

输入串联输出并联变换器的输入均压稳定性分析

庄凯, 阮新波

(南京航空航天大学自动化学院, 江苏省 南京市 210016)

Stability Analysis of Input-voltage Sharing for Input-series Output-parallel Converter

ZHUANG Kai, RUAN Xin-bo

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: Input-voltage sharing is important for the input-series output-parallel (ISOP) system. Requirements were proposed to ensure the stability of input-voltage sharing by analyzing the relationship between input-voltage and equivalent resistor and the relationship between input-voltage and input power. Two stability theories of input-voltage sharing were also provided to evaluate the system stability. Active and reactive power was transformed in the ISOP inverter. How it works and what is the effect on the input-voltage sharing were analyzed. According to the stability theories, it proved that the output-current control strategy couldn't keep input-voltage sharing, while the input-voltage sharing control strategy could do. Experimental results verify the stability theories and analysis.

KEY WORDS: input-voltage sharing; stability theory; input-series; output-parallel; converter; inverter

摘要: 输入均压是输入串联输出并联(input-series output-parallel, ISOP)变换器稳定工作的保障。通过分析 ISOP 系统的输入电压与等效电阻及输入电压与输入功率的关系, 提出实现输入均压稳定的必要条件, 并给出两个输入均压稳定判据, 判断 ISOP 系统的输入均压稳定性。分析 ISOP 逆变器输出有功功率和无功率的传输过程以及对输入均压稳定性的影响, 并用所提出的稳定判据证明 ISOP 逆变器的输出均流控制策略不能实现输入均压稳定, 而输入均压控制策略可以实现输入均压稳定。通过实验验证了稳定判据及分析的正确性。

关键词: 输入均压; 稳定判据; 输入串联; 输出并联; 变换器; 逆变器

0 引言

电力电子系统集成技术就是将电源模块标准

化、模块化, 然后方便地将标准模块组合成新的电源系统, 简化设计、缩短研发周期和降低产品成本, 它是电力电子技术发展的一个重要方向^[1-5]。将模块组合成系统有多种方式, 其中一种是将这些模块的输入侧和输出侧进行串联或并联, 包括输入串联输出串联、输入串联输出并联、输入并联输出串联和输入并联输出并联 4 种方式^[6]。输入串联输出并联方式适用于高电压输入、大电流输出的场合。

实现各模块的输入均压和输出均流是保证 ISOP 系统可靠工作的关键。针对 ISOP 系统的输入均压问题, 文献[7-15]提出将各模块输入电压偏差由前馈加入到输出电压控制环, 实现输入均压和输出均流, 并用小信号模型证明了系统的稳定性。但这些文献仅从电路拓扑角度分析了模块内部控制策略和参数对输入均压的影响, 并没有从系统的角度, 给出实现输入均压稳定的一般性条件, 对于 ISOP 逆变器输入均压稳定性的研究也较少。根据文献分析可知, 如果能够保证输入均压, 就可以保证输出均流; 而如果能够保证输出均流, 却不能保证输入均压。如何才能使系统稳定, 则需要进一步研究。

本文根据模块输入端的等效电路, 研究了 ISOP 系统输入均压稳定的一般条件, 并提出 2 个输入均压稳定判据。通过系统中各模块输入电压与输入等效电阻、输入功率的关系, 判断系统的输入均压稳定性。本文还分析了 ISOP 逆变器输出有功和无功分量在系统中的流动过程及其对输入均压的影响, 并用所提出的稳定性判据证明了输出均流控制不能实现输入均压, 而 ISOP 逆变器的输入均压控制策略可以保证系统的输入均压稳定。最后进行了实验验证。

1 输入均压稳定条件

图 1(a)是由 n 个结构相同的直流模块组成的 ISOP 系统。根据电路等效原理,直流变换器在输入端可以等效为输入阻抗 Z_{in} ,在电压环带宽内,该输入阻抗由等效输入电阻 R_{in} 决定,因此各模块可由等效电阻 R_{ini} 代替,并且该电阻上消耗的功率与输出功率相等^[16]。

