

交错并联反激式准单级光伏并网微逆变器

季晓春¹, 王建华², 嵇保健³, 蔡守平¹

(1. 安科瑞电气股份有限公司, 上海 201801;

2. 东南大学, 电气工程学院, 江苏 南京 210096;

3. 南京工业大学自动化与电气工程学院, 江苏 南京 210000;)

Interleaved Flyback Photovoltaic Grid-connected Micro Inverter

Ji Xiaochun¹, Wei Shaochong², Wang Jianhua³, Ji Baojian²,
Cai Shouping¹

(1. Acrel Co., Ltd, Shanghai 201801, China;

2. School of Automation & Electrical Engineering, Nanjing University of Technology,
Nanjing Jiangsu 210009, China;

3. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China;)

摘要: 独立光伏组件的微型逆变器能有效克服传统光伏系统存在的阴影问题。详尽介绍了某型准单级式交错并联微逆变器的设计、分析及其控制策略。该微型逆变器基于高频环节逆变技术, 有效实现了初、次级电气隔离, 解决了漏电流问题; 采用有源箝位技术吸收漏感能量, 实现了开关管的零电压开关 (ZVS); 采用变步长的扰动观察法实现最大功率点跟踪 (MPPT), 输入电压前馈方法可解决准单级式微逆母线电压崩溃问题。220W样机试验验证了该方案及控制策略的可行性, 整机MPPT效率为99.5%, 最高效率达到95%。

关键词: 微逆变器; 高频环节; 最大功率点跟踪

Abstract: To overcome the traditional photovoltaic systems have low overall output power caused by the partial mask, proposed a single PV module for a single micro-inverter topology and its control strategies. Using single-stage interleaved flyback converter, In order to overcome problem of flyback transformer primary side leakage, using Active block circuit to absorb the leakage inductance energy, achieving a zero-voltage switching tube switch, increases machine efficiency. Gives a system based on digital signal processor control process, the system uses a variable step size perturbation and observation method to achieve the maximum power point tracking, making each photovoltaic panels working on the maximum power point. Build a experiment prototype to verify the topology and control strategy is feasible solutions.

Keywords: Micro inverter; Flyback; DCM mode; MPPT

1 引言

传统集中式、组串式光伏并网发电系统通过对光伏电池板的串并联, 在有效提高母线电压后, 供给并网逆变器将电能输送到电网。其结构简单, 转换效率高, 尤其适合于日照较好的电站系统。但在东部城乡地区, 云层及建筑物、树木遮挡, 以及单块电池板发生故障等因素, 将严重降低整个系统的发电量。配备在每一个光伏组件后面的微型逆变器, 通过对各组件的独立控制使其工作在最大功率点, 大大提高了系统抗局部阴影的能力, 以及整体发电量。尽管其成本相对较高, 但模块化架构、高可靠性、高发电量、安装方便等优点使其为目前分布式光伏发电的一个重要方向。

在此详尽介绍了某型准单级式交错并联微逆变器设计、分析及控制策略。高频环节逆变技术不仅实现了微逆变输入输出电压大升压比匹配, 同时初次级电气隔离解决不了不隔离系统漏电流问题; 而且基于有源箝位技术吸收漏感能量, 实现了开关管的 ZVS。系统控制框图及流程表明采用变步长的扰动观察法能实现 MPPT, 输入电压前馈方法可解决准单级式微逆母线电压崩溃问题。

2 主电路拓扑

2.1 拓扑选择

准单级式反激逆变器仅有一级的功率变换^[4], 拓扑简单, 尤其适合低成本应用场合的要求。在断续模式 (DCM) 及临界连续模式 (BCM) 下, 其呈现电流源特性, 控制系统设计简单, 市目前光伏微逆变器

的理想拓扑。由于反激变换器输出功率有限，在微逆变器系统结构中，这里采取如图1所示交错并联技术，将两路反激变换器输入并联，输出并联，原边的主管交错180度导通以减小输入输出电流纹波，同时公用一组输出极性翻转桥；考虑到反激变压器漏感的存在，进一步采取有源钳位技术回收漏感，并实现了主管和辅助管的ZVS，有效减小开关损耗，提高了电路效率。

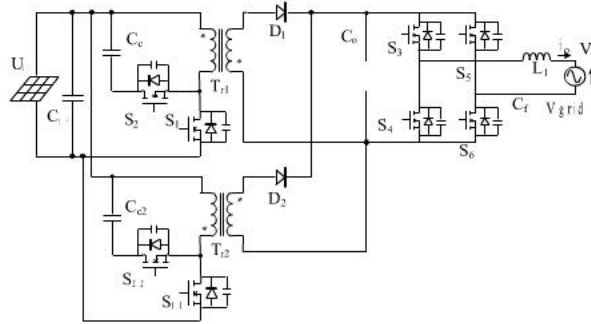


图1 交错并联反激型微逆变器拓扑结构

此时光伏组件经过反激变换器主开关 SPWM 高频调制，得到包络线为单极性工频正弦半波的输出电流。交流侧的工频换向桥驱动时序跟踪电网电压，将前面的单极性工频正弦半波翻转为正弦波并网电流，与电网电压同频同相。

2.2 工作模式分析

根据变压器的磁通是否连续，可将反激变换器的工作模式分为电感电流连续模式 (CCM)、DCM 及 BCM 3 种。CCM 模式下反激逆变器相对稳定性较差，需要妥善处理。目前主流的反激逆变器以 DCM 及 BCM 为主，但由于在 BCM 模式下，需要采用变频控制，计算和控制都较为复杂，因此这里采用 DCM。相对 BCM 及 CCM，DCM 的优点是恒频工作，控制简单，且消除了次级二极管反向恢复问题；缺点是相比 CCM 此时励磁电感较小，器件峰值电流应力较大。

为确保变换器工作在 DCM，需其初级电感 L_p 即励磁电感小于临界连续电感值。定义工频周期 T_{grid} 是高频开关周期的 $2k$ 倍，定义 d_p 为最大占空比，由于输入电流大小和占空比成正比，因此每个开关周期的占空比也是正弦脉纹 $d_p \sin(i\pi/k)$ ，则变压器原边电流 i_{dc} 的平均值为：

$$I_{dc,avg} = \frac{2}{T_{grid}} \sum_{i=1}^k \int_{(i-1)T_s}^{iT_s} i_{dc(i)}(t) dt$$

$$\text{化简得 } I_{dc,avg} = \frac{U_{dc} T_s}{4L_p} d_p^2$$

将 $P_{in} = U_{dc} * I_{dc,avg}$ 带入上式可得变压器原边电感：

$$L_p < L_{pmax} = \frac{U_{dc}^2 T_s}{4P_{in}} \left(1 + \frac{\lambda}{n}\right)^{-2} = \frac{U_{dc}^2 T_s}{4P_{in}} \left(1 + \frac{U_{grid,p}}{n}\right)^{-2}$$

3 控制系统

3.1 控制框图

准单级式微逆变器需同时完成 MPPT、锁相、孤岛检测和入网电流控制^{[5][6]}。如图 2 所示，通过 MPPT 计算提供得到的并网电流的基准幅值 I_o 大小，从而确保光伏组件以最大功率向电网传输能量。锁相提供并网电流的相位信息，确保入网电流与电网电压同频同相。孤岛检测是并网逆变器所必须具备的功能，在电网异常情况下关闭逆变器，确保人员和设备的安全。入网电流控制是并网逆变器的核心控制部分，这里通

过采样输出电流闭环控制，确保了高质量的并网电流（理论上在 DCM 下，开环控制即可实现电流源并网，但其并网电流总谐波含量相对较高）。

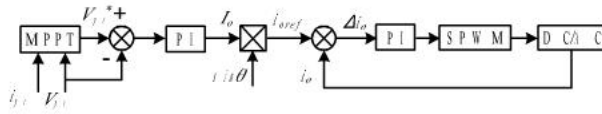


图 2 控制系统

3.2 准单级式系统 MPPT 及直流母线电压控制

MPPT 是通过相应的算法，不断调整并网电流基准，调整逆变器输出功率，从而调节光伏组件的输出功率，使得光伏组件输出功率最大。

扰动观察法原理简单，易于实现，是 MPPT 算法中最常用的方法之一。其算法原理是当前次的输出功率与前一次的输出功率作比较，假设 $P(k+1) > P(k)$ ，那么将光伏输出电压基准继续向着这一次变化的相同的方向进行扰动；反之，若输出功率变小，则在下一个周期改变扰动的方向，如此进行反复扰动、比较直至光伏系统输出功率达到最大。算法流程如图 3 所示。扰动观察法步长的大小决定了算法跟踪的速度和系统在最高处附近来回振荡的幅度，因此，本文采取一种变步长的扰动观察法^[7]，具体方式当功率较小时，扰动值 C 取值加大；当功率较大后，适当减小扰动值 C 的取值。

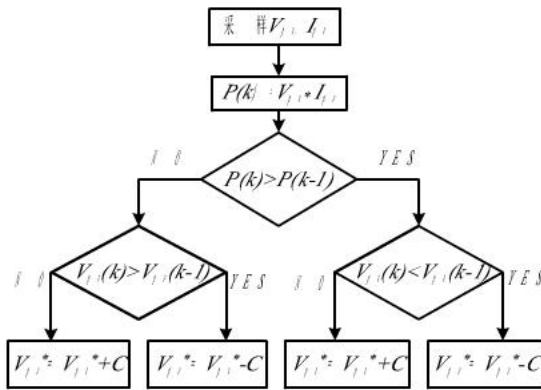
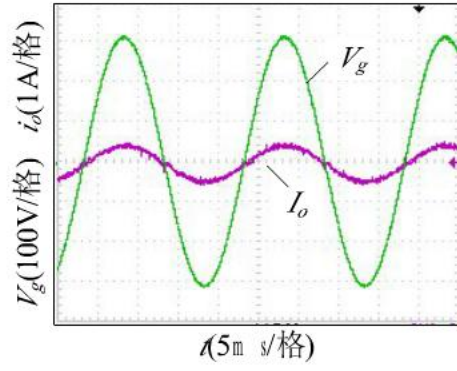


图 3 扰动观察法算法流程

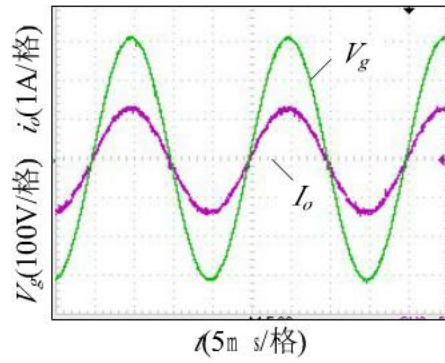
在准单级并网逆变系统中，单纯的 MPPT 环无法保证很好的动态性能，实现系统的稳定。当发生外界条件突变或者程序误判断时，直流母线电压会剧烈震荡甚至奔溃。如图 3 所示，在原有的控制基础上加一个输入电压环，防止在 MPPT 误判断时直流母线电压的剧烈震荡，可以有效防止母线电压的崩溃，实现系统的稳定运行。

4 实验结果

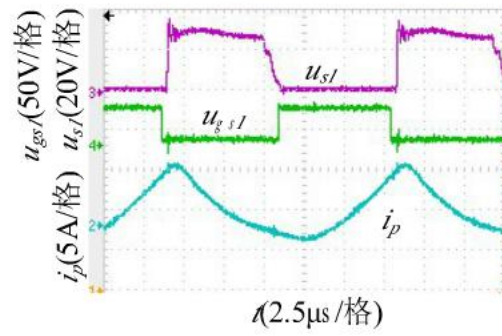
为验证上述交错并联准单级高频环节光伏并网微逆变器方案，在实验室完成了基于 DSP28035 控制的 220W 微逆变器样机研制。前级直流输入电压 $V_{pv} = 35\text{VDC}$ ，并网电压 $V_o = 220\text{VAC}$ ，电网频率 $f_{ac} = 50\text{Hz}$ ，主管 V1 开关频率 $f_s = 135\text{KHz}$ ，滤波电感 $L1 = 1\text{mH}$ ，光伏组件及交流电网采用光伏模拟器及交流电源模拟。图 4a、b 分别为轻载与满载时并网电流 i_o 的输出波形，可见 i_o 与 u_g 同频同相，且 i_o 波形质量都较好；由图 5c 可见，V1 在开通与关闭前，漏源极电压为零，实现了 V1 的 ZVS；图 4e 给出了变压器初级电压 u_p 、次级电压 u_s 和电流 i_s 、 u_g 的波形，验证了工频翻转桥的可行性。



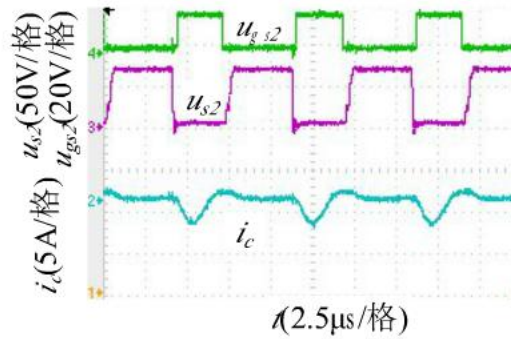
(a) 轻载输出



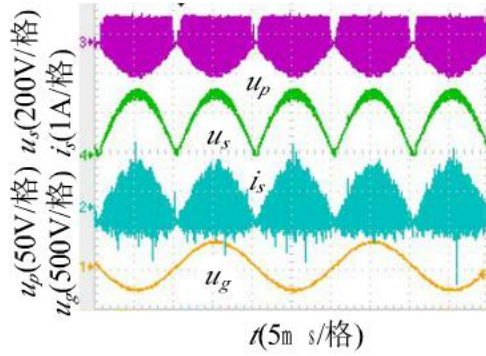
(b) 满载输出



(c) 主开关管波形



(d) 箝位管波形



(e) 变压器原副边电压波形

图 4 实验波形

图 5 给出光伏模拟器测试的 MPPT 效果，MPPT 效率为 99.5%。

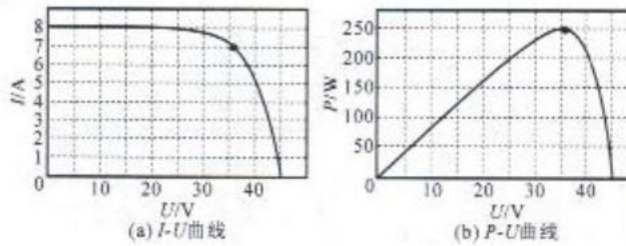


图 5 I-U 和 P-U 曲线

图 6a 效率测试曲线进一步表明微逆变器整机在整个负载范围内均达到了较高的效率，满载最大效率达到了 94%，图 6b 为在不考虑辅助电源损失下功率分析仪测试结果，最高效率为 95%，并网电流 THD 小雨 1.5%，验证了微逆变器方案的可行性。

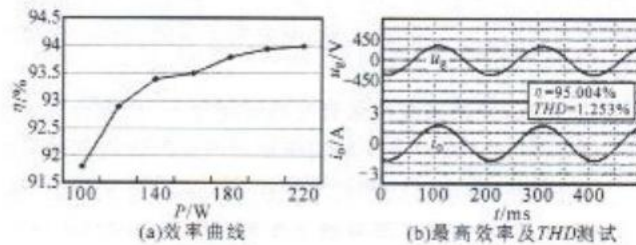


图 6 效率曲线及 THD 测试

5 结论

介绍了某型准单级式交错并联微逆变器设计、分析及控制策略。该微型逆变器具有以下特点：基于高频环节逆变技术，有效实现了初次级电气隔离，解决了不隔离系统漏电流问题；采用有源箝位技术吸收漏感能量，实现了开关管的零电压开关，减小开关损耗；采用变步长的扰动观察法实现最大功率点跟踪，基于输入电压前馈方法解决准单级式微逆母线电压崩溃问题；220W样机整机最大功率跟踪效率为99.5%，满载最高效率达到94%。不考虑辅助电源时，最高效率为95%，并网电流总谐波畸变率小于1.5%。

文章来源：《电力电子技术》2014年第6期

参考文献

- [1] 张兴, 曹仁贤. 太阳能光伏并网发电及其逆变控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [2] Woo-Young Choi, Jason Lai. High-efficiency grid-connected photovoltaic module integrated converter system with high-speed communication interfaces for small-scale distribution power generation[J]. Solar Energy, 2010, 84(4): 636-649
- [3] 陈道炼. DC/AC 逆变技术及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [4] 嵇保健, 王建华, 赵剑锋. 一种高效率 H6 结构不隔离单相光伏并网逆变器[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(18): 9-15
- [5] 古俊银, 吴红飞, 陈国呈, 邢岩. 软开关交错反激光伏并网逆变器[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(36): 40-45
- [6] 王璐. 微型光伏并网逆变器研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [7] D.Lalili, A.Mellit, N.Lourci, et al. Input output feedback linearization control and variable step size MPPT algorithm of a grid-connected photovoltaic inverter[J]. Renewable Energy, 2011, 36(12): 3282-3291.

作者简介: 徐玉丽 (1984-), 女, 本科, 江苏安科瑞电器制造有限公司, 技术工程师, 主要研究方向为智能电力监控与电能管理系统。技术交流: 0510-86179968 传真: 0510-86179975 手机: 18860995108 QQ: 2880157873