

基于单周控制的光伏双频并网逆变器研究

万江¹, 陈铁¹, 郭真红¹, 庾元科², 吴真¹, 郑继红¹, 徐波¹, 曾寅川¹

(1. 重庆电力公司超高压局, 重庆 400039; 2. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044)

摘要: 提出一种用于光伏发电的双频并网逆变器, 该拓扑结构由两个半桥单元级联而成。其中一个半桥工作在高频, 提高输出电流性能, 另一个半桥工作在低频, 主要输出功率, 从而提高系统效率。高频桥采用单周控制技术, 建立了单周控制方程。仿真结果表明逆变器输出电流总的谐波畸变率低, 有较好的动态性能。

关键词: 双频并网逆变器; 高效率; 光伏发电; 单周控制

Research on photovoltaic dual frequency grid-connected inverter based on one-cycle control

WAN Jiang¹, CHEN Tie¹, GUO Zhen-hong¹, TUO Yuan-ke², WU Zhen¹, ZHENG Ji-hong¹, XU Bo¹, ZENG Yin-chuan¹

(1. Chongqing Ultra-High-Voltage Bureau, Chongqing 400039, China;

2. College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: A novel grid-connected dual frequency inverter for photovoltaic generation is proposed. The inverter consists of two cascaded standard half bridges, one of the half bridges works in high frequency to improve the performance of output current and the other one works in low frequency to handle power thereby the switching losses can be reduced and the system efficiency can be improved. For the high frequency half bridge, the one-cycle control is adopted. The simulation results illustrate that the inverter is controlled to generate the output current in phase with the grid voltage with low harmonic distortion and better dynamic performance.

Key words: dual frequency grid-connected inverter; high efficiency; photovoltaic generation; one-cycle control

中图分类号: TM61 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)01-0010-04

0 引言

随着社会生产的日益发展, 对能源的需求量不断增长, 全球范围内的能源危机也日益突出, 在近些年来, 可再生能源引起了世界各国政府和能源专家的高度重视^[1]。目前, 全世界很多国家都采取了风力发电, 光伏发电等分布式发电系统并网运行的措施。光伏发电需要利用逆变器把直流转换成交流再并入电网, 并网逆变器是连接发电系统与电网的接口单元, 也是研究热点之一。其中研究新型拓扑与控制方法, 使输出电能质量高而同时又提高效率便成为了研究重点^[1~6]。

文献[7, 8]所研究的传统的并网逆变器主拓扑采用全桥逆变器, 采用PWM控制技术使输出电流波形接近正弦, 但该逆变器的开关都工作在高频, 开关损耗大。为了减少开关损耗文献[9]采用软开关技术, 使逆变器工作在软开关状态, 却使得逆变电路复杂化。文献[10]采用多电平逆变技术改善输出电压质量, 减少了开关损耗, 但这又增加了电路结构

和控制方式的复杂性, 同时由于主电路开关元件数量成倍的增长, 不仅增加了系统成本, 而且降低了系统的可靠性。本文提出了一种新型的单相双频并网逆变器拓扑结构。该逆变器由两个半桥组成, 其中一个半桥工作在低频状态, 主要输出功率。另一个半桥工作在高频状态, 决定输出电流波形质量^[11]。使逆变器在保证输出电流波形质量的同时提高逆变器效率。逆变器输出电流能实时跟踪电网电压频率、相位和给定容量的变化, 且电流总谐波畸变率小, 能以单位功率因数向电网输电。

1 并网系统模型与控制

传统单相并网逆变器由标准的全桥逆变器组成, 电路中的四个开关器件工作在高频、大电流状态下, 如果对输出电流性能要求提高, 开关频率就相应提高, 开关损耗也增大。文中提出双频单相并网逆变器, 如图1所示, 它是在传统的半桥逆变器上附加上了一个由电感 L_a , 开关 S_3 和 S_4 构成的半桥, 该半桥工作在低频, 流过电路处理的大部分电

流, 原半桥工作在高频, 仅处理电流波动的部分功率。分析时, 流过低频半桥的电流跟踪高频半桥电流。这样流过高频开关 S_1 和 S_2 的电流大大减小, 虽然流过开关 S_3 ~ S_4 的电流很大, 但是它们运行在低频, 从而在输出同等电流质量的同时提高了效率, 增大输出功率等级。从仿真结果可以看出输出电流能与电网电压同频同相, 而且总的谐波畸变率很小。

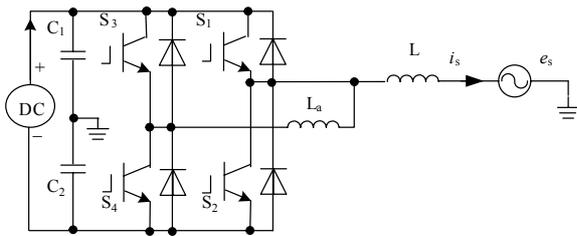


图1 双频并网逆变器

Fig.1 The grid-connected dual frequency inverter

对两个半桥, 高频电感电流和低频电感电流可同时可控, 低频部分采用近似恒频滞环控制, 控制低频电感电流跟踪高频电感电流。高频部分采用单周控制^[12], 控制电感电流与电网电压同频同相。下面将推导高频部分的控制方程, 为了简化分析, 这里假定:

在开关周期内, 直流侧输入电压恒定;

每个桥臂中的开关互补导通, 假定下开关管 S_2 占空比分别对应为 D , 上开关管 S_1 占空比分别对应为 $1 \sim D$;

高频开关频率远大于电网频率;

假定高频开关为 f_s , 开关周期 $T_s = 1/f_s$ 。

在 $0 < t < DT_s$ 期间, 开关 S_1 导通, S_2 关断, 电感 L 上电压

$$V_L = V_{c1} + e_s \quad (1)$$

在 $DT_s < t < T_s$ 期间, 开关 S_2 导通, S_1 关断 电感 L 上电压

$$V_L = e_s + V_{c2} \quad (2)$$

稳态时在一个开关周期内电感满足伏秒平衡原理, 得到:

$$D(V_{c1} - e_s) + (1 - D)(-e_s - V_{c2}) = 0 \quad (3)$$

$$V_{dc} = V_{c1} + V_{c2} \quad (4)$$

两个电容大小相等有 $V_{c2} = V_{c1}$

由式 (3) 和式 (4) 可得:

$$e_s = (D - \frac{1}{2})V_{dc} \quad (5)$$

输出电流与电网电压同频同相, 可以得到如下方程:

$$i_s = (K_1 - K_2)e_s \quad (6)$$

其中: K_1 是限制最大输出电流的常数, K_2 是用来控制输出功率大小的参数。

假设 R_s 为电流采样比, 取:

$$V_m = R_s K_2 V_{dc} \quad (7)$$

由 (5)、(6)、(7) 式可以得出:

$$R_s i_s = R_s K_1 e_s - D V_m + \frac{1}{2} V_m \quad (8)$$

在一个开关周期 T_s 中, 可认为 i_s 、 R_s 、 V_m 和 K_1 的值近似不变, 对式 (8) 两端进行积分, 积分时间常数为开关周期 T_s , 可得其控制方程为

$$R_s i_s = R_s K_1 e_s - \frac{1}{T_s} \int_0^t V_m dt + \frac{1}{2} V_m \quad (9)$$

式 (9) 为高频部分的控制方程。基于单周控制的控制电路如图 2 所示。控制高频电感电流与电网电压同频同相, 从而实现以单位功率因数向电网输电。

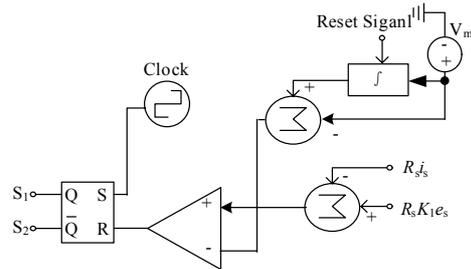


图2 高频桥控制电路

Fig.2 Control circuit of the high frequency bridge

低频部分采用近似恒频滞环控制, 使得低频电感电流跟踪高频电感电流, 其控制电路如图 3 所示, $H(t)$ 为滞环环宽。

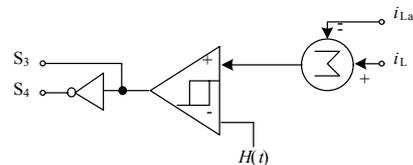


图3 低频桥控制电路

Fig.3 Control circuit of the low frequency bridge

2 仿真试验

为了验证电路的可行性及其性能, 并用 MATLAB7.0 的 Simulink 软件包分别对双频并网逆变器与单个高频并网逆变器进行仿真分析。仿真参数如下: 输入直流电压 $V_{dc} = 700$ V, 电网电压有效值 $E_s = 220$ V, 低频部分电感 $L_{aa} = L_{ba} = L_{ca} = 0.8$ mH, 高频部分电感 $L_a = L_b = L_c = 1$ mH, 电网电压频率 $f_s = 50$

Hz。高频桥开关频率为 10 kHz，低频桥开关频率约 2 kHz。并网逆变器输出电流很好地跟踪了电网电压，如图 4 和图 5 所示，双频并网逆变器的输出电流性能输出电流谐波总畸变率比较低，输出电压波形性能好，几乎与单个高频并网逆变器性能相同。从图 6 和图 7 可以看出，双频并网逆变器的低频桥输出电流 i_{La} 很好地跟踪了高频桥的输出电流 i_L ，从而使高频桥处理的电流大大减小。如图 7 所示，流过高频开关的电流小，流过低频开关的电流相对较大，并保持输出电流不变，则系统整体的开关损耗就会降低，从而在保证系统性能的前提下提高了系统的效率。

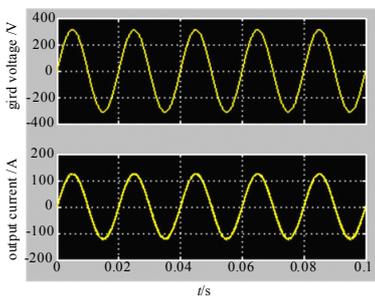


图 4 标准全桥并网逆变器的仿真结果

Fig.4 Simulation results with standard full-bridge inverter (10 kHz)

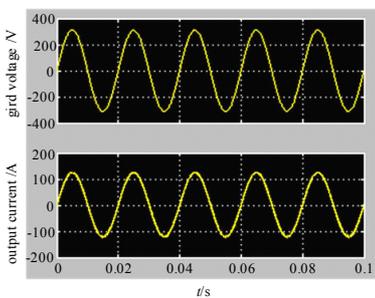


图 5 双频并网逆变器的仿真结果 (10 kHz, 2 kHz)

Fig.5 Simulation results with the dual frequency grid-connected inverter (10 kHz, 2 kHz)

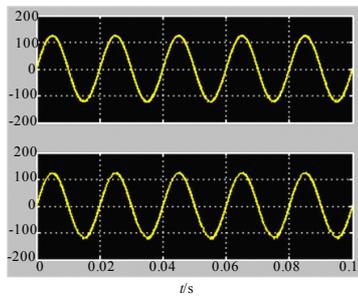


图 6 双频并网逆变器的电感电流

Fig.6 Inductor current in the dual frequency grid-connected inverter

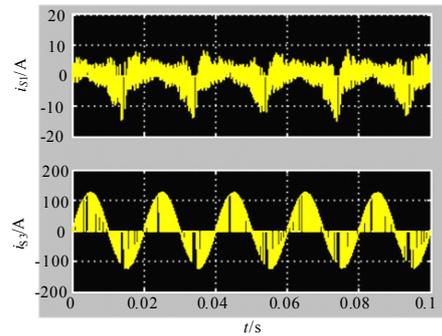


图 7 双频并网逆变器开关 S_1 和 S_3 的电流

Fig.7 Switching current of S_1 and S_3 in the dual frequency grid-connected inverter

从图 8 和图 9 可以看出，双频并网逆变器系统提高了效率，而输出的电流质量与传统的高频并网逆变器相当。

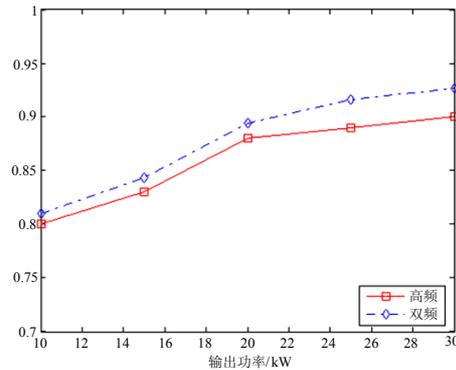


图 8 效率对比曲线

Fig.8 Efficiency comparison

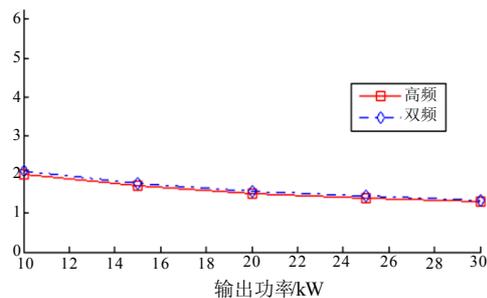


图 9 输出电流总的谐波畸变率对比曲线

Fig.9 Output current THD comparison

3 结论

本文论述了用于光伏发电的单相双频并网逆变器的结构原理。理论分析与仿真结果表明，本文提出的单相双频并网逆变器，输出电流性能与高频下的标准全桥并网逆变器输出电流性能相当，总的谐波畸变率小，能快速跟踪电网电压，实现以单位功率因数向电网输电。这种新型并网逆变器的拓扑结

构和控制方法简单,有一定的工程应用价值。

参考文献

- [1] XUE Yao-suo, CHANG Liu-chen, Kjaer S B, et al. Topologies of Single-phase Inverters for Small Distributed Power Generators: an Overview[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2004, 19 (5): 1305-1314.
- [2] Prasad B S, Jain S, Agarwa V. Universal Single-stage Grid-connected Inverter[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2008, 23 (1): 128-137.
- [3] Joung-Hu P, Jun-Youn A, Bo-Hyung C, et al. Dual-module-based Maximum Power Point Tracking Control of Photovoltaic Systems[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2006, 53 (4): 1036-1047.
- [4] Prodanovic M, Green T C. Control and Filter Design of Three-phase Inverters for High Power Quality Grid Connection[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2003, 18 (1): 373-380.
- [5] 董密, 罗安. 光伏并网发电系统中逆变器的设计与控制方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (20): 97-102. DONG Mi, LUO An. Design and Control Strategies of Inverters for a Grid-connected Photovoltaic Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (20): 97-102.
- [6] 张强, 张崇巍, 张兴, 等. 风力发电用大功率并网逆变器研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(16): 54-59. ZHANG Qiang, ZHANG Chong-wei, ZHANG Xing, et al. Study on Grid-connected Inverter used in High-power Wind Generation System[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27 (16): 54-59(in Chinese).
- [7] 黄文俊, 余晓建, 沈永林. 单相并网逆变器的 Deadbeat 控制[J]. 电力电子技术, 2007, 41 (2): 10-12. HUANG Wen-jun, YU Xiao-jian, SHEN Yong-lin. Deadbeat Control for Single Phase Grid-Connected Inverter[J]. Power Electronics, 2007, 41 (2): 10-12(in Chinese).
- [8] 吴春华, 陈国呈, 丁海洋, 等. 一种新型光伏并网逆变器控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (33): 103-107. WU Chun-hua, CHEN Guo-cheng, DING Hai-yang, et al. A Novel Control Strategy for Photovoltaic Grid-connected Inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27 (33): 103-107(in Chinese).
- [9] Chao K H, Liaw C M. Three-phase Soft-switching Inverter for Induction Motor[J]. IEE Proceedings Electric Power Applications, 2001, 148 (1): 8-12.
- [10] Alepuz S, Busquets-Monge S, Bordonau J, et al. Interfacing Renewable Energy Sources to the Utility Grid Using a Three-level Inverter[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2006, 53 (5): 1504-1511.
- [11] 周维维, 杜雄, 付志红, 等. 双频 Buck 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (6): 68-72. ZHOU Luo-wei, DU Xiong, FU Zhi-hong, et al. The Buck Converter with Double Frequency[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (6): 68-72(in Chinese).
- [12] QIAO Chong-ming, Smedley K M. Unified Constant-Frequency Integration Control of Three-Phase Standard Bridge Boost Rectifiers With Power-Factor Correction[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2003, 50 (1): 100-107.

收稿日期: 2009-01-09; 修回日期: 2009-04-09

作者简介:

万江(1983-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子及其在电力系统中的应用; E-mail: wanjiang830501@163.com

陈铁(1974-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统及其自动化;

郭真红(1975-), 男, 硕士研究生, 主要从事 500 kV 超高压输变电设备运行管理, 主要研究方向为电力电子与电力传动。

许继中标“辽宁 220 kV 马山变智能化技术研究与应用”项目

12月19日,从电网销售总公司传来喜讯,通过与技术中心的通力合作、共同努力,许继一举中标了“辽宁 220 kV 马山变智能化技术研究与应用”项目,中标设备包括智能化的保护监控设备、过程层网络设备及电子式互感器等一次设备,是一个完全意义上的 220 kV 智能化变电站。

该项目的成功运作是“智慧销售”的结果,是市场人员与技术人员通力合作的结果,为集团公司智能化变电站项目运作树立了成功的典范。