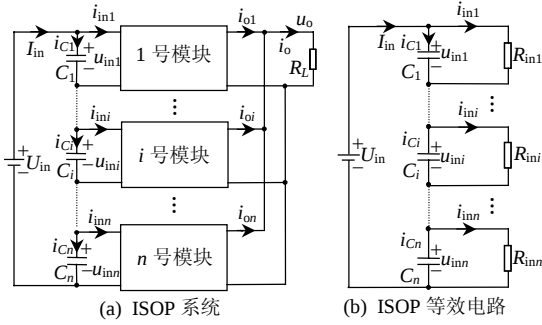


图 1 ISOP 系统及等效电路

Fig. 1 Input-series output-parallel system and equivalent circuit

为便于分析,将图 1(a)中的电路等效为图 1(b)。设各模块的传输效率为 100%,则各模块的等效输入电阻 R_{ini} 为

$$R_{ini} = \frac{u_{ini}^2}{p_{ini}} = \frac{u_{ini}^2}{p_o}, \quad i=1,2,\dots,n \quad (1)$$

等效电阻 R_{ini} 还可由欧姆定律表示为

$$R_{ini} = \frac{u_{ini}}{i_{ini}} \quad (2)$$

当系统进入稳态时,各模块的输入电流相等,即 $i_{in1}=i_{in2}=\dots=i_{inn}=I_{in}$ 。由式(2)可知,输入电压比等于各模块的等效电阻比,即

$$u_{in1}:u_{in2}:\dots:u_{inn} = R_{in1}:R_{in2}:\dots:R_{inn} \quad (3)$$

由式(3)可知,若要实现输入均压,则要求各模块的等效输入电阻相等,即

$$R_{ini} = \frac{U_{in}}{nI_{in}} \triangleq R_{stable} \quad (4)$$

由图 1(b)所示的等效电路可得

$$C_i \frac{du_{ini}}{dt} = I_{in} - \frac{u_{ini}}{R_{ini}} \quad (5)$$

若在稳态时,各模块输入电压相等 $u_{ini} = \frac{U_{in}}{n} \triangleq U_{stable}$,则当出现扰动使模块的输入电压 u_{ini} 发生变化时,要使其回到稳定点需要满足以下条件:

1) 若扰动使 $u_{ini} > U_{stable}$,则要求电容放电,

即 $C_i \frac{du_{ini}}{dt} < 0$,由式(5)解得 $R_{ini} < u_{ini}/I_{in}$ 。

2) 若扰动使 $u_{ini} < U_{stable}$,则要求电容充电,

即 $C_i \frac{du_{ini}}{dt} > 0$,由式(5)解得 $R_{ini} > u_{ini}/I_{in}$ 。

满足条件的输入电压与等效电阻区域可由图 2(a)表示,由此得到 ISOP 系统输入均压的稳定判据 I: 若 ISOP 系统中各模块的输入电压与等效电阻曲线经过稳定点,且位于图 2(a)中的阴影区域内,则系统中的各模块可以抑制输入电压扰动,实现输入均压稳定。

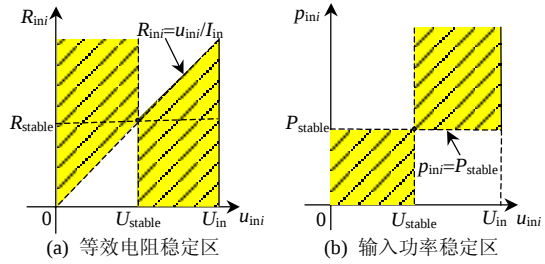


图 2 输入均压稳定区域

Fig. 2 Stability areas of input-voltage sharing

稳定判据 I 也可表示为输入电压与输入功率的关系。模块在稳定状态时 $u_{ini}=U_{stable}$ 、 $R_{ini}=R_{stable}$,则有:

$$p_{ini} = \frac{u_{ini}^2}{R_{ini}} = \frac{U_{stable}^2}{R_{stable}} = U_{stable} I_{in} \triangleq P_{stable} \quad (6)$$

