

文章编号:1673-095X(2014)06-0020-04

单相光伏并网逆变器控制策略的仿真

卞策^a, 王云亮^{a,b}, 邸炜松^a

(天津理工大学 a. 自动化学院; b. 天津市复杂系统控制理论及应用重点实验室, 天津 300384)

摘要: 本文针对小型光伏并网装置,提出了一种新的控制策略. 对单相太阳能光伏并网系统的工作原理进行了分析,建立了光伏并网系统的数学模型,由于锁相环技术可以使逆变器输出的电流与电网电压基本同频同相,电网电压前馈可以抵消电网对光伏并网系统的影响,从而提出了基于锁相环技术和电压前馈控制相结合的复合控制策略. 在 Matlab/Simulink 环境下建立了系统仿真模型,并分别采取了不同的控制策略进行仿真. 结果表明,文中提出的控制策略可以使光伏并网系统输出更好的并网电流波形,降低总谐波畸变率.

关键词: 光伏并网; 逆变器; 锁相环; 电压前馈; 仿真

中图分类号: TM4

文献标识码: A

doi:10.3969/j. issn. 1673-095X. 2014. 06. 005

Simulation on single phase photovoltaic grid-connected inverter and its control strategy

BIAN Ce^a, WANG Yun-liang^{a,b}, DI Wei-song^b

(a. School of Electrical Engineering; b. Tianjin Key Laboratory for

Control Theory and Application in Complicated System, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: A kind of new control strategy, which contraposed small photovoltaic grid-connected system, is proposed. The operating principle of the system of signal-phase grid-connected photovoltaic power is analyzed, and the mathematical model of photovoltaic grid-connected system is established. Because of PLL technique could make the inverter output current and utility-grid voltage with the same frequency and phase, and the influence of grid on photovoltaic grid-connected system could be counteracted with the feed-forward control of utility-grid voltage, the compound control strategy, which based on the combination of phase-locked loop (PLL) technique and feed-forward control of voltage, is put forward. The power output stage model of system is established under Matlab/Simulink, and different control strategies are compared. The results prove that the waveform of grid-connected current output from photovoltaic grid-connected system can be improved by the control strategy proposed in this paper and the THD is reduced.

Key words: photovoltaic grid-connected; inverter; PLL; voltage feedforward; simulation

21 世纪是能源开发、资源利用与环境保护相互协调发展的世纪,研究开发可再生能源发电系统具有重要意义^[1]. 其中,光伏发电以其独特的优点,被公认为技术含量高、最有发展前途的技术之一. 但是,光伏发电系统存在着初期投资大、成本较高等缺点,因而探索高性能、低造价的新型光电转换材料与器件是其主要研究方向之一^[2]. 另一方面,进一步减少光伏发电系统自身损耗、提高运行效率,也是降低其发电成本的一个重要途径. 逆变器效率的高低不仅影响其自身损耗,还影响到光电转换器件以及系统

其他设备的容量选择与合理配置^[3]. 因此,作为光伏并网发电系统中的关键环节,并网逆变器及其控制技术越来越受到关注^[4-7]. 而并网逆变器的主要问题是控制其输出电流(即并网电流)为正弦波,并且要求输出电流的频率和相位要对电网电压进行实时跟踪. 根据相关标准,并网电流总谐波畸变率要低于 5%,各次谐波畸变率应小于 3%^[8].

基于此,本文采用了改进的电压前馈控制和锁相环技术相结合的复合控制策略,并在 Matlab/Simulink 环境下进行了仿真研究. 由于本设计面向

收稿日期: 2014-07-02.

作者简介: 卞策(1988—),男,硕士研究生.

通讯作者: 王云亮(1963—),男,教授,硕士生导师, E-mail: wangyl@tjut.edu.cn.

的是小机型(功率在 10 kW 以下),且最终用户为家庭用户,所以采用了单相并网逆变器。结果表明,电网电压前馈控制可以抵消电网的影响;锁相环技术可以使逆变器的输出电流很好的跟踪电网电压,改善稳态情况下的并网电流波形。

