

基于反激变换器的光伏并网微逆变器设计

殷明¹, 王一军², 王海龙², 韩华²

(1.黔东南州地方电力总公司, 贵州 凯里 556000; 2.中南大学, 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要:光伏并网微逆变器以其高变换效率、最大化系统发电量和扩展灵活等独特优势而备受青睐, 目前已有的拓扑结构和控制算法很难兼顾高效简单、寿命长等要求。研究表明, 反激式变换器结构简单、输入输出隔离, 广泛应用于中小模块电源。在此对基于反激式变换器的微逆变器系统进行研究, 建立其在电流连续运行模式下的系统模型, 设计双闭环控制方案, 并进行了仿真和实验研究, 结果证明系统模型的正确性和所设计的控制器具有良好的控制性能和可行性。

关键词:逆变器; 反激式变换器; 双闭环

中图分类号: TM464

文献标识码: A

文章编号: 1000-100X(2015)03-0069-03

Design of Grid-connected Photovoltaic Micro-inverter Based on Flyback Converter

YIN Ming¹, WANG Yi-jun², WANG Hai-long², HAN Hua²

(1. Qiongdongnan Local Power Company, Kaili 556000, China)

Abstract: Grid-connected photovoltaic micro-inverter has been greatly valued for its high conversion efficiency, maximize power generation capacity and flexible extensibility and lots of topology and corresponding control scheme which are hard to meet the requirements of simple, effective and long life have been proposed currently. Studies have shown that flyback converter is widely used in small and medium power modules which is featured by simple, electric isolation between input and output and so on. Micro-inverter system based on the flyback converter has been studied and system model is established under continuous current mode and double closed-loop control scheme is designed. Simulation and experiment indicate the correctness of system model and good control performance and feasibility of the controller.

Keywords: inverter; flyback converter; double closed-loop

Foundation Project: Supported by Technology R & D Program of Changsha Science and Technology Bureau (No.K1301-021-11); The Fundamental Research Funds for the Central Universities of Central South University (No.2013zzts228)

1 引言

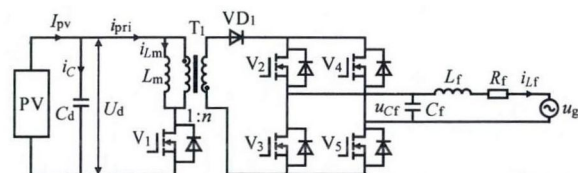
作为光伏逆变器市场的主流产品, 集中式光伏并网逆变器存在可靠性差、集中式最大功率点跟踪(MPPT)无法最大化系统发电量和扩展灵活性差的问题^[1]。微型光伏并网逆变器以其发电效率高、系统扩展灵活、易于集成等突出优势^[2]得到广泛应用, 而国内外分布式电站的井喷式发展更加大了其市场需求量。因此, 微逆变器系统的研究热度持续升温, 学者提出了多种拓扑结构和控制算法^[3-4]。然而, 种类繁多的拓扑却难以满足高变换效率、简单可靠、成本低和寿命长的要求。

反激式变换器以其结构简单、输入输出隔离

和升降压范围宽等优点广泛应用于中小功率变换场合^[5]。在此拟设计一种基于反激式变换器的微逆变器, 建立其系统模型并设计控制方案, 研制了 120 W 并网微逆变器以验证系统分析和算法设计的可行性和有效性。

2 系统模型分析与控制方案设计

在此研究的基于反激式变换器的光伏并网微逆变器系统的结构如图 1 所示。



L_m 为励磁电感; C_d 为直流侧次级纹波解耦电容; U_d 为直流母线电压; u_{Cr} 为换向桥输出电压; C_f, L_f 为滤波电容、电感; R_l 为 L_l 及线路等效电阻。

图 1 单相光伏并网系统结构

Fig. 1 Structure of grid-connected single-phase photovoltaic

基金项目:长沙市科技局计划项目(K1301021-11);中南大学中央高校基本科研业务费专项资金(2013zzts228)