显然,若要系统稳定,则 $u_{ini} > U_{stable}$ 时,必须满足 $p_{ini} > P_{stable}$;而 $u_{ini} < U_{stable}$ 时,必须满足 $p_{ini} < P_{stable}$ 。

输入电压与输入功率的稳定区域如图 2(b)所示,该稳定区域与图 2(a)所示的稳定区域相对应,由此得到输入均压的稳定判据 II: 若 ISOP 系统中各模块的输入电压与输入功率曲线经过稳定点,且位于图 2(b)中的阴影区域内,则系统中各模块可以抑制输入电压扰动,实现输入均压稳定。

2 ISOP 逆变器输入均压稳定分析

第 1 节提出的输入均压稳定判据也可用于判断 ISOP 逆变器的输入均压稳定性。ISOP 逆变器的主电路如图 3(a)所示。串联要求各模块具有隔离功能,因此采用隔离式全桥直流变换器和全桥逆变器级联的结构。直流变换器采用高频变压器实现电气隔离功能,便于各模块在输入侧串联。

逆变器的输出功率包括有功和无功两部分。忽略系统中的高频分量,输出电压和输出滤波电感电流可表示为

$$u_o = U_{om} \sin \omega t \quad (7)$$

$$i_{Lf} = I_{Lm} \sin(\omega t + \theta) \quad (8)$$

式中: ω 为输出电压角频率; θ 为电感电流与输出电

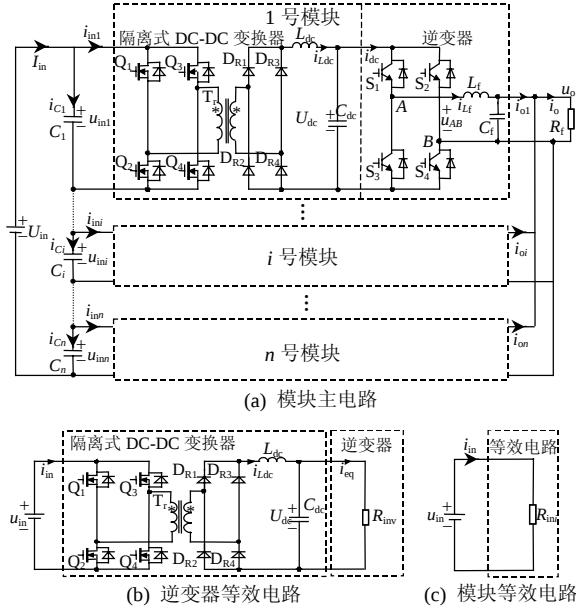


图 3 逆变模块主电路及其等效电路

Fig. 3 Main circuit of inverter module and its equivalent circuit

压的相位差, $-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$ 。逆变器桥臂间电压为

$$u_{AB} = u_o + L_f \frac{di_{Lf}}{dt} \quad (9)$$

由式(8)、(9)得到逆变桥瞬时输出功率表达式为

$$p(t) = u_{AB} i_{Lf} = \frac{U_{om} I_{Lm} \cos \theta}{2} + \frac{\omega L_f I_{Lm}^2 \sin(2\omega t + 2\theta) - \frac{U_{om} I_{Lm} \cos(2\omega t + \theta)}{2}}{2} \quad (10)$$

式中：恒定分量 $p = \frac{U_{om} I_{Lm} \cos \theta}{2}$ 为有功分量；交变分量 $q = \frac{\omega L_f I_{Lm}^2 \sin(2\omega t + 2\theta) - \frac{U_{om} I_{Lm} \cos(2\omega t + \theta)}{2}}{2}$ 为无功分量。

根据能量守恒原理，可解得逆变器的输入电流为

$$i_{dc} = \frac{U_{om} I_{Lm} \cos \theta}{2U_{dc}} + \frac{\omega L_f I_{Lm}^2 \sin(2\omega t + 2\theta) - \frac{U_{om} I_{Lm} \cos(2\omega t + \theta)}{2}}{2U_{dc}} \quad (11)$$