1 单相光伏并网发电系统的结构及工作原理

1.1 单相光伏并网系统的结构

单相光伏并网发电系统的结构如图 1 所示。它

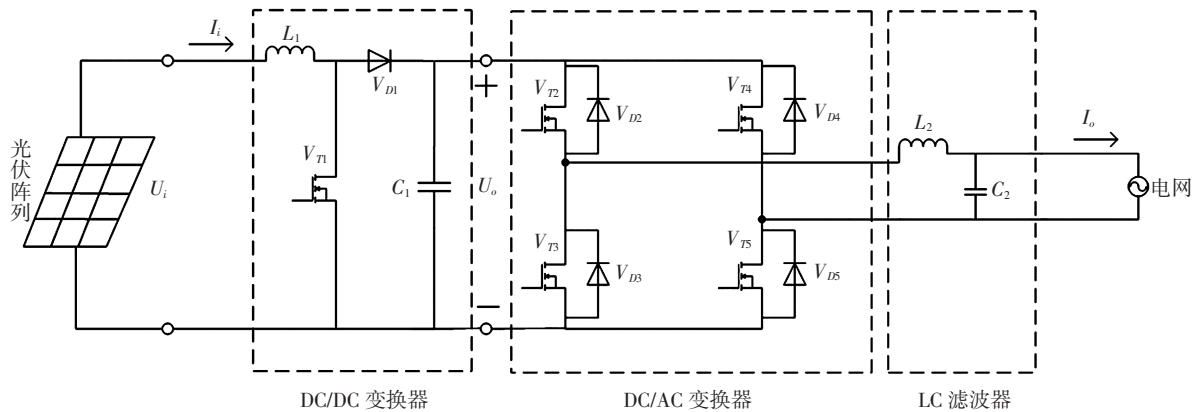


图 1 单相光伏并网发电系统结构框图

Fig.1 Structure diagram of single-phase photovoltaic grid power generation system

主要由 DC/DC、DC/AC 和滤波器三个部分组成。其中 DC/DC 环节为高频直流升压变换器,完成光伏阵列升压控制;DC/AC 为逆变输出环节,采用单相全桥结构,完成直流到交流的逆变;之后,经滤波器环节滤波后向电网输入符合国家标准正弦电流。

1.2 并网逆变器的等效模型

本系统为输出电流受控的电压型有源逆变系统。系统使用目前较为成熟的 SPWM 控制,将从电网检测到的电流 i^* 和系统输出的电流 i 进行对比,将它们二者的差值 Δi 经比例微分后再与三角载波比较,之后输出 PWM 信号。

图 2 所示为单相光伏并网系统的等效电路。其中, r 代表系统线路中的等效电阻; L 为滤波电感; U_i 为逆变器输出电压; U_o 为检测到的电网电压。

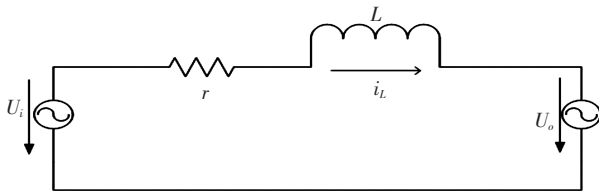


图 2 系统等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of the system

若图 2 中电感电流 i_L 为状态变量,由图 2 知:

$$U_i = U_o + L \frac{di_L}{dt} + i_L r \quad (1)$$

由式(1)经拉氏变换,可得:

$$I_L(s) = \frac{1}{sL + r} [U_i(s) - U_o(s)] \quad (2)$$

所以,被控对象的传递函数为:

$$G_1(s) = \frac{1}{sL + r} \quad (3)$$

但在系统中,常常存在一些不可避免的误差,适当忽略其中一些非线性因素,则逆变器的传递函数可视为一高增益惯性环节,即:

$$G_2(s) = \frac{1}{sL + r} \quad (4)$$

T 为逆变环节周期; K 为逆变器增益。

在系统正常运行时,具有相当高的开关频率, $T_s + 1 \approx 1$, 所以,综上所述,系统的开环传递函数为:

$$G(s) = G_1(s)gG_2(s) = \frac{K}{sL + r} = \frac{\frac{K}{r}}{\frac{L}{r}s + 1} \quad (5)$$

系统的稳定裕度由滤波电感的等效电阻决定,所以当 r 很小时,系统的稳定性很差;所以在实际使用时,应在系统中加入调节器,使之成为一个稳定性良好的系统。

2 电网电压前馈控制

一般的并网系统控制结构如图 3 所示。

光伏并网系统是将光伏电池产生的直流电逆变为交流电,属于有源逆变。因此,该系统不可避免的会因为电网系统其他部分的变化而产生相应的波动,此时,系统输出的并网电流就会发生畸变。

由图 3 得,电网电压不稳定(例如由 U_N 变为

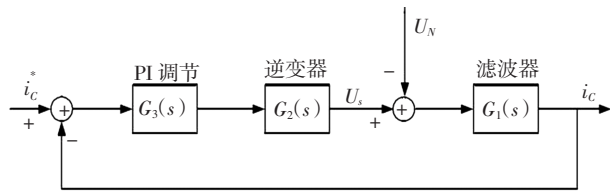


图3 未加电压前馈的并网系统结构框图

Fig.3 Grid system diagram without voltage feedforward

$U_N + u$)时,则系统并网电流 i_c 的相应输出为:

$$i_c = \frac{G_1(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)G_3(s)} u \quad (6)$$

即当电网电压突变时,并网系统的输出电流将减小,将会是系统失去稳定性.为了消除电网电压的不稳定对系统的影响,有两种方式可供选择.

