定信号，使输入电压高的模块输出电流增大，输入电压低的模块输出电流减小，从而实现两逆变模块的输入均压和输出均流。文中还给出了均压控制系统的设计方法，并通过仿真和实验验证了该方法的有效性。

Abstract: This paper presents a novel topology of input-series output-parallel inverter for high input-voltage and high output-current AC condition, based on the modular method. To get input-voltage sharing and output-current sharing, a control strategy is also proposed. In the strategy, voltage sharing loop is used to correct the reference of two current loops. That makes high input-voltage module with high output-current, and low input-voltage module with low output-current, until input-voltage sharing achieved. In this way, two inverter modules share input-voltage and output-current automatically. The thesis provides a common method to design control system, then gives some simulations and experiments to valid it.

关键词：输入串联；输出并联；逆变器；输入均压；均压环

Keywords: Input-series; Output-parallel; Inverter; Input-voltage sharing; Voltage sharing loop

1 引言

目前，电源模块化技术逐步成为电力电子技术发展的趋势^[1-4]。针对不同需求，采用模块化解决方案，可以缩短电源系统的开发周期、降低开发成本，实现高效率、高功率密度、高可靠性。通用的电源模块不仅能够单独工作，还能以不同的方式组合成新的电力电子系统。模块的组合方式除了包括前后级联，还有输入串联输出并联(Input-Series Output-Parallel, ISOP)、输入串联输出串联(Input-Series Output-Series, ISOS)、输入并联输出串联(Input-Parallel Output-Series, IPOS)、输入并联输出并联(Input-Parallel Output-Parallel, IPOP)^[5]等。这些模块组合可以满足各种不同的需求，扩展了模块的应用范围。其中 IPOP 方式用在大电流输出系统，增加系统的可靠性和冗余度^[6-9]；IPOS 方式用于低压输入、高压输出的场合；ISOS 方式适用于输入输出都为高压的场合^[10,11]。采用这些方式避免了在电路中使用高压大电流器件，有利于提高系统的效率。

在高压输入、大电流输出的场合，采用 ISOP 连接方式就可以用低压器件构成的模块，实现所需功能。由直流模块组成的 ISOP 直流变换器已经得到广泛的研究^[5,12-16]。而系统组合中的模块也可以为交流模块，构成输入串联输出并联(ISOP)逆变器。模块在输入端串联输出端并联涉及到输入输出间的共地问题，因此需要具有隔离功能。在 ISOP 直流变换器中，各模块的高频直流变压器不仅实现前后级电压匹配，还提供隔离功能，方便实现输入端串联输出端并联。逆变模块组成 ISOP 系统也要求输入和输出间具有隔离功能。并且在 ISOP 系统中对于串联输入部分需要实现均压

条件，才可以使各模块承受相同的输入电压；对并联输出部分，实现输出均流，使各模块承担相同的输出功率，保证系统长期可靠运行。

在高电压直流输入、交流大电流输出的供电场合或分布式供电系统中，例如输入为整流后的三相交流电，输出为115V/400Hz的航空电源。也可以采用输入串联输出并联逆变模块实现。因此本文提出一种输入串联输出并联(ISOP)逆变器(如图1所示)结构。该电路由两个具有隔离功能的逆变模块组成。针对电路中存在的输入均压和输出均流问题，提出一种输入均压控制策略，并对均压控制的原理进行分析，给出系统设计的一般方法。最后进行仿真和实验验证。

2 输入串联输出并联逆变器电路

ISOP 逆变器由多个相同的模块串并联组成。从通用性角度出发，构成系统的单个模块需要兼顾独立工作和协同工作的要求。由前面的分析知，这种模块需选用具有隔离功能的逆变电路拓扑。[17]中介绍了多种具有隔离功能的逆变电路，若在拓扑中使用工频变压器实现隔离，会使电路体积和重量增大，不利于小型化和模块化。而采用高频变压器却能有效减小电路体积、提高传输效率。

文中使用由隔离式全桥 DC-DC 变换电路和全桥逆变电路前后级联，构成具有隔离功能的逆变模块。直流电路部分使用高频变压器实现隔离功能，减小模块的尺寸；采用移相控制，实现开关管的软开关，提高整个模块的效率。直流部分主要实现隔离功能，所以既可以采用开环也可以采用闭环控制。若采用开环控制，直流输出电压变化范围较宽，后级逆变电路不易优化设计。而采用闭环控制将使直流输