输出的有功和无功分量分别由输入电流 i_{dc} 中的直流和交流分量形成。文献[17]按照直流变换器输出电感电流 i_{Ldc} 中交流分量的多少，将直流变换器的工作模式分为快速模式和平均工作模式。在快速模式时， C_{dc} 容量较小， i_{dc} 中的低频交流分量大部分流过 L_{dc} ，使前级开关管承受较大的电压和电流应

力。在平均工作模式时， C_{dc} 容量较大， i_{dc} 中的低频交流成分主要流过滤波电容 C_{dc} ，而很少流过输出电感 L_{dc} ，可以忽略交流成分对直流变换器的影响，此时电感电流 i_{Ldc} 中只有直流分量。由于平均工作模式不需要直流变换器的开关器件承受较大的电压和电流应力，且电容 C_{dc} 可以消除前后级的耦合，提高级联系统的稳定性，因此适用于组合系统。此时逆变器作为前级直流变换器的负载，可以等效为图3(b)所示的电阻 R_{inv} ，其电流 i_{eq} 近似等于电感电流 $i_{Ldc} = \frac{U_{om} I_{Lm} \cos \theta}{2U_{dc}}$ ，因此可以求得电阻 R_{inv} 为

$$R_{inv} = \frac{U_{dc}}{i_{eq}} = \frac{2U_{dc}^2}{U_{om} I_{Lm} \cos \theta} = \frac{U_{dc}^2}{p} \quad (12)$$

可见逆变器的等效电阻仅受输出有功功率的影响。

逆变器输出的无功由直流侧电容 C_{dc} 存储的能量提供，而 i_{dc} 中的交流分量在每个周期内对 C_{dc} 充电和放电，电容提供的平均功率为零，不需要从直流变换器吸取能量，因此无功功率并不影响模块的输入功率。

对于图3(b)的直流电路可以在输入端等效为电阻 R_{ini} ， R_{ini} 上的功率与负载电阻 R_{inv} 的功率相等，而 R_{inv} 上的功率又等于逆变器输出的有功功率，因此得到模块等效输入电阻为

$$R_{ini} = \frac{2u_{in}^2}{U_{om} I_{Lm} \cos \theta} \quad (13)$$

ISOP 逆变器模块经等效后，可采用输入均压稳定判据进行分析。由式(13)可知，当输入电压变化时，只有调节输出电感电流才能控制等效输入电阻的变化。

若不采用均压措施直接将逆变模块组成 ISOP 系统，将不能保证其输入功率曲线和输入等效电阻曲线位于均压稳定区内，也不能保证系统的稳定。

对于输入并联输出并联逆变器，文献[18-20]提出了各种输出均流控制策略保证系统的稳定，这些方法既实现了输出均流，也实现了输出功率相等，若系统中各模块的传输效率相等，则输入功率也相等。如果将输出均流控制方法用于 ISOP 逆变器，则各模块具有恒功率输入特性，输入电压与输入电流成反比：当输入电压增大时，输入电流减小；当输入电压减小时，输入电流增大。若模块输入电压 $u_{ini} > U_{stable}$ ，则 $i_{ini} < I_{in}$ ，输入电容 C_i 充电， u_{ini} 继续增大；若 $u_{ini} < U_{stable}$ ，则 $i_{ini} > I_{in}$ ，输入电容 C_i 放电， u_{ini} 继续

减小,所以模块输入电压离开稳定点后将不能保证均压稳定。

图4为采用输出均流控制时,各模块的输入特性曲线。图4(a)中,各模块的输入等效电阻曲线不在稳定区域内,根据判据 I 推得系统不能实现输入均压稳定。图4(b)中的输入功率曲线也不在稳定区域内,根据判据 II 也可推得系统不能实现输入均压稳定。由此可见,输出均流控制不能保证输入均压稳定。

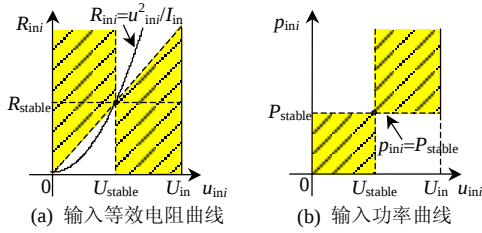


图4 输出均流控制策略的输入特性曲线
Fig. 4 Input characteristic curves by output-current sharing control strategy

图5是一种ISOP逆变器的输入均压控制策略。该策略通过控制逆变器的输出滤波电感电流,使输入电压高的模块输出电流增大,使输入电压低的模块输出电流减小,从而实现输入端的自动均压。电流环的速度远快于电压环,在低频段可将电流环节近似等效为比例环节 K_i ,由此得到各模块的输出电感电流表达式

$$i_{Lfi} = K_i G_{vo} (u_{ref} - k_{vf} u_o) [1 - G_{vd} k_f (U_{in}/n - u_{ini})] \quad (14)$$

各模块的输入电压满足

$$u_{in1} + \dots + u_{ini} + \dots + u_{inn} = U_{in} \quad (15)$$

各个模块输入均压时, $u_{in1} = \dots = u_{ini} = \dots = u_{inn} =$

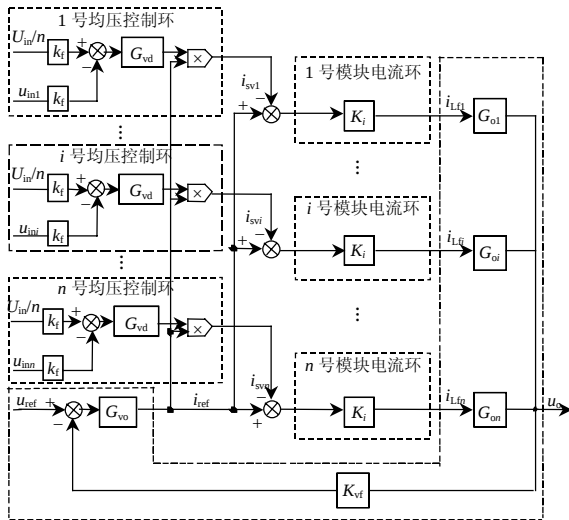


图5 ISOP 逆变器的输入均压控制策略
Fig. 5 Input-voltage sharing control strategy for ISOP inverter

U_{in}/n 。由式(14)可得 $i_{Lfi} = \dots = i_{Lfi} = \dots = i_{Lfn}$, 记输出电感电流为 i_L 。由输出电流相等得到输出功率相等 $p_{o1} = \dots = p_{oi} = \dots = p_{on}$, 由能量守恒推得输入功率相等 $p_{in1} = \dots = p_{ini} = \dots = p_{inn} = P_{in}/n$ 。

系统中各模块的稳定点为 $U_{stable} = U_{in}/n$ 和 $P_{stable} = P_{in}/n$ 。对第 i 个模块进行分析, 根据式(14), 若 $u_{ini} > U_{stable}$, 则 $i_{Lfi} > i_L$, $p_{ini} > P_{stable}$; 若 $u_{ini} < U_{stable}$, 则 $i_{Lfi} < i_L$, $p_{ini} < P_{stable}$ 。根据模块等效输入电阻曲线和输入功率曲线图6所示, 无论模块输入电压高于或低于稳定电压 U_{stable} , 均压控制策略均能使输入等效电阻曲线和输入功率曲线位于稳定区域内。ISOP系统的稳定判据I、II可证明图5中的ISOP逆变器均压控制策略可以实现输入均压稳定。

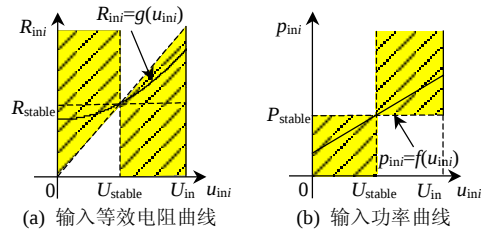


图6 输入均压控制策略的输入特性曲线
Fig. 6 Input characteristic curves by sharing control strategy

由上述分析得出的输入均压策略, 可实现输入均压稳定, 并且满足输入均压稳定判据I、II; 而输出均流控制策略不能实现输入均压, 也不满足输入均压稳定判据I、II。系统分析过程与系统中模块的数量无关, 因此可用均压稳定判据I、II判断ISOP系统的输入均压稳定性。