方式1,从式(6)可看出,若使

$$G_1(s)G_2(s)G_3(s) \gg 1 \text{ 且 } G_1(s)G_2(s) > G_3(s)$$

则可将 u 对系统造成的影响基本消除.

方式2,在并网系统中加入电网电压前馈补偿.图4为具有电网电压前馈补偿的系统框图.系统加入电网电压前馈补偿后,有:

$$\begin{aligned} I_c^*(s) - I_c(s) G_1(s)G_2(s)G_3(s) + I_c(s) = \\ U_N(s) G_1(s)G_2(s)G_3(s) - G_1(s) \end{aligned} \quad (7)$$

如果令 $G_4(s) = 1/G_2(s)$,则式(7)中等号右边的部分可以消除,从而先出电网电压突变对系统造成的影响.即是说通过前馈控制给出一个和电网电压相

对应的占空比,来消除电网电压对系统的影响.

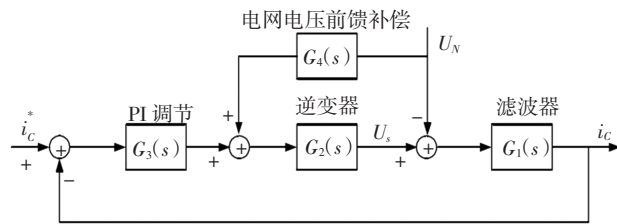


图4 电压前馈并网控制系统结构框图

Fig.4 Grid control system diagram with voltage feedforward

方式1虽然能够在理论上消除电网电压不稳定对系统造成的影响,但是其要求系统的开环增益过大,导致系统稳定裕度很小,并且会伴随着产生电磁干扰等不良后果.

方式2实际上是采用开环方式来补偿测量到的扰动,所以不会使系统的特性得到改变;在抑制扰动方面,该控制方式可以有效减轻系统负担,有利于系统稳定.所以,从实际运行的角度出发,选取在并网系统中加入电压前馈的控制策略可以更好的改善控制效果.

3 单相光伏并网发电系统控制策略

由前面的理论分析可知,单项光伏并网发电系统的电流控制原理图如图5所示.

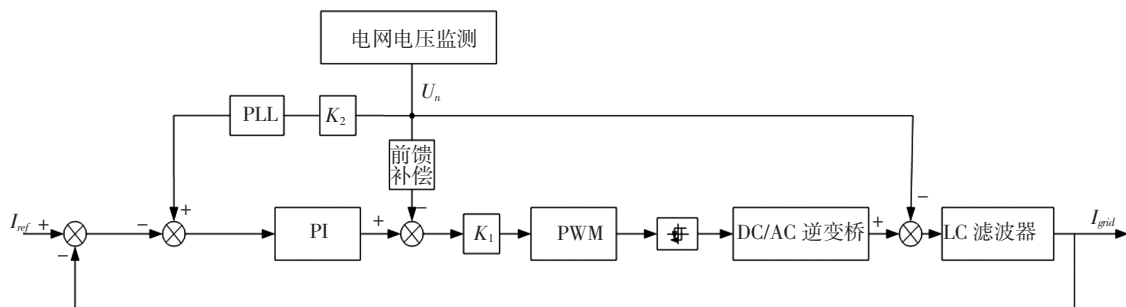


图5 系统控制原理图

Fig.5 The principle diagram of the system control

主要控制策略由两部分组成:电网电压前馈控制以及锁相环控制.其中,锁相环技术可以使逆变器输出的电流与电网电压基本同频同相,电网电压前馈可以抵消电网对光伏并网系统的影响.

4 仿真研究

4.1 系统仿真模型

在通常情况下,光伏电池组件将持续稳定工作

在最大功率点,虽然其工作电压会因为太阳光辐射强度和温度等条件的变化而产生波动,但是在很短的时间内基本上为定值.所以,本文在仿真模型的搭建过程中,以直流恒压源代替光伏电池组件.系统在 Matlab\Simulink 环境下建立了仿真模型.系统主要包括锁相环子系统、SPWM 驱动波形发生子系统等.系统直流侧电压 360 V,网侧电压 220 V,频率 50 Hz.

4.2 仿真结果

单相光伏并网发电系统的仿真结果如图6所示.