出电压稳定, 易于后级逆变电路的优化设计。

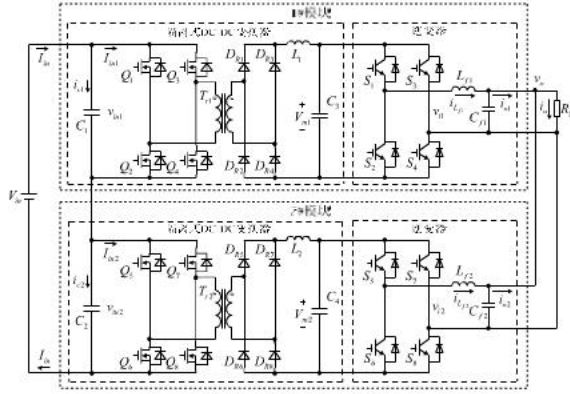


图1 ISOP逆变器

因此在直流部分中采用闭环控制, 模块内的器件都可选用低压器件, 提高系统效率, 降低模块成本。图给出了由两个模块组成的输入串联输出并联 (ISOP) 逆变器电路。只需将模块输入端串联, 输出端并联就能使新电路的输入电压和输出电流范围扩大一倍, 应用于新的场合。

3 输入均压控制策略

对于ISOP逆变器, 输入均压和输出均流是系统可靠工作的重要保障。实际工作中, 由于各模块参数的离散性以及各种扰动的存在, 使系统不能实现输入自动均压, 需要采用相关控制方法对不均压情况进行抑制。

首先分析ISOP电路的特征, 由图1可知在稳态工作时:

$$I_{in1} + i_{c1} = I_{in2} + i_{c2} = I_{in} \quad (1)$$

$$v_{in1} + v_{in2} = V_{in} \quad (2)$$

$$C_1 \frac{dv_{in1}}{dt} = i_{c1} \quad (3)$$

$$C_2 \frac{dv_{in2}}{dt} = i_{c2} \quad (4)$$

式中 I_{in1} 、 I_{in2} 为两个模块的输入电流, v_{in1} 、 v_{in2} 分别为两个模块的输入电压。

采用两相同模块构成系统, 故参数基本一致: $C_1 = C_2 = C_{in}$ 。将该条件代入式(1)-式(4), 并解得:

$$C_{in} \frac{d(v_{in1} - v_{in2})}{dt} = i_{in2} - i_{in1} \quad (5)$$

令 $\Delta i_{in} = I_{in1} - I_{in2}$, $\Delta v_{in} = v_{in1} - v_{in2}$, 由式(5)知: 当两模块输入电压差 $\Delta v(0) \neq 0$ 时, 可以通过调节两模块输入电流偏差 Δi 实现输入

均压。若 $\Delta v(0) > 0$, 则控制 $\Delta i > 0$, 经过一段时间就可以使 $\Delta v = 0$, 实现输入均压。

输出均流控制在IPOP逆变器中常被采用, 并取得很好的效果。将这种方法应用到ISOP逆变器中, 实现输入均压输出均流。设最初ISOP系统处于输入均压输出均流稳定的状态, 扰动引起1#模块的输入电压变化, 并且大于2#模块的输入电压, 即: $\Delta v(0) > 0$ 。输出均流控制使输出电流相等, 因此输出功率相等。根据能量守恒关系可知输入功率也相等, 这时将导致 $I_{in1} < I_{in2}$, 即 $\Delta i < 0$ 。根据(5)知 Δv 将逐渐增大, 很快使各模块的输入电压不满足正常工作要求, 两个模块停止工作。因此输出均流控制既不能实现输入均压, 也不能实现输出均流。

由(5)知输入均压可以通过控制输入电流实现, 而输入电流的大小可以通过调节输出电流来完成。记交流输出电压为:

$$v_o = V_{om} \sin \omega t \quad (6)$$

各模块的输出电感电流为:

$$\begin{aligned} i_{Lj} &= I_{Lmj} \sin(\omega t + \varphi_j) \\ &= I_{Lmj} \cos \varphi_j \sin \omega t + I_{Lmj} \sin \varphi_j \cos \omega t \end{aligned} \quad (7)$$

($j=1,2$)

其中 φ_j 的大小与负载的性质有关。输出电感电流中包括两个分量, 第一个分量与输出电压同相, 为有功分量, 第二个分量与输出电压相位相差 90° , 为无功分量。则各模块输出的有功功率为:

$$P_{oj} = \frac{V_{om}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{Lmj} \cos \varphi_j}{\sqrt{2}} = \frac{V_{om} \cdot I_{Lmj} \cos \varphi_j}{2} \quad (8)$$

($j=1,2$)

可见输出电感电流的幅值增加会使输出有功功率增加。为分析方便, 设各模块为理想模块, 功率传输效率为100%。根据能量守恒原理, 输入功率与输出功率相等, 即:

$$V_{inj} \cdot I_{inj} = P_{oj} = \frac{V_{om} \cdot I_{Lmj} \cos \varphi_j}{2} \quad (9)$$

($j=1,2$)

从上式可以得出: 输出电感电流的幅值增大, 可以使输入电流增加; 电感电流的幅值减小, 也可以使输入电流减小。因此控制输出电感电流的变化可以控制输入电流的变化。各模块输入电流的变化导致 Δi 变化, 使输入电压差 Δv 按式(5)变化, 从而实现输入均压。

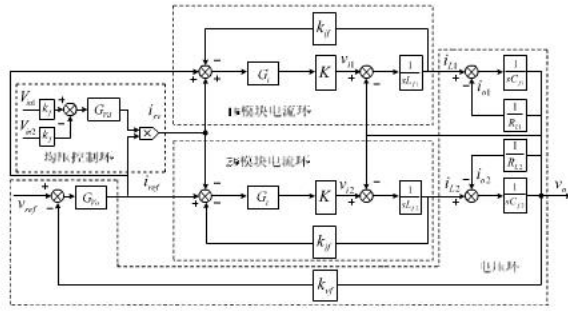


图2 ISOP逆变器的输入均压控制策略

由逆变器的输入电流与输出电流关系，提出了图2所示的输入均压控制策略。电路中直流部分主要为逆变电路提供隔离功能，因此各直流模块的闭环控制部分单独工作，均压环作用于逆变控制部分。逆变电路采用双环控制方式，保证系统良好的动态和静态特性。外环为两模块共用的电压环，将输出电压作为受控量，保证输出电压稳定。内环为两个独立的电流环，采用电感电流作为控制量，保证系统的快速性和可靠性。电压环的输出作为两个电流环的给定信号。均压环将采集到的各模块输入直流电压相减得到输入电压偏差，然后经过调节环节 G_{vd} 产生直流控制信号。交流系统中的信号均按正弦规律变化，所以均压控制产生的直流调节信号不能直接进行调节，需要与电压环输出相乘产生正弦变化的均压控制信号。将该均压控制信号分别叠加到两个模块的电流环给定。在本系统中， G_{vd} 为PI调节环节。这样调节电流环的给定就可以控制输出电感电流，输出电感电流的变化影响输入电流的变化，最终达到输入均压的目的。输入均压时，输入功率相等。由能量守恒关系可知，输出电流也相等。

稳态时两个模块的输入电压相等：

$V_{in1} = V_{in2} = V_{in}/2$ ；输入电容流过的电流为零；输出电流 $i_{o1} = i_{o2}$ 。若扰动使两模块输入电压不相等，设 $V_{in1} > V_{in2}$ 。输入电压差 Δv 经过 k_f 倍衰减后，通过均压控制环节 G_{vd} 进行调节，输出直流调节信号。将该调节信号与电压环输出信号相乘获得按正弦规律变化的调节量。再将该正弦调节量分别叠加到电流环给定信号上，调节两个电流环的给定幅值。均压控制信号使1#模块电流给定信号增大为 $i_{ref} + i_{sv}$ ，2#模块电流给定信号减小为 $i_{ref} - i_{sv}$ 。此时输出电感电流跟随给定变化，

1#模块的输出电感电流增大，2#模块的输出电感电流减小，使 $i_{o1} > i_{o2}$ 。根据式(9)的能量守恒表达式，输出电流的变化影响输入电流的变化，此时1#模块输入电流增加，2#模块输入电流减少，使 $\Delta i < 0$ 。由式(1)-式(5)知此时输入电容 C_1 被放电，电容 C_2 被充电。从而使1#模块输入电压 V_{in1} 下降，2#模块输入电压 V_{in2} 上升，输入电压达到新的平衡 $\Delta v = 0$ 。当输入电压相等后，输入电压差为零，均压调节信号 $i_{sv} = 0$ ，两个模块的电流环给定信号相等，系统重新进入稳态。同理当 $V_{in1} < V_{in2}$ 时，该控制策略也可以使系统达到输入均压的稳定状态。

4 控制系统设计

图2所示的控制电路中，电流环采用滞环控制方式。由于滞环控制设计简单，响应速度快，因此可以使输出滤波电感电流快速跟随电流给定信号。电压环设计方法可以参考[18]。首先将电流环等效为系数为 K_i 的比例环节。因为电路的两个电流环采用同一个给定信号，并且系统输出并联，所以两个电流环可共同等效为 $2K_i$ 的比例环节(如图3所示)。ISOP逆变控制系统的电压环比单逆变器控制系统电压环开环传递函数的放大倍数增加了一倍。按照文献中的方法，可以设计电压环调解器 G_{vo} 满足稳定的幅值和相角裕度。

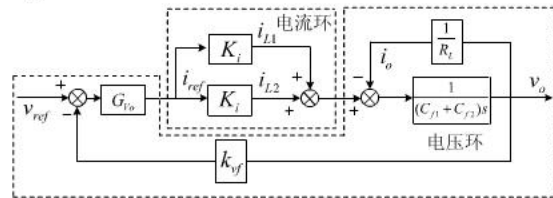


图3 双环控制框图

均压环保证系统输入电压的均衡，设计步骤非常重要。均压调节信号与输入电压差的关系可由图2得到：

$$i_{sv} = G_{vd} \cdot k_f \cdot i_{ref} \cdot \Delta v \quad (10)$$

可见 i_{sv} 越大则均压的速度越快。在相同的 Δv 情况下， G_{vd} 影响 i_{sv} 的大小，即 G_{vd} 越大实现均压的速度越快，因此 G_{vd} 的大小决定均压的速度。但均压调节时， G_{vd} 越大则均压调节信号 i_{sv} 也越大，这将引起其中一个模块的输出电流超过额定值，并导致该模块过载损坏。因此需要对均压调节信号的最大值进行限

制。通常变换器允许 120%范围内过载，因此调节的最大电流应小于 20%的额定给定电流信号 $i_{ref-rate}$ ，即 $i_{sv-max} < 0.2 \cdot i_{ref-rate}$ ，按照设计要求输入电压应在 10%范围内波动，所以 $\Delta v_{max} < 20\% \cdot V_{in}$ ，将两个限制条件代入(10)

解得 $G_{vd} < \frac{1}{k_f}$ ，可见只要使 G_{vd} 在此范围内，

就可保证各个模块不会因输出电流过大而损坏。

5 仿真实验结果

为了验证文中所提理论的可行性，对该电路拓扑及控制策略进行仿真。仿真系统的主要参数为：输入电压 540VDC $\pm$ 10%；输出电压 115V/400Hz；交流输出滤波电感为 0.4mH，输出滤波电容 16 μ F；输入电容 1000 μ F，输出功率 2KW。

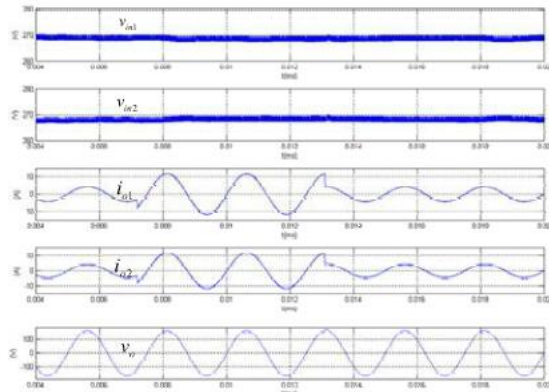


图4 负载突变时均压均流仿真波形

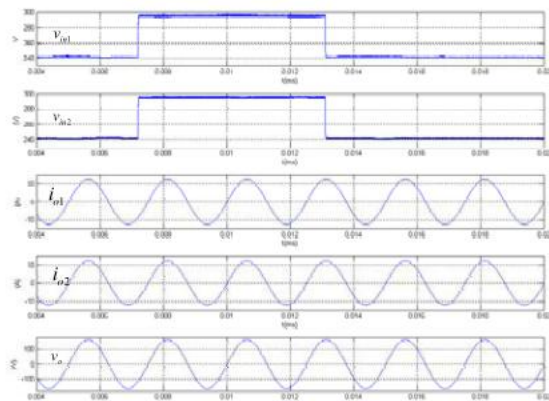


图5 输入电压突变时均压均流仿真波形

图4给出了从系统输出满载(2KW)到 1/3 负载相互跳变的电压和电流仿真波形。图5给出了满载时，直流输入总电压从 486V 到 594V 相互跳变的仿真波形。仿真波形反映出采用提出的均压控制策略，在动态和静态工作时都能保证输入均压和输出均流效果，并且能够抑制