3 实验验证

为了验证ISOP逆变器输入均压控制策略与均压稳定判据, 按照图3(a)所示电路搭建了一台由2个模块组成的ISOP逆变器原理样机。系统的主要参数: 输入直流电压为540(1±10%) V; 系统容量为2 kVA; 输出电压为115 V/400 Hz; 交流输出滤波电感为0.6 mH; 输出滤波电容为16 μF; 输入电容为1 000 μF。

图7为稳态时两模块输入电压、输出电流和输出电压波形。图中两模块的输入电压相等、输出电流相等, 系统实现了输入均压和输出均流。这表明该ISOP逆变器输入均压控制策略可以实现系统稳定, 实验结果与稳定判据分析一致。

图8是稳态时各模块输入直流电压中的交流分量与输出电压波形。输入直流电压由三相50 Hz交

流电整流得到, 所以输入电压中含有 300 Hz 的交流分量。因为模块的输入端并未受到后级无功分量的影响, 所以输入电压中未出现 400 Hz 及其整数倍的交流分量。

图 9 是中间级直流电压的交流分量与输出电压波形。由于中间级滤波电容 C_{dc} 存在串联等效电阻, 当逆变器输入电流 i_{dc} 中的交流分量流过时会产生电压纹波, 电压纹波主要由 800 Hz 的低频分量组成。说明逆变器输入电流 i_{dc} 中的交流分量通过滤波电容构成回路。

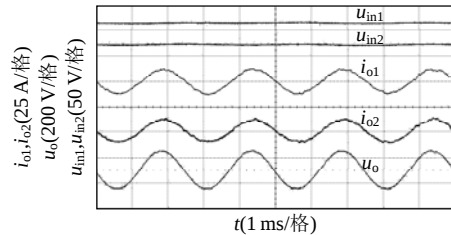


图 7 满载时输入电压和输出电压、电流波形
Fig. 7 Input-voltages, output-voltage and output-current waveforms in full load

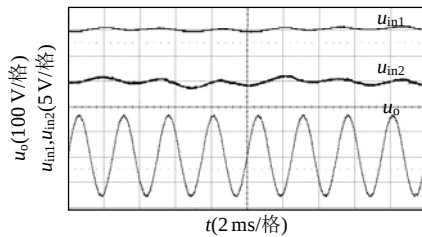


图 8 输入电压的交流分量和输出电压波形
Fig. 8 AC components of input-voltage and Output-voltage waveforms

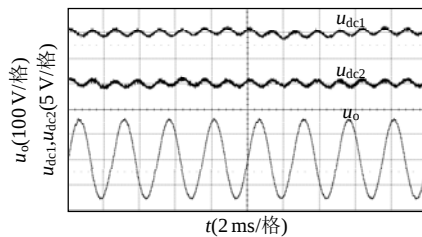


图 9 中间级直流电压的交流分量和输出电压波形
Fig. 9 AC components of middle DC voltage and Output-voltage waveforms

4 结论

对于 ISOP 系统, 可通过各模块输入端口特性判断系统的输入均压稳定性, 由此推导出 2 个均压稳定判据。判据 I: 若系统中各模块的输入等效电阻曲线经过稳定点, 且位于图 2(a) 所示的稳定区域内, 则系统输入均压稳定。判据 II: 若系统中各模块的输入功率曲线经过稳定点, 且位于图 2(b) 所示的稳定区域内, 则系统输入均压稳定。

ISOP 逆变器输出的无功功率仅与各模块中间级的直流侧滤波电容进行能量交换, 并不反映到模块的输入功率中, 对输入均压稳定性没有影响; 逆变器输出的有功功率会影响到输入端均压稳定性, 通过调节输出滤波电感电流可以控制输入均压。均压判据 I、II 证明: 采用输出均流控制策略不能实现输入均压稳定, 而采用输入均压控制策略可以实现 ISOP 逆变器的输入均压稳定。

