

基于复合控制算法的三相光伏并网逆变系统的研究

李练兵, 赵治国, 赵昭, 王华君

(河北工业大学电气与自动化学院, 天津 300130)

摘要: 分析了三相光伏逆变器的工作原理, 给出了一种升压型光伏逆变系统的拓扑结构。提出了一种基于矢量变换解耦控制, 重复控制与电压前馈相结合的复合控制策略。矢量变换 PI 控制部分用于保证系统的动态性能和稳定性; 重复控制在系统稳定后加入可以抑制网侧的周期性扰动, 提高系统的稳态性能获得高质量的并网电流波形; 电压前馈控制能够对电网电压和直流母线电压的扰动快速动作, 缩短系统的动态过程, 有效减小并网过程对电网的冲击。在此基础上搭建了一台 3kW 的三相光伏逆变器实验样机, 通过实验验证了本方案的可行性, 系统具有良好的动态和稳态性能。实验得到的三相电流总畸变率均在 4% 以下, 满足并入电网的国家标准。

关键词: 三相光伏并网; 复合控制; PI 控制; 重复控制; 前馈控制

Study on three-phase photovoltaic grid-connected inverter system based on compositive control

LI Lian-bing, ZHAO Zhi-guo, ZHAO Zhao, WANG Hua-jun

(School of Electrical and Automation, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: The principle of three-phase photovoltaic (PV) grid-connected system is analyzed, and a boost type topological structure of the system is given. A kind of compositive control strategy based on vector transformation decoupling control, repetitive control and feed-forward control of utility grid voltage is proposed. PI current control can improve the dynamic quality of the system and ensure the stability of the system. Repetitive control is able to restrain the periodic disturbance of the grid. Also it can ensure steady-state performance and reduce the total harmonic distortion of the grid-connected current. Feed-forward control of utility grid voltage can counteract the influence of utility grid and DC bus. In addition, it can shorten the dynamic process and reduce the impact to utility power during the initial process of grid. According to the proposed control algorithms, a three-phase photovoltaic grid-connected inverter is developed. Experimental result shows that the proposed control strategy is validated and has good dynamic and steady-state performance. A good quality output power is achieved which is compliant with the national standards.

Key words: grid-connected system; compound control; PI control; repetitive control; feed-forward control

中图分类号: TM464 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)21-0044-04

0 引言

并网逆变器是光伏发电系统的核心环节, 其控制系统的设计直接影响到整个光伏系统的性能^[1]。并网逆变器的关键性能指标包括功率因数、各次电流谐波含量、谐波总畸变率和效率等参数, 另外要求有较好的稳定性和可靠性。在 GB/T 19939-2005 光伏系统并网技术标准中, 要求光伏系统的输出应该有较低的畸变, 总谐波电流应小于逆变器额定输出的 5%, 同时逆变器向电网馈送的直流分量不应超出其交流额定值的 1%^[2]。本文给出了一种集升压逆变于一体, 带工频升压变压器的电路拓扑结构。提

出了一种基于旋转坐标变换的 PI 控制, 电压前馈补偿和重复控制相结合的复合控制方案。该方案既能向电网输送功率因数接近 1 的有功电流, 又能向电网发送无功, 对电网进行无功补偿^[3]。设计了一套基于 DSP2407 控制的实验样机, 得到了符合国家标准的并网电流。

1 三相光伏并网逆变系统拓扑结构

图 1 中功率开关器件采用 7 单元的智能功率模块 (IPM), K7 用于直流斩波升压电路, K1-K6 构成三相逆变桥。L 为升压电感, L1 为滤波电感, C 为储能电容, D 为二极管, T 为变压器^[4]。