其中,图 6(a)为采用本文提出的电网电压前馈和锁相环技术的并网电流和电网电压波形,图 6(b)为相应的频谱图。

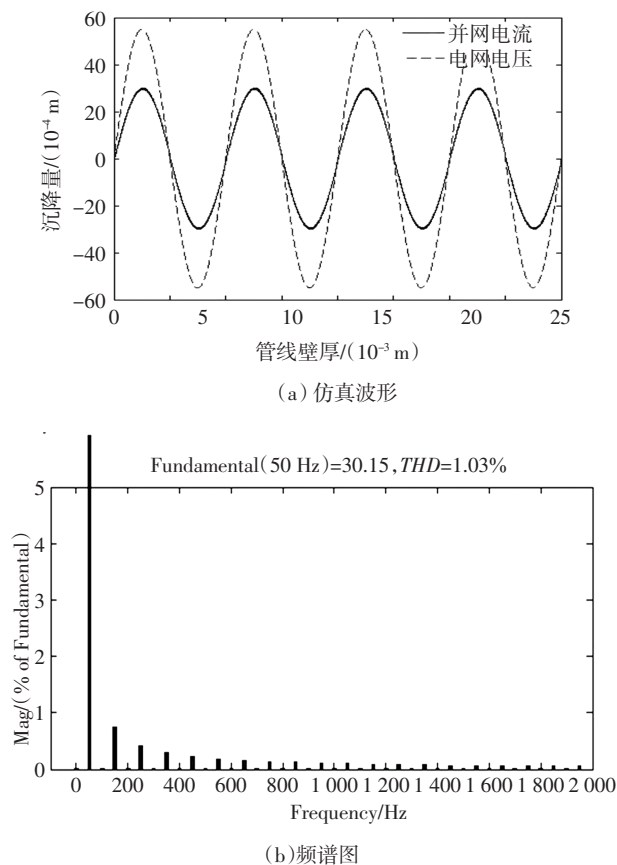


图 6 电网电压前馈和锁相环的并网电流和电网电压波形及相应的频谱图。

Fig.6 Waveform and spectrum charts of grid current and power grid voltage with feed-forward and phase-locked loop

仿真实验结果显示,采用本文提出的复合控制策略可以产生较好的并网电流波形,其总谐波畸变率也明显较小。

在其他参数不变的情况下,本文针对不同的电网电压等级做了相关实验,如表 1 所示。

实验表明,本仿真系统在不同的电压等级下,表现出的并网能力是符合相关标准的,并且效果良好。从表 1 可以看出,尽管实验中的参数是依据电网电压等级为 220 V 时的情况进行调节的,但是当电压发生波动时,THD 值仍然是较小的。

当出现电网电压的幅值和相位丢失的情况时,本仿真系统则会处于崩溃的状态,该情况等于出现了孤岛效应,需要系统对孤岛效应进行判断,并通过

表 1 不同电网电压下谐波畸变率

Tab.1 Harmonic distortion rate under different grid voltage

电网电压/V	基波频率/Hz	基波电流幅值/A	THD/%
200	50	29.9	1.07
220	50	30.15	1.03
250	50	29.84	1.06

相应的算法及时的切断与公共电网的连接。此处已经超出了本文的研究范围,需要再进一步的进行研究和仿真。

5 结 论

本文运用电网电压前馈及锁相环控制策略,对单相光伏并网发电系统的输出电流进行控制。在相同并网条件下,本文设计的复合控制策略所产生的总谐波畸变率明显低于基于指定的参考电流控制系统,足以保证系统的输出电流能够满足并网的需求,提高供电可靠性。而从仿真结果可以看出,本文研究的单相光伏并网发电系统的理论分析和控制策略是正确可行的,对以后的实验研究具有一定的指导意义。

参 考 文 献:

[1] 柳 泊, 方 芳. 基于新型移相变压器的多重化逆变研究[J]. 计算机与数字工程, 2013, 41(6): 1 034-1 036.

[2] 杜 鹃. 中小型并网逆变器的研发策略[J]. 数字技术与应用, 2013 (1): 88-89.

[3] 王天意. 光伏并网发电逆变系统的研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2011.

[4] 张 兴, 张崇巍, 曹仁贤. 光伏并网逆变器非线性控制策略的研究[J]. 太阳能学报, 2002, 23(6): 770-773.

[5] Kjaer S B, Pedersen J K, Blaabjerg F. A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41 (5): 1292-1306.

[6] Erika Twining, Holmes D G. Grid current regulation of a three-phase voltage source inverter with an LCL input filter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(3): 888-895.

[7] Prodanovic M, Green T C. Control and filter design of three-phase inverters for high power Quality grid connection [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18 (1): 373-380.

单相光伏并网逆变器控制策略的仿真

作者: [卞策](#), [王云亮](#), [邸炜松](#), [BIAN Ce](#), [WANG Yun-liang](#), [DI Wei-song](#)
作者单位: [卞策, 邸炜松, BIAN Ce, DI Wei-song \(天津理工大学 自动化学院\)](#), [王云亮, WANG Yun-liang \(天津理工大学 自动化学院; 天津理工大学 天津市复杂系统控制理论及应用重点实验室, 天津 300384\)](#)
刊名: [天津理工大学学报](#) 
英文刊名: [Journal of Tianjