

基于下垂锁相的逆变器并网控制策略研究

阚加荣¹, 肖华锋², 过亮³, 谢少军²

1. 盐城工学院电气工程学院, 江苏省 盐城市 224051;
2. 南京航空航天大学自动化学院, 江苏省 南京市 210016;
3. 国网南京自动化研究院, 江苏省 南京市 210003)

Study of Control Strategy for Grid-connected Inverters Based on Dropped PLL

KAN Jiarong¹, XIAO Huafeng², GUO Liang³, XIE Shaojun²

1. College of Electrical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, Jiangsu Province, China;
2. College of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu Province, China;
3. Nanjing Automation Research Institute, Nanjing 210003, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: Power factor of grid-connected inverter with grid voltage feed-forward control is affected by the current-loop parameters and filter inductor. A novel control strategy based on dropped phase-locked loop (PLL) was proposed. The phase separation between the grid current and grid voltage was detected and the phase was used to calculate the PLL output frequency which determines the grid current phase. Unit power factor can be achieved and anti-islanding was also fulfilled. The control block diagram was given. The principle of the proposed method and the selection of droop coefficient were analyzed. The simulation and experiment results verify that the proposed method is effective in improving the power factor and the anti-islanding ability of grid-connected inverters.

KEY WORDS: grid-connected inverter; phase-locked loop (PLL); feed forward control; power factor; anti-islanding; phase difference

摘要: 采用电网电压前馈的并网逆变器, 其滤波电感的感值、电流控制器的参数会影响逆变器并网功率因数。在电网电压前馈电流型并网控制策略的基础上, 提出基于下垂特性的新型锁相环(phase-locked loop, PLL)控制方法, 采用电网电压和并网电流相位差为反馈量调节锁相环的输出, 可以实现并网逆变器单位功率因数运行, 并且可以实现逆变器的反孤岛运行。给出该方法的控制框图, 分析工作原理和锁相环下垂系数的选取方法, 仿真和实验结果验证了该方法在改善逆变器并网功率因数和反孤岛能力方面的正确性和有效性。

关键词: 并网逆变器; 锁相环; 前馈检测; 功率因数; 反孤岛; 相位差

基金项目: 国家自然科学基金项目(51077070)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51077070).

0 引言

太阳能、风能以及燃料电池作为新型清洁的能源受到了广泛的关注, 利用这些能源的分布式发电技术成为全球能源可持续发展战略的重要组成部分^[1]。新能源分布式发电的一个研究热点是逆变器并网控制技术。并网逆变器的控制方法可以分为电流型控制和电压型控制^[2-3], 目前中小功率单相并网逆变器一般均采用电流型控制。电流控制常用方法有三角波交截^[4]、滞环控制^[5]、比例谐振控制^[6]、预测控制^[7]、无差拍控制^[8]、单周期控制^[9]等。所有这些控制方法都需要采用锁相技术为逆变器电流控制环提供跟踪电网电压的基准电流相位。由于逆变器电流环控制器参数、并网滤波器以及相位检测误差的影响, 实际的并网电流与电流基准之间存在一定的相位差, 这一相位差的存在使得逆变器在向电网输送有功功率的同时也向电网输送无功功率, 这增加了系统的电流应力, 增加了不安全的因素。目前对这一问题的解决方法主要是在数字芯片中调节逆变器电流环基准电流的相位, 而这种调节方法属于开环调节, 其精度不高(如开关频率为 10 kHz 的逆变器, 相位调节精度最高为 0.9°), 因此需要找到一种能有效解决该问题的方法。

下垂控制方法源于电力系统中的同步发电机并网理论, 但目前该方法被较多的应用在直流变换器并联^[10-12]和逆变器并联控制技术中^[13-14], 本文将锁相环技术和下垂控制方法相结合, 提出一种新的逆变器并网锁相控制策略。仿真和实验结果表明,

该方法能实现并网逆变器功率因数为1运行,并可以实现并网逆变器的反孤岛运行。

1 进网电流相位差产生的原因

图1为并网逆变器的主电路图,其中直流母线电压 U_D 由可再生能源提供,逆变器主电路由4个全控型器件组成,电感 L 用于滤除逆变器进网电流的谐波,通过适当的控制方法实现逆变器单位功率因数并网运行。

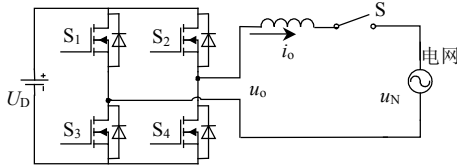


图1 并网逆变器主电路图

Fig. 1 Main circuit of grid-connected inverter

越来越多的并网逆变器采用LCL滤波器,虽然获得了较为纯净的进网电流,但是却提高了系统的阶数,对系统的控制策略提出了更高的要求^[15-16]。目前,工业应用中使用最多的仍是图1所示的单电感滤波逆变器。

图2所示为常用的并网逆变器控制框图。在电流反馈控制的基础上,采用电压前馈提高逆变器的动态特性和抗电网扰动能力。本文基于该控制策略来分析电网电压与并网电流存在相位差的原因,其它类型的主电路和控制方法^[17]都可以做类似的分析。

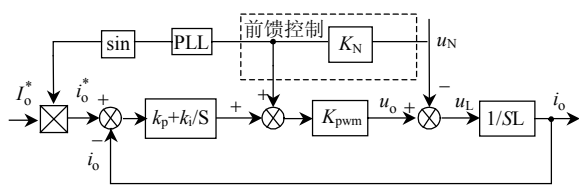


图2 并网逆变器控制框图

Fig. 2 Control block diagram of grid-connected inverter

图2中,进网基准电流 i_o^* 从锁相环(phase-locked loop, PLL)获得相位基准。在 $K_N = 1/K_{pwm}$ 时,其闭环传递函数^[18]如式(1)所示:

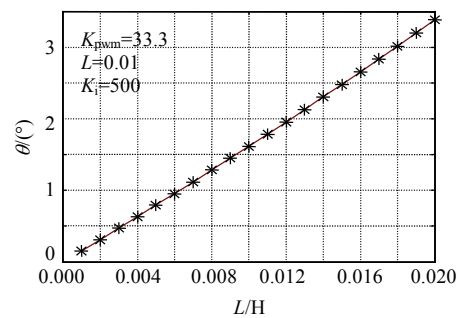
$$I_o(s) = \frac{K_{pwm} k_p s + K_{pwm} k_i}{L s^2 + K_{pwm} k_p s + K_{pwm} k_i} I_o^*(s) \quad (1)$$

进网基波电流与基准电流的相位差为

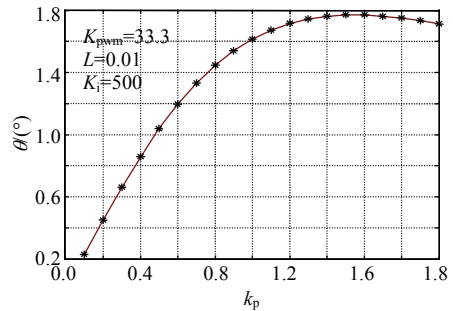
$$\theta = \frac{\omega^3 L K_{pwm} k_p}{\omega^2 K_{pwm}^2 k_p^2 - \omega^2 L K_{pwm} k_i + K_{pwm}^2 k_i^2} \quad (2)$$

从式(2)可以看出,影响相位差的参数有3个: L 、 k_p 和 k_i 。下面分别研究这3个参数对相位差的影响程度。图3为上述3个参数分别变化,其余参数固定时的相位差变化曲线。图3(a)为相位差随滤

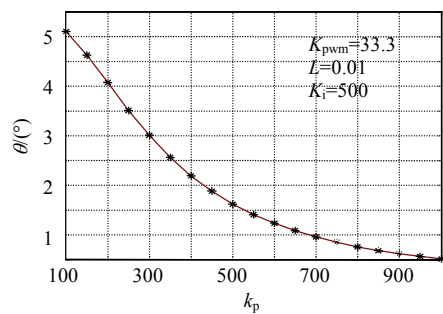
波电感值的变化曲线,可以看出,随着滤波电抗器电感值的增加,相位差逐渐增加;图3(b)为相位差随电流环比例系数变化时的曲线,随比例系数的增加,相位差先增加后减小;图3(c)中,相位差随积分系数的增加而减小。为了保证较为纯净的进网电流,滤波电抗器的电感值不能太小;在一定电流跟踪精度的前提下又需要保证系统稳定,电流环的比例系数和积分系数不宜取太大。因此,从理论上讲,不附加额外的相位补偿装置,进网电流与电网电压的相位差不可避免,如果再考虑电网电压相位检测环节的延时,相位差会非常大。



(a) 相位差随电感变化曲线



(b) 相位差随比例系数变化曲线



(c) 相位差随电流环积分系数变化曲线

图3 相位差变化曲线

Fig. 3 Variation curves of phase difference

2 基于下垂特性的锁相环

2.1 基于下垂特性锁相环的工作原理

图4为基于下垂特性锁相环的并网逆变器控制框图。与图2所示控制策略相比,图4中的锁相环具有下垂特征,其输出频率受并网逆变器进网电流

与电网电压的相位差控制。每个工频周期得到进网电流与电网电压的相位的差值 θ ，同时检测出电网电压角频率 ω_0 ，逆变器下一周期基准电流的频率由式(3)确定。

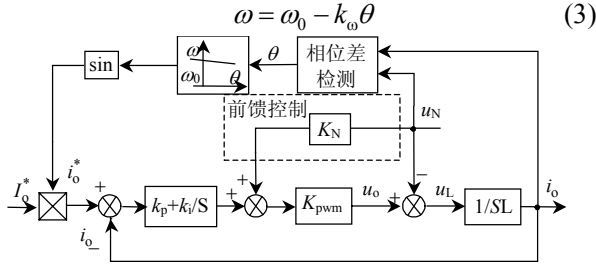


图 4 基于下垂特性锁相环的控制框图

Fig. 4 Control block diagram based on drooped PLL

式(3)中： k_ω 为下垂系数； θ 为进网电流超前电网电压的相位，单位为弧度。如果检测出电网电压相位超前，即 θ 为负值，通过下垂计算公式，得到下一周期的基准电流的频率大于电网电压的频率，则在下一个周期的时间内，它们之间的相位差就会缩小，经过若干个工频周期，最终它们之间的相位差等于0；同理可以说明 θ 为正值时的情况。因为电网的频率可能会轻微波动，为保证输出电流实时跟踪电网电压的相位，式(3)中等号右边的第1个值 ω_0 为变量，这一点与无互联线逆变器并联系统中的下垂公式不同。

2.2 下垂系数的选取

假设电网电压相位超前逆变器进网电流相位，在基准电流频率下垂特性控制下，经过一个工频周期后，相位差可能有以下3种情况：1) 电网电压相位仍然超前于进网电流的相位；2) 电网电压相位滞后于进网电流的相位，但是该滞后的相位小于原本电网电压超前的相位；3) 电网电压相位滞后于进网电流的相位，但是该滞后的相位大于原本电网电压超前的相位。第1种情况逆变器相位调整的过程比较平稳，但是调整时间稍长；第2种情况相位差有一个交替超前、滞后的振荡过程；第3种情况相位振荡超出了系统稳定的范围，会导致控制失败。为了快速、稳定地实现相位跟踪，可以将第1种情况和第2种情况的临界点作为频率下垂系数的选取原则：当逆变器稳定并网运行时，逆变器输出电流与电网电压同相位，如果由于外部影响或者电网频率波动出现了相位差，则在基准电流频率下垂控制的作用下，经过一个工频周期，重新使两者相位相等。因此有

$$2\pi - \omega T_0 = \theta \quad (4)$$

式中 T_0 为电网电压的周期，则

$$2\pi - \omega \frac{2\pi}{\omega_0} = \theta \quad (5)$$

将式(5)代入式(3)，得

$$k_\omega = \omega_0 / 2\pi = f_0 \quad (6)$$

根据式(6)得到的下垂系数即为电网电压频率值，它会随着电网频率的波动而变化。为了保证系统一定的稳定裕量，在实际中可以取 k_ω 小于电网频率值。

2.3 基于下垂特性锁相环控制方法的实质

由检测电路检测出的电网电压与进网电流的相位差得到下一工频周期基准电流的频率，则在下一个工频时间内的任意时刻 t_x ，两者之间的相位差缩小量为

$$\Delta\theta = \int_{t_0}^{t_x} [\omega_0 - (\omega_0 - k_\omega \theta)] dt = k_\omega \int_{t_0}^{t_x} \theta dt \quad (7)$$

式中 t_0 为该工频周期的起始时刻。可以看出，相位差的缩小量即为下垂系数乘以上一周期的相位差随时间的积分，因此基于下垂特性锁相环控制方法的实质是电网电压与进网电流相位差为反馈量，基准为0的一个相位差调节外环，其等效外环可以用图5表示。因为相位差的给定0是一个不变量，因此该控制方法可以实现相位的无静差跟踪。

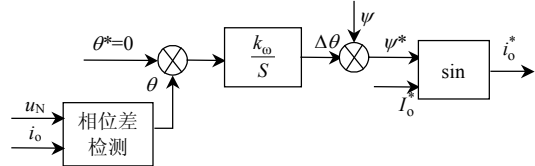


图 5 基于下垂特性锁相环的外环等效框图

Fig. 5 Equivalent block diagram of PLL basing on droop characteristic

2.4 方法内在的反孤岛运行能力

采用图4控制方法时，当电网故障脱离后，除非本地负载功率因数正好为1，功率因数超前或滞后时，负载电压和电流必定存在一定的相位差，在相位差/频率下垂特性的作用下，逆变器的输出频率将因为基准频率的持续减少或增加而使得逆变器发生欠频或过频，从而实现孤岛保护。如果再配合使用过压或欠压检测等简单的被动检测方法，可保证在电力系统故障时快速可靠的检测出孤岛。

3 仿真实验

基于 Matlab/simulink 建立了采用本文所提控制方法的并网逆变器的仿真模型，取 $k_p = 1$ ， $k_i = 1000$ ，滤波电感 $L = 10$ mH，逆变器开关频率为

10 kHz, 直流母线电压为 400 V, 设定进网电流的幅值为 5 A。图 6 为采用传统锁相方式加电流环控制方法的仿真波形。因为单电感作为滤波器时, 进网电流中存在大量的高频谐波, 为了便于观察, 图 6 中的电压电流波形为采用了相同的二阶低通滤波器后的波形。从波形可以看出, 电网电压与逆变器进网电流之间存在一定的相位差, 相位差的存在使得逆变器运行的功率因数小于 1。

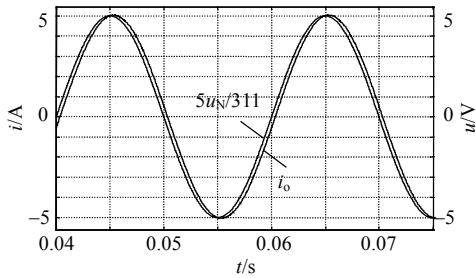


图 6 采用传统锁相方法时入网电流与电网电压波形
Fig. 6 Grid current and grid voltage using traditional PLL

图 7 所示为并网逆变器采用下垂锁相环的时的

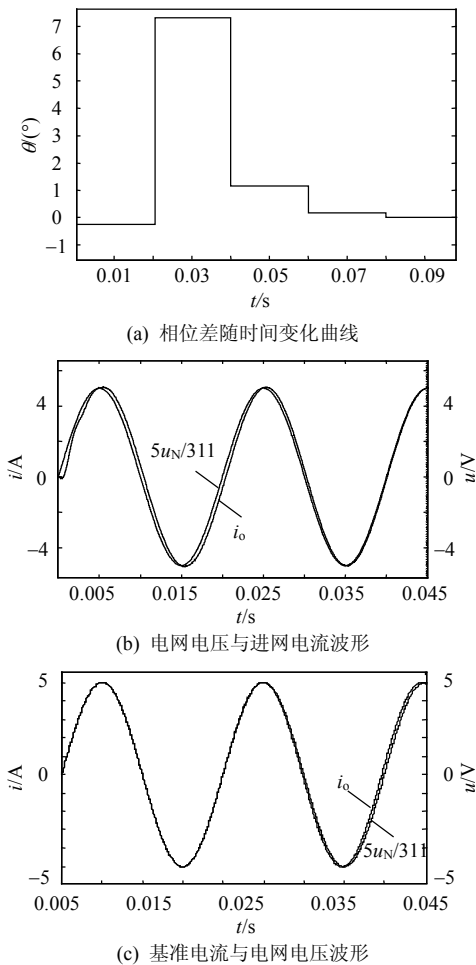


图 7 基于下垂特性控制方法的输出波形

Fig. 7 Waveform of system basing on droop characteristic

仿真波形, 下垂系数选为 20。图 7(a)为电网电压超前进网电流的角度随时间的变化图, 因为选取下垂系数较小, 因此两者相位趋近的速度需要几个工频周期完成。图 7(b)为电网电压与进网电流的波形图, 在下垂控制的作用下, 逆变器进网电流相位逐渐与电网电压相位一致。图 7(c)为逆变器的基准电流与电网电压的波形, 仿真时设定两者初始相位一致, 在下垂控制特性的作用下, 电流基准相位逐渐超前于电网电压的相位, 以抵消由于滤波电感和电流环控制参数引起的相位滞后的影响。仿真结果验证了本文所提出的控制方法的有效性。

图 8 为本地负载为 40 Ω 电阻与 2 μF 电容并联时, 电网故障出现孤岛时的仿真波形, 在 $t=0.041$ s 时电网发生故障。图 8(a)为负载的电压和电流波形, 可以看出, 电网故障以前, 本地负载电压等于电网电压, 一旦电网出现故障, 则负载电压大小变为电流基准值与负载阻抗的乘积。因为负载呈现容性, 即负载电流的相位超前负载电压的相位, 检测出的相位差 θ 为正值, 此时在相位差/频率下垂特性的作用下, 频率持续下降, 如图 8(b)所示。在频率偏移电网频率中心值超出一定范围以后, 保护动作。

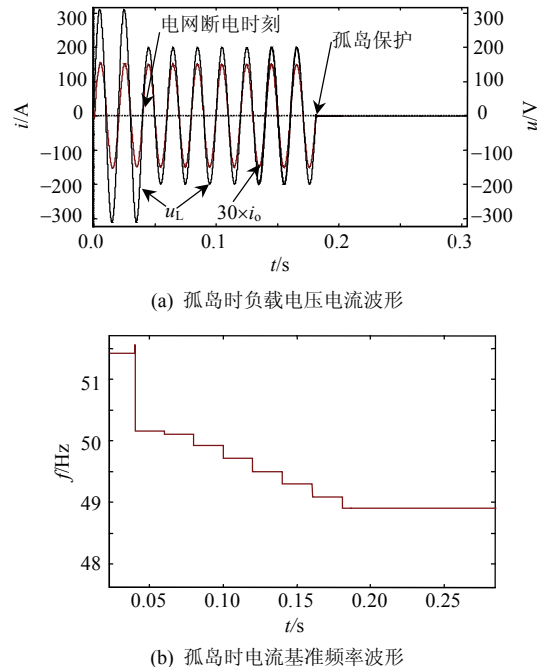


图 8 孤岛时系统输出波形
Fig. 8 Waveform of system in the time of islanding

4 实验验证

根据本文所提的控制方法, 制作了一台基于 DSP TMS320LF2407 的并网逆变器样机进行验证,

其参数与仿真数据一致。样机的实验波形如图 9—11 所示。

图 9(a)为并网逆变器稳态工作波形,可以看出,采用基于下垂特性锁相的并网逆变器稳态工作稳定;图 9(b)和(c)分别为并网逆变器在并网电流突加和突卸时的波形,在并网电流突变的过程中,系统输出电流能够较快跟随基准电流的变化,其动态性能非常好。

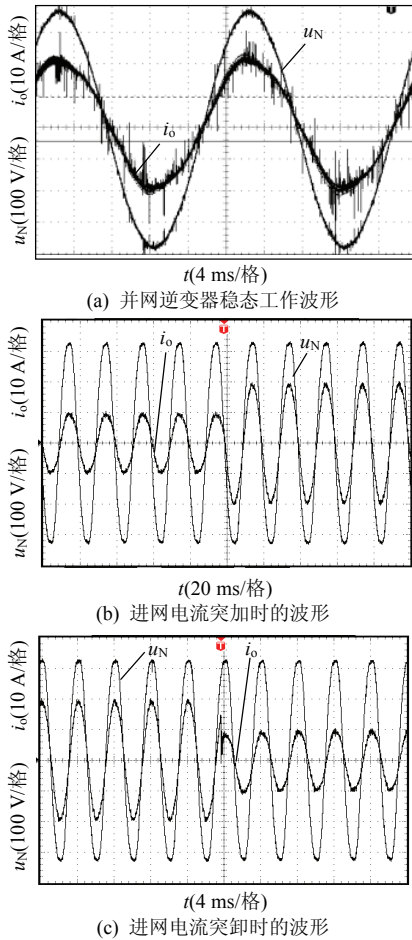


Fig. 9 Waveform of grid-connected inverter

图 10 为出现孤岛时逆变器对孤岛作出响应。因为采用了与被动孤岛检测相结合的方法,并网逆变器能迅速通过 u_{switch} 信号切断并网开关,从而使逆变器处于独立运行模式。

图 11(a)、(b)分别为本文所提控制方法与传统控制方法并网时电网电压与并网电流之间相位差的波形。图 11 中的相位差曲线是通过调制脉宽调制(pulse width modulation, PWM)波再经 RC 二阶低通滤波器后所得。由于基于下垂特性锁相的并网逆变器将电网电压与并网电流实现了闭环控制,因此图 11(a)给出最终稳定工作的相位差为 0。而采用传

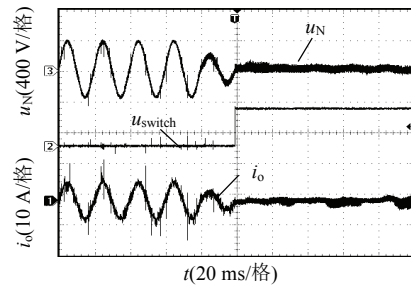


图 10 孤岛状态时逆变器电压电流波形

Fig. 10 Waveform of voltage and current when islanding

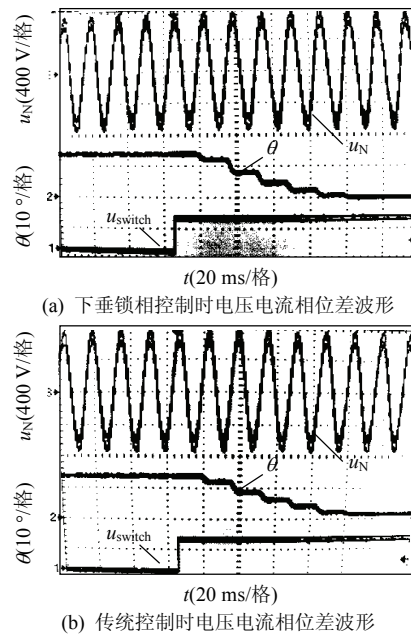


图 11 传统与改进方法电压电流相位差比较
Fig. 11 Phase difference comparison between traditional and improved method

统并网控制方法的电网电压与并网电流相位差维持在一个大于 0 的值,图 11(b)中显示的稳定相位差约为 3° 。可以看出基于下垂特性锁相的逆变器并网控制策略可提高并网逆变器的注入电网功率的功率因数。

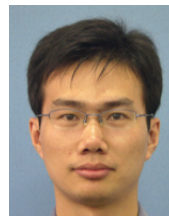
5 结论

采用传统基于电网电压前馈的并网控制策略时,逆变器运行的功率因数小于 1,为克服这一缺点,提出了一种基于下垂特性锁相环的进网电流控制方法,通过检测电网频率和电网电压与逆变器进网电流的相位差,得到具有下垂特征的基准电流频率。该控制方法可以使得进网电流与电网电压的相位差为 0,并可以实现逆变器的反孤岛运行。仿真和实验验证了该方法的有效性。

参考文献

[1] Nigim K A, Zobaa A F. Development and opportunities of distributed

- generation fuelled by renewable energy sources[J]. International Journal of Global Energy Issues, 2006, 26(3): 215-231.
- [2] 张承慧, 叶颖, 陈阿莲, 等. 基于输出电流控制的光伏并网逆变器[J]. 电工技术学报, 2007, 22(8): 41-45.
Zhang Chenghui, Ye Ying, Chen Alian, et al. Research on grid-connected photovoltaic inverter based on output current control[J]. Transactions of China Electro technical Society, 2007, 22(8): 41-45(in Chinese).
- [3] Yu T, Choi S, Kim H. Indirect current control Algorithm for Utility Interactive Inverters for Seamless Transfer[C]/IEEE Power Electronics Specialists Conference. Jeju, South Korea: IEEE, 2006: 1-6.
- [4] 戴朝波, 林海雪. 电压源逆变器三角载波电流控制新方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 99-102.
Dai Chaobo, Lin Haixue. A novel triangular carrier current control for voltage source inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(2): 99-102(in Chinese).
- [5] 顾和荣, 杨子荣, 邬伟扬. 并网逆变器输出电流滞环跟踪控制技术[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).
- [6] 郭小强, 邬伟扬, 赵清林, 等. 三相并网逆变器比例复数积分电流控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(15): 8-14.
Guo Xiaoqiang, Wu Weiyang, Zhao Qinglin, et al. Current regulation for three-phase grid-connected inverters based on proportional complex integral control[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(15): 8-14(in Chinese).
- [7] Larrinaga S A, Vidal M A R, Oyarbide E, et al. Predictive control strategy for dc/ac converters based on direct power control[J]. IEEE Trans. on Industry Electronics, 2007, 54(3): 1261-1271.
- [8] Kojabadi H M, Yu Bin, Gadoura, et al. A novel DSP-based current-controlled PWM strategy for single phase grid connected inverters[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2006, 21(4): 985-993.
- [9] Femia N, Granozio D, Petrone G, et al. Optimized one-cycle control in photovoltaic grid connected applications[J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 2006, 42(3): 954-972.
- [10] Perkinson J. Current sharing of redundant DC-DC converters in high availability systems-A simple approach[C]/IEEE Applied Power Electronics Conference. Dallas, USA: IEEE, 1995: 952-956.
- [11] Luo S, Ye Z, Lin R L, et al. A classification and evaluation of paralleling methods for power supply modules[C]/IEEE Power Electronics Specialists Conference. Charleston, USA: IEEE, 1999: 901-908.
- [12] Kim J W, Choi H S, Cho B H. A novel droop method for converter parallel operation[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2002, 17(1): 25-32.
- [13] 阚加荣, 谢少军, 吴云亚. 无互联线并联逆变器的功率解耦控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(21): 40-45.
Kan Jiarong, Xie Shaojun, Wu Yunya. Research on decoupling droop characteristic for parallel inverters without control interconnection [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(21): 40-45(in Chinese).
- [14] Guerrero J M, Matas J, Garcia de Vicuna L, et al. Wireless control strategy for parallel operation of distributed-generation inverters [J]. IEEE Trans. on Industry Electronics, 2006, 53(5): 1461-1470.
- [15] 徐志英, 许爱国, 谢少军. 采用 LCL 滤波器的并网逆变器双闭环入网电流控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(27): 36-41.
Xu Zhiying, Xu Aiguo, Xie Shaojun. Dual-loop grid current control technique for grid-connected inverter using an LCL filter [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(27): 36-41 (in Chinese).
- [16] Karshenas H R, Saghati H. Performance investigation of LCL filters in grid connected converters[C]/IEEE Transmission & Distribution Conference and Exposition. Dallas: IEEE, 2006: 1-6.
- [17] 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).
- [18] 过亮. 独立/并网模式逆变器控制技术[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
Guo Liang. Research on control strategy for double-mode inverter [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008(in Chinese).



阚加荣

收稿日期: 2010-11-29。

作者简介:

阚加荣(1979), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为逆变器控制策略, kanjr@163.com;

肖华锋(1981), 男, 博士研究生, 从事软开关直流变换技术及太阳能并网技术的研究;

过亮(1983), 男, 硕士研究生, 研究方向为逆变器并网和风力发电控制技术;

谢少军(1968), 男, 教授, 博士生导师, 从事功率电子变换技术和航空电源系统的研究。

(责任编辑 吕鲜艳)