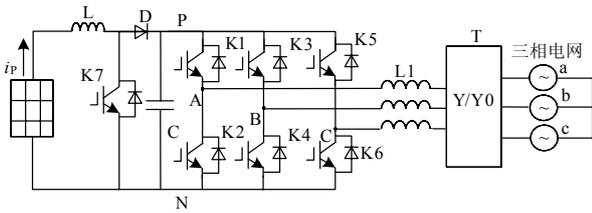


图1 带有变压器的光伏逆变系统拓扑结构图

Fig.1 Topological structure of the PV grid-connected system

太阳能电池板在一定的光照和温度下输出功率存在一个最大值，通过调节输出电流可以控制输出电压幅值的大小，电压幅值在某一个值上光伏电池组的输出功率达最大，即最大功率点^[5]。图1拓扑结构各部分的功能：由L, K7, D组成的boost升压回路可以实现对光伏电池组输出电压的调节，同时保证加在逆变桥P-N间储能电容上的电压保持稳定和逆变所需要的电压等级。K1-K6构成三相逆变桥，正弦调制波和三角载波比较生成逆变桥臂功率管的驱动信号，控制开关管的通断，在逆变桥ABC间输出三相PWM波，经电感L1滤除高频分量，再经变压器与电网连接。变压器的主要作用是实现逆变系统和电网的隔离保证系统的安全性，同时能够隔离直流分量，实现不同电压等级的匹配。

2 三相光伏并网逆变控制系统

图2中的控制系统主要有三部分：电流PI调节器，电压前馈环节，重复控制单元。

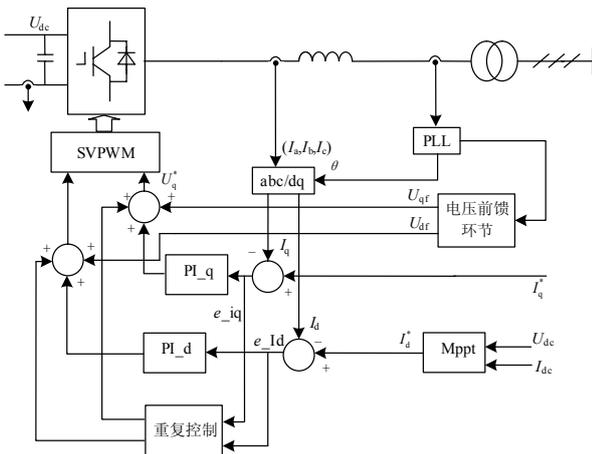


图2 三相光伏逆变系统的控制结构图

Fig.2 Control diagram of the three phase PV grid-connected system

为了实现三相电流的解耦，通过dq坐标变换将三相静止ABC坐标系下的电流 I_a, I_b, I_c 变换到两相同步旋转dq坐标系下。A-B-C与同步旋转d-q坐标系间的关系如图3。

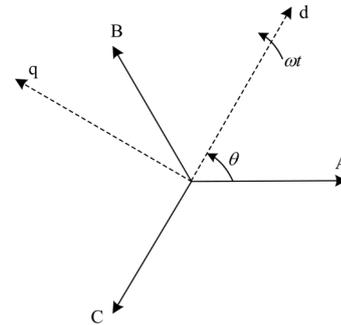


图3 三相静止坐标与两相旋转坐标关系图

Fig.3 The A-B-C stationary and the d-q synchronous rotational coordinates

控制要实现输出电流对电网电压的跟踪，这就要求对电网电压进行锁相。由于DSP2407芯片的处理能力有限，本文采用了一种较为简单的锁相方法：通过硬件电路捕捉线电压 U_{ab}, U_{bc} 的过零点，由两个过零点的前后关系确定电网电压的旋转方向，在 U_a 相电压达到峰值时进行定向，在此后的一个周期内，d轴和A轴之间的夹角 θ 以电网角速度 ω 递增。该方法避免了除法运算和求反正切的运算，节约了处理器资源，实验结果验证了该方法的可行性。

2.1 电流PI调节部分的设计

经过 $3s/2r$ 的变换三相交流分量变成了两相直流分量，便于PI调节器的设计和控制。锁相环将电压空间合成矢量定向在d轴上，磁链合成矢量定向在q轴上。这样就实现了功率的解耦，从而实现有功和无功的独立调节，d轴为有功分量，q轴为无功分量。控制的目的在于实现采样电流 I_d, I_q 对指令电流 I_d^*, I_q^* 的跟踪，使电流稳态误差接近于0。图4为d轴的控制框图。

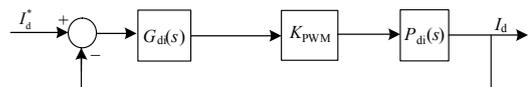


图4 d轴PI调节器控制框图

Fig.4 Diagram of d-axis PI current control loop

$$\text{其中: } G_{di}(s) = \frac{K_p S + K_i}{S} \quad (1)$$

$$P_{di}(s) = \frac{1}{LS + R} \quad (2)$$

由于开关频率远高于电网频率，简化分析忽略开关动作对系统的影响，将 K_{pwm} 环节等效为一个比例环节 $K^{[6]}$ 。

则系统的开环传递函数为：

$$G_d(s) = G_{di}(s) \cdot K \cdot P_{di}(s) \quad (3)$$

仿真的各参数选取如下： $L=4.5 \text{ mH}, R=0.2 \ \Omega$ ，

$K=0.77$, $K_{pd}=0.05$, $K_{id}=10$ 。图 5 为 d 轴开环传递函数伯德图。由图可见在剪切频率处相角裕度为 60° ，幅值裕度也足够大。在调试过程中比例积分系数可调节的范围很大，从而说明控制系统有很好的稳定性。q 轴的 PI 调节器设计和 d 轴基本相同，只要把指令值改为 I_q^* 即可，在试验调节过程中没有对 q 轴电流进行单独调节，参数和 d 轴相同。在逆变器全功率向电网发电时，设置 I_q^* 为零。

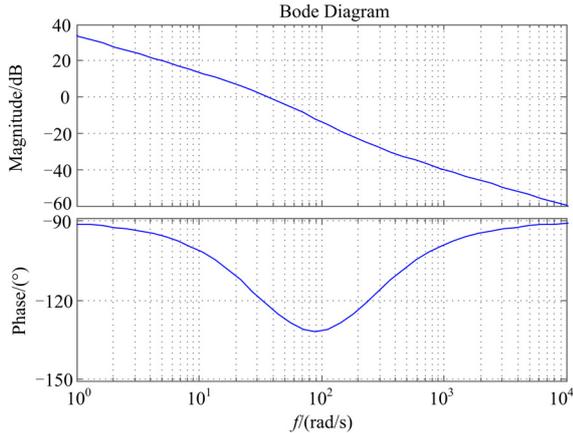


图5 d轴开环传递函数伯德图

Fig.5 Bode plots of d-axis open-loop transfer function

2.2 重复控制部分的设计

由于死区、驱动电路的不对称，以及电网电压周期性扰动等非线性因素的影响，采用单独的 PI 调节器很难满足并网电流总畸变率 (TDH) 的要求。为了减小周期性扰动的影响，本文引入了重复控制。实验表明加入重复控制后 TDH 降低了 1~3 个百分点。

基于内模原理的重复控制能够有效地消除并网电流的指令误差和扰动误差，提供高质量的稳态波形。内模原理指出，若要一个控制系统具有良好的跟踪指令和消除扰动误差的能力，则在反馈控制系统中必须包括一个描述外部输入信号动力学特性的模型，这个模型就是内模^[6-7]。图 6 为重复控制的结构框图，重复控制单元主要由两部分构成：重复信号发生器，辅助补偿器。重复信号发生器产生周期性参考信号，其中 $Q(z)$ 为一节低通滤波器一般取为小于 1 的常数，辅助补偿器是为了提供相位补偿和幅值补偿，增加系统的稳定裕度。一般取

$$C(z) = K_r Z^k S(z) \quad (4)$$

式 (4) 中： K_r 为控制增益，取小于 1 的常数； Z^k 为补偿逆变器本身及 $S(z)$ 引起的相位滞后； $S(z)$ 设计为二阶滤波器，用于衰减高频段，减小谐振峰值^[8-9]。