定稿日期: 2014-04-08

作者简介:殷明(1959-),男,重庆长寿人,本科,高级工程师,研究方向为电力系统及其自动化。

相比于电流断续运行模式，反激式变换器工作在电流连续模式下时初级开关管具有更低的峰值电流，更小的磁芯损耗和更高的变换效率。高频变压器 T_1 起储能电感和变压器的双重作用，通过对 V_1 的高频调制，使 T_1 次级输出电流平均值为整流正弦电流， $V_2 \sim V_4$ 组成的工频换向桥将整流正弦电流“逆变”为正弦电流，经 C_f 和 L_f 组成的滤波器输入电网。忽略 R_f 和换向桥开关管导通压降，依据 L_m 伏秒平衡关系，可得稳态占空比为：

$$D = |u_g| / (nU_d + |u_g|) \quad (1)$$

对图 1 所示系统进行交流小信号建模，忽略光伏输出电压和电网电压的扰动，以并网电流 i_U 为系统输出，可得系统模型如下：

$$\begin{bmatrix} \frac{d\hat{i}_{Lm}}{dt} \\ \frac{d\hat{i}_U}{dt} \\ \frac{d\hat{u}_\alpha}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{D}{nL_m} \\ 0 & \frac{R_f}{L_f} & \frac{1}{L_f} \\ \frac{D}{nC_f} & \frac{1}{C_f} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{Lm} \\ \hat{i}_U \\ \hat{u}_\alpha \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_m} (U_d \frac{u_\alpha}{n}) \\ 0 \\ -\frac{i_{Lm}}{nC_f} \end{bmatrix} d \quad (2)$$

$$y = [0 \ 1 \ 0] \begin{bmatrix} \hat{i}_{Lm} \\ \hat{i}_U \\ \hat{u}_\alpha \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

结合式(1)，由上述系统方程可得控制输入 d 到输出电流 i_U 的传递函数如下：

$$G_{U,d}(s) = \frac{u_g D / (n^2 D) - L_m \hat{i}_{Lm} s / D}{L_m L_f C_f s^3 + L_m C_f R_f s^2 + (L_f D^2 / n^2 + L_m) s + D^2 R_f / n^2} \quad (4)$$

式中： $D=1-D_0$ 。

计算表明，为保证光伏组件的利用率不低于 98%，要求直流纹波电压小于最大功率点电压的 8.5%。通常，在直流侧并联较大容量的电解电容可有效减小直流电压纹波。 U_d 的大小与光伏组件的输出功率有关，通过对 U_d 的控制可跟踪光伏组件最大功率点。为此，必须采取合适的控制方法，使 U_d 快速跟踪给定值。系统的并网控制采用双闭环控制，并网电流内环实现逆变控制，直流电压外环完成光伏电池 MPPT，稳定 U_d 。光伏并网微逆变器系统双闭环控制框图如图 2 所示。

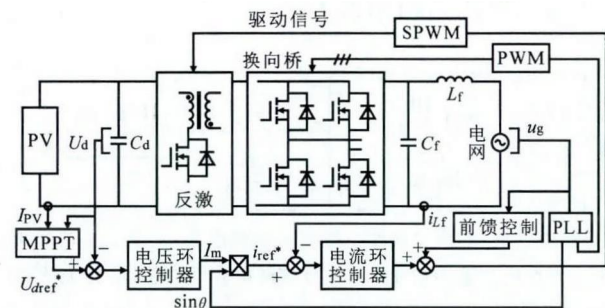


图 2 系统双闭环控制框图

Fig. 2 Block diagram of double closed-loop control system

由于实际中逆变器的开关频率远大于电网频率，所以忽略开关频率对系统的影响后，调制器近似为一个增益环节 K_{PWM} 。根据图 2，设电流控制器的传递函数为 $G_i(s)$ ，电压前馈控制器传递函数为 $G_n(s)$ ，则可得电流内环控制系统结构框图，如图 3 所示。其中 i_{ref} 为电流参考值， u_g 为电网电压的扰动输入。