来自负载和输入源的扰动，保持良好的正弦输出波形。

为了验证电路和控制策略的正确性，按照仿真参数，完成了一台 2KVA 输入串联输出并联逆变器原理样机，并进行各种条件下的实验。

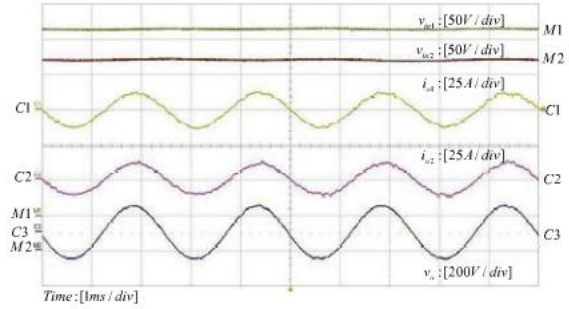
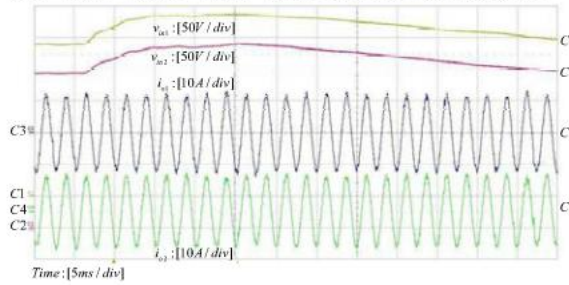
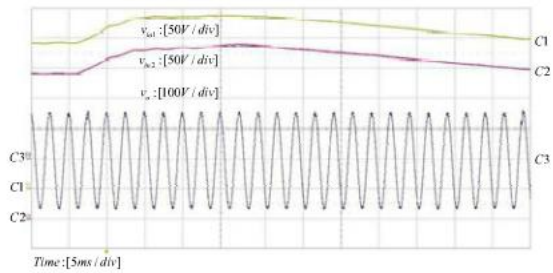


图6 满载时输入电压和输出电压电流波形

图6为系统满载时，两模块的输入直流电压、输出电流和输出电压波形。图中可以看出，均压控制策略使输入电压在稳态时保持输入均压、输出均流，输出电压具有良好的正弦度。



(a)输入电压突变时输入电压和输出电流波形

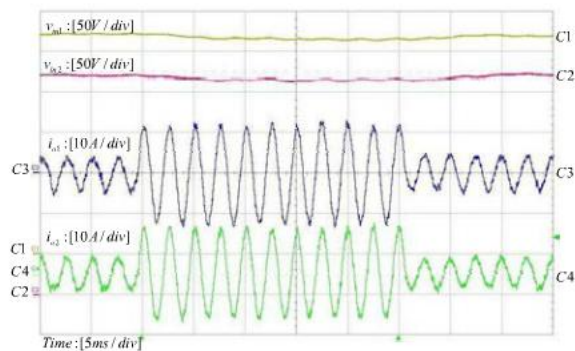


(b)输入电压突变时输入电压和输出电压波形

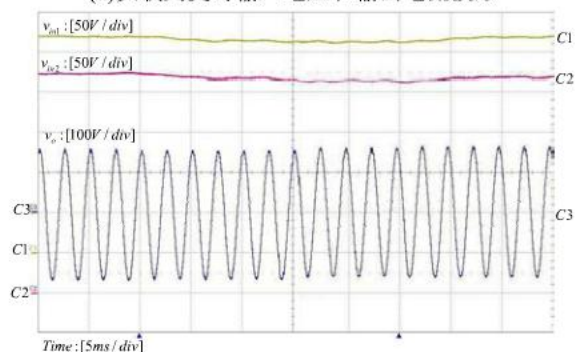
图7 输入电压突变时电压电流波形

图7为满载工作时，总输入电压从486V到 594V突变及恢复的波形。在跳变过程中，仍然保持很好的输入均压、输出均流效果，而且输出交流正弦电压稳定。说明该控制策略对于输入端的波动有很好抑制效果。

图8为输入额定电压时，从1/3负载到满载跳变及恢复的电压和电流波形。波形显示来自负载端的扰动，对所提控制策略的输入均压、输出均流效果和输出波形也无影响。由于输入直流电源不是理想电压源，所以在负载突变过程中，输入电压在加载时有跌落。



(a)负载突变时输入电压和输出电流波形



(b)负载突变时输入电压和输出电压波形

图8 负载突变时电压电流波形

6 结论

输入串联输出并联逆变器可以在高电压输入、大电流输出的情况下,使各开关器件保持较小的电压电流应力,并且促进了系统的可靠性和灵活性。文中提出的均压控制策略不仅能够保证输入电压均压,而且能实现输出均流,并且使输出电压具有良好的正弦度。仿真和实验证明了该电路和控制策略的正确性。

参考文献

- 王建冈,阮新波,吴伟,等,倒装芯片集成电力电子模块[J].中国电机工程学报,2005,25(17):32-36.
- 陈文洁,杨旭,杨栓科,等,分立元件构成的电力电子集成功率模块设计[J].中国电机工程学报,2003,23(2):104-110.
- 顾亦磊,吕征宇,钱照明,中小功率系统集成DC/DC标准模块的一族候选拓扑[J].中国电机工程学报,2005,25(10):45-49.
- 胡磊,何湘宁,基于仿生学的电力电子系统分散自治控制[J].中国电机工程学报,2005,25(10):21-26.
- Ayyanar R, Giri R, Mohan N. Active Input-voltage and Load-current Sharing in Input-series and Output-parallel Connected Modular DC-DC Converters Using Dynamic Input-voltage Reference Scheme [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(6): 1462-1472
- 姜桂宾,裴云庆,杨旭,等,SPWM逆变电源的无互联信号线并联控制技术[J].中国电机工程学报,2003,23(12):94-98.
- 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.
- 邢岩,严仰光,电流型调节逆变器的冗余并联控制方法[J].中国电机工程学报,2004,24(11):199-202.
- 段善旭,刘邦银,康勇,等,UPS并联系统的SPWM再调制控制技术研究[J].中国电机工程学报,2004,24(1):81-86.
- 谢少军,韩军,张勇,等,阶梯波合成逆变器的单脉宽调制调压技术研究[J].中国电机工程学报,2003,23(5):62-65.
- Giri R, Ayyanar R, Ledezma E. Input-series and Output-series Connected Modular dc-dc Converters with Active Input Voltage and Output Voltage Sharing[C]. in Proc.IEEE APEC, 2004: 1751-1756.
- Giri R, Ayyanar R, Mohan N. Common Duty Ratio Control of Input Series Connected Modular DC-DC Converters with Active Input Voltage and Load Current Sharing[C]. in Proc. IEEE APEC, 2003: 322-326.
- Kim J W, You J S, Cho B H. Input Series-output Parallel Connected Converter for High Voltage Power Conversion Applications Employing Charge Control [C]. in Proc. Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. 1999: 2593 -2599.
- Bhinghe A, Mohan N, Giri R, Ayyanar R. Series-parallel Connection of DC-DC Converter Modules with Active Sharing of Input Voltage and Load Current[C]. in Proc. APEC, 2002: 648-653.
- 章涛,阮新波,输入串联输出并联全桥变换器均压均流的一种方法[J].中国电机工程学报,2005,25(24):47-50.
- 马学军,牛金红,康勇,输入串联输出并联的双全桥变换器输入电容均压问题的研究[J].中国电机工程学报,2006,26(16):86-91.
- Xue Y, Chang L, Josep Bordonau etc. Topologies of Single-phase Inverters for Small Distributed Power Generators: An Overview [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004,19(5): 1305-1314.
- Wu H, Lin D, Zhang D etc. A Current-mode Control Technique with Instantaneous Inductor Current Feedback for UPS Inverters[C]. in Proc. IEEE APEC,1999: 951-957.

作者简介

庄凯:男,1970年11月生,博士生。研究方向为逆变器和数字控制。

阮新波:男,1970年2月生,博士生导师。研究方向为高频软开关直-直变换器、高频软开关逆变器、变换器建模分析、电力电子集成系统和新能源供电系统。