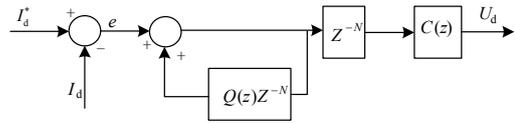


图 6 重复控制结构图

Fig.6 Block diagram of repeat control

2.3 电压前馈部分的设计

实验测得电网电压不是标准的正弦波，同时在不同的用电场合周围电网的畸变情况也不尽相同，为抑制电网的瞬时扰动，本文在控制系统中引入了电压前馈环节。电压前馈环节利用实时采样的电压信号经一定的相位补偿后比上直流母线电压再乘以增益值，然后作用于输出，使输出近似抵消电网电压。这样光伏系统就近似于一个无源跟踪系统^[10]，PI 调节器只需调节电流指令部分，而不用再去补偿电网电压的变化。电压前馈环节能够改善并网动态过程，减小并网过程并网电流对电网的冲击作用，对直流母线电压和电网电压的扰动都能快速动作^[11]。

3 实验与结果

基于上述的拓扑结构和控制策略，搭建了一台基于 DSP2407A 的三相光伏逆变器。逆变器功率模块采用 7 单元的 IPM，其中一单元用于升压，另外六单元用于三相逆变桥。

实验参数选择如下：升压电感 2 mH/15 A；滤波电感 4.5 mH/10 A；变压器 Y-Y0 220/380。

控制参数如下：PI 调节器环节 $K_{pd}=K_{pq}=0.05$ ； $K_{id}=K_{iq}=10$ 。重复控制环节 $Q(z)=0.9$ ， $K_r=0.5$ ， $k=4$ 。得到的其中一相输出电流波形如图 7。

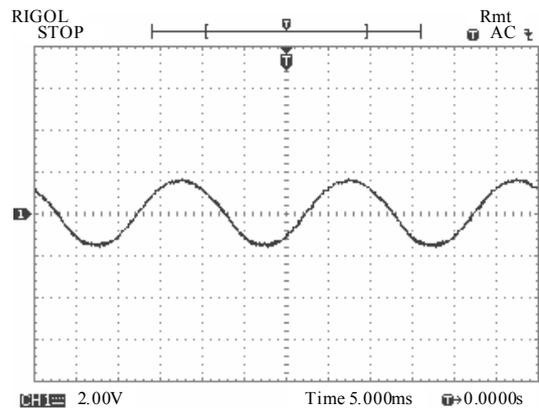


图 7 实验 A 相电流波形

Fig.7 Experimental wave of current I_a

在输出功率为 2.5 kW 时测得三相电流的 TDH 如表 1。

表 1 实验测得的三相电流 *TDH* 值Tab.1 Experimental results of current's *TDH*

电流 <i>TDH</i> /%	A	B	C
变压器低压侧	3.2	3.4	3.3
变压器高压侧	3.6	3.8	3.8

在只有 PI 调节器时各相电流的总畸变率在 4% 到 5% 之间, 加入重复控制后在 3.5% 左右。实验表明在输出功率增大的情况下电流总畸变率有下降的趋势, 在 3.5 kW 时 A 相变压器低压侧的 *TDH* 降至 2.5% 左右。这是因为在电流增大后, 死区、变压器励磁电流等因素引起的谐波电流占总电流比例下降。上述实验结果表明电流能满足并网要求。

4 总结

本文提出了一种基于矢量变换电流 PI 控制、电压前馈控制、重复控制相结合的复合控制策略。PI 调节器保证了系统的动态性能, 重复控制单元保证了系统的稳态性能, 电压前馈能够对电网扰动快速动作。将变压器的星形连接的零点接至电网零线 N, 可以适应电网三相负载不平衡的情况。本文设计了一台额定功率 3 kW 的试验样机, 得到了符合国标的并网电流波形。样机可向电网发送功率因数为 1 的有功功率, 也可根据需向电网发送无功功率实现无功补偿。

参考文献

- [1] 芮骥骅, 杜少武, 等. 三相光伏并网逆变器 SVPWM 电流控制技术[J]. 电力电子技术, 2010, 44 (4): 8-9, 18.
RUI Qi-hua, DU Shao-wu, et al. Current regulation for three-phased grid-connected inverter based on SVPWM control[J]. Power Electronics, 2010, 44 (4): 8-9, 18.
- [2] GB/T 19939-2005 光伏系统并网技术要求[S]. 2006.
GB/T 19939-2005 technical requirements for grid connection of PV system[S]. 2006.
- [3] Hamrouni N, Jraidi M, Cherif A. New control strategy for 2-stage grid-connected photovoltaic power system[J]. Renewable Energy, 2008 (33): 2212-2221.
- [4] 朱炜锋, 窦伟, 等. 基于 PI 控制的三相光伏并网逆变器电流控制器设计[J]. 可再生能源, 2009, 27(2): 59-62.
ZHU Wei-feng, DOU Wei, et al. Design of the PI current controller of three phase photovoltaic grid-connected inverter[J]. Renewable Energy Resources, 2009, 27(2): 59-62.
- [5] 周德佳, 赵争鸣, 袁立强, 等. 具有改进最大功率跟踪算法的光伏并网控制系统及其实现[J]. 中国电机工程学报, 2008, 31 (28): 94-100.
ZHOU De-jia, ZHAO Zheng-ming, YUAN Li-qiang, et al. Implementation of a photovoltaic grid-connected system based on improved maximum power point tracking[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 31 (28): 94-100.
- [6] 熊健, 史鹏飞, 张凯, 等. 基于积分环节电压微分反馈的逆变器重复控制策略[J]. 电工技术学报, 2007, 22 (1): 85-90.
XIONG Jian, SHI Peng-fei, ZHANG Kai, et al. Voltage-differential-feedback with integral control plus repetitive control for PWM inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22 (1): 85-90.
- [7] 吴杰, 苏建徽, 等. 基于重复控制算法的光伏并网逆变器的研究[J]. 电子设计应用, 2005 (2): 96-97, 99.
WU Jie, SU Jian-hui, et al. Repeat control algorithm based on the study of photovoltaic (PV) grid-inverter[J]. Electronic Design & Application World-Nikkei Electronics China, 2005 (2): 96-97, 99.
- [8] 张树全, 戴珂, 等. 单相并联型有源电力滤波器电流复合控制[J]. 电力电子技术, 2010, 44 (3): 26-28.
ZHANG Shu-quan, DAI Ke, et al. Current compound control strategy for single-phase shunt active power filter[J]. Power Electronics, 2010, 44 (3): 26-28.
- [9] 马兆彪, 惠晶, 潘建. 基于重复 PI 控制的光伏并网逆变器的研究[J]. 电力电子技术, 2008, 42 (3): 28-30.
MA Zhao-biao, HUI Jing, PAN Jian. Study on photovoltaic grid-connected inverter based on repetitive-PI control[J]. Power Electronics, 2008, 42(3): 28-30.
- [10] Green T C, Prodanovi'c M. Control of inverter-based micro-grids[J]. Electric Power Systems Research, 2007 (77): 1204-1213.
- [11] 郑诗程, 丁明, 等. 基于重复控制和电压前馈控制的光伏并网发电系统研究与设计[J]. 电源技术应用, 2005, 8 (2): 14-17.
DENG Shi-cheng, DING Ming, et al. Study and design on photovoltaic grid-connected generation system based on repetitive control and feedforward control of voltage[J]. Power Supply Technologies and Applications, 2005, 8 (2): 14-17.

收稿日期: 2010-06-01

作者简介:

李练兵 (1972-), 男, 博士, 教授, 主要研究领域为风电变频器、光伏并网逆变器、运动控制;

赵治国 (1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光伏发电; E-mail: zhaozhi_guo@126.com

赵昭 (1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为风力发电。