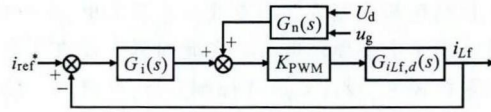


图 3 电流内环控制系统结构框图

Fig. 3 Structural diagram of current inner loop control system

系统的电压外环保证 U_d 快速准确跟踪给定值，整个电压外环控制系统结构框图如图 4 所示。其中， I_{pv} 为光伏电池阵列的输出电流， i_c 为电容 C_d 的电流， i_{pri} 为反激变换器的输入电流， $\Phi(s)'$ 为整个电流内环控制系统的等效模型，由于电流内环的跟踪速度远快于电压外环，因此 $\Phi(s)' \approx 1$ ， U_{gm} 为电网电压峰值， $G_v(s)$ 为电压控制器的传递函数。

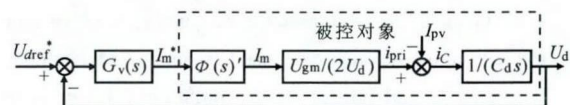


图 4 电压外环控制系统结构框图

Fig. 4 Structural diagram of voltage outer loop control system

图 5 为所研究的微型逆变器系统补偿前和补偿后电流内环开环波特图，PI 校正器参数为： $K_p=7.61 \times 10^{-3}$ ， $K_i=579.09$ 。可见，补偿前，闭环系统不稳定；补偿后，闭环系统稳定，幅值裕度 13.5 dB，相角裕度 34° ，系统带宽约 1 kHz。电压外环 PI 校正器参数为： $K_p'=0.42$ ， $K_i'=117.5$ 。

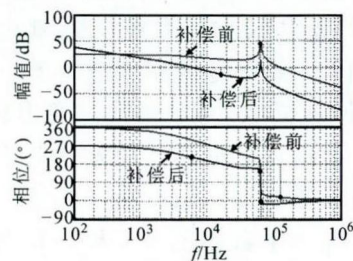


图 5 系统波特图

Fig. 5 The Bode diagram of system

3 系统仿真与实验结果分析

3.1 仿真研究

为验证所设计微逆变器双闭环控制方法的有效性，在 Matlab/Simulink 平台上，搭建整个单相光伏微逆变器系统的仿真模型。系统参数设置为：

$C_d=7\ 200\ \mu\text{F}$, $L_m=55\ \mu\text{H}$, $n=6.4$, $C_f=0.33\ \mu\text{F}$, $K_{\text{pwm}}=1$, $L_f=540\ \mu\text{H}$, $R_f=40\ \text{m}\Omega$, 反激开关管的开关频率 $f_s=57\ \text{kHz}$, $U_{\text{gm}}=311\ \text{V}$ 。光伏组件的仿真模型参数: $U_{\text{oc}}=44\ \text{V}$, 最大功率点电压 $U_{\text{mpp}}=36\ \text{V}$, $I_{\text{sc}}=5.1\ \text{A}$, $I_{\text{mpp}}=4.16\ \text{A}$ 。

双闭环控制器参数采用上节设计值, 即电流内环 PI 控制器参数为: $K_p=7.61\times 10^{-3}$, $K_i=579.09$, 电压外环 PI 控制器参数为 $K_p'=0.42$, $K_i'=117.5$ 。图 6 为并网微逆变器系统仿真结果。仿真时间 $t=0.5\ \text{s}$ 时, 突然将光伏电池光照强度从 $600\ \text{W}/\text{m}^2$ 增加到 $800\ \text{W}/\text{m}^2$, 可见, 光伏组件输出电压有一定超调, 电压外环快速将光伏组件输出电压重新稳定在最大功率点电压, 电流内环能够快速跟踪电压外环的给定。

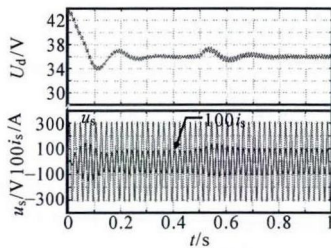


图 6 仿真结果
Fig. 6 Simulation results

3.2 实验研究

上述仿真研究验证了控制系统设计的有效性, 在此基础上, 设计了以 TMS32 为控制核心的 120 W 光伏并网微逆变器, 实验参数与仿真设置相同, 并进行了实验研究。实验使用的光伏电池阵列在标准测试条件(光伏电池温度 $25\ ^\circ\text{C}$, 光照强度 $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$)下的额定输出功率为 180 W, 开路电压 45 V, 短路电流 6.2 A, 最大功率点电压 36 V, 但是在实际天气条件下, 光伏电池阵列的输出功率只能达到 125 W。稳态下, 直流电压、电网电压和并网电流波形如图 7a 所示。可见, U_d 稳态时基本稳定在 36 V, 电压纹波峰峰值 2.8 V, 对应的 i_s 也稳定跟踪了 u_s 。实验过程中, 当光照强度突然增强, 在双闭环控制作用下, i_s 变化过程如图 7b 所示。可见, 并网电流经 0.1 s 就逐渐趋于稳定, 与仿真基本一致, 即控制系统经过较短的调整时间就能稳定并网运行, 说明系统具有较强的跟踪抗扰能力。图 7c 为反激变换器初级开关管电流。可见, 反激变换器工作在电流连续导通模式下, 寄生参数的影响使开通瞬间产生高频谐振, 但很快衰减。

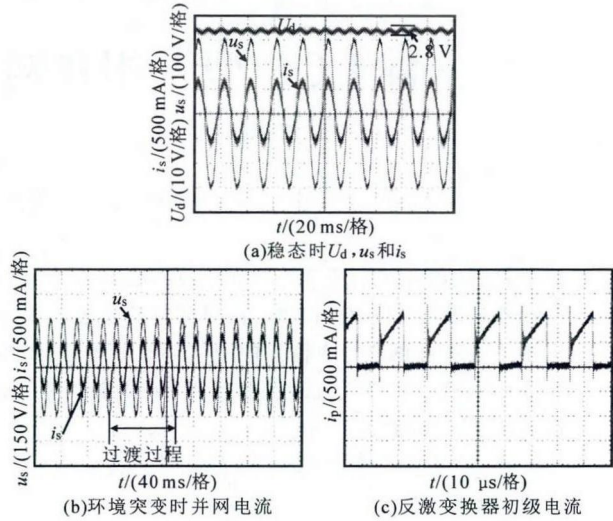


图 7 实验波形
Fig. 7 Experimental waveforms

4 结论

微逆变器和单块光伏组件集成, 具有发电效率高、系统扩展灵活等独特优势, 特别适合城市、民用建筑等领域。在电流连续运行模式下对基于反激式变换器的微逆变器进行了系统模型和控制方案设计, 并进行了相应的系统仿真和原型机研制。实验结果表明所研制的 120 W 微逆变器具有良好的控制性能, 证明了所建立的系统模型和双闭环控制方案的可行性和有效性。

参考文献

- [1] G Cramer, M Ibrahim, W Kleinkauf. PV System Technologies: State-of-the-Art and Trends in Decentralised Electrification[J]. 2004, 13(2): 38-42.
- [2] Yanlin Li, Oruganti R. A Low Cost Flyback CCM Inverter for AC Module Application[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2012, 27(3): 1293-1303.
- [3] Kjaer S B, Pedersen J K, Blaabjerg F. A Review of Single-phase Grid-connected Inverters for Photovoltaic Modules[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2005, 41(5): 1292-1306.
- [4] Quan Li, Wolfs P. A Review of the Single Phase Photovoltaic Module Integrated Converter Topologies With Three Different DC Link Configurations[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2008, 23(3): 1320-1333.
- [5] 莫琼. 有源箝位反激式光伏并网逆变器的研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2012.
- [6] 徐德鸿. 电力电子系统建模及控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.