参考文献

- [1] 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.
Wang Jiangang, Ruan Xinbo, Wu Wei, et al. Integrated power electronics module using flip chip technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17): 32-36(in Chinese).
- [2] 王建冈, 阮新波, 陈军艳. 航空用大功率模块电源的设计及关键技术应用研究[J]. 电工技术学报, 2005, 20(12): 95-100.
Wang Jiangang, Ruan Xinbo, Chen Junyan. Development of high power aviation modular power supply and research on key application technologies[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(12): 95-100(in Chinese).
- [3] 陈文洁, 杨旭, 杨拴科, 等. 分立元件构成的电力电子集成功率模块的设计[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 104-110.
Chen Wenjie, Yang Xu, Yang Shuanke, et al. A design of discrete components based integrated power modules[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 104-110(in Chinese).
- [4] 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.
Gu Yilei, Lü Zhengyu, Qian Zhaoming. A family of candidate topologies for low to medium power system integration standard DC/DC module[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 45-49(in Chinese).
- [5] 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(17): 21-26.
Hu Lei, He Xiangning. Decentralized autonomous control of power electronics system based on bionics[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17): 21-26(in Chinese).
- [6] 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 Trans. on Power Electronics, 2004, 19(6): 1462-1472.
- [7] 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]. IEEE APEC, Anaheim, USA, 2004.
- [8] Ruan X, Cheng L. Control strategy for input-series output-parallel converter[C]. IEEE PESC, Jeju, Korea, 2006.
- [9] Bhinge A, Mohan N, Giri R, et al. Series parallel connection of DC-DC converter modules with active sharing of input voltage and load current[C]. IEEE APEC, Dallas, USA, 2002.
- [10] Kim J W, You J S, Cho B H. Modeling, control, and design of input-series-output-parallel-connected converter for high-speed-train power system[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2001, 48(3): 536-544.
- [11] Ma Xuejun, Niu Jinhong, Kang Yong. Two full-bridge

- input-series-output-parallel integrated-magnetic converter for high input voltage[C]. International Conference Electrical Machines and Systems, Nanjing, China, 2005.
- [12] 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.
Zhang Tao, Ruan Xinbo. A method to voltage sharing and current sharing for input-series output-parallel full-bridge converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 47-50(in Chinese).
- [13] 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.
Ma Xuejun, Niu Jinhong, Kang Yong. Study on input-series-output-parallel converter with voltage sharing between input-capacitor[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(16): 86-91(in Chinese).
- [14] 程璐璐, 阮新波, 章涛. 输入串联输出并联的直流变换器控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(22): 67-73.
Cheng Lulu, Ruan Xinbo, Zhang Tao. Control strategy for input-series output-parallel DC-DC converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(22): 67-73(in Chinese).
- [15] Kimball J W, Mossoba J T, Krein P T. Control technique for series input-parallel output converter topologies[C]. IEEE PESC, Recife Brazil, 2005.
- [16] 张军明. 中功率 DC/DC 变流器模块标准化若干关键问题研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
Zhang Junming. Research on key aspects in standardization for middle power level DC/DC converter[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.
- [17] 朱成花. 直流分布式电源系统子系统相互作用分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
Zhu Chenghua. Subsystem interaction analysis of DC distributed power system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005.
- [18] 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.
Jiang Guibin, Pei Yuanqing, Yang Xu, et al. Parallel operation of sinusoid wave inverters without control interconnections[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 94-98(in Chinese).
- [19] 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.
Cheng Rongcang, Liu Zhengzhi. Analysis of parallel single-phase inverters of large capacity[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 112-116(in Chinese).
- [20] 段善旭, 刘邦银, 康勇, 等. UPS 并联系统的 SPWM 再调制控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 81-86.
Duan Shanxu, Liu Bangyin, Kang Yong, et al. The techniques of SPWM re-modulation of UPS in parallel operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 81-86(in Chinese).



庄凯

收稿日期: 2008-04-22。

作者简介:

庄凯(1975—), 男, 博士研究生, 研究方向为逆变器和数字控制, zhuangkai@nuaa.edu.cn;

阮新波(1970—), 男, 博士, 教授, 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。

(编辑 张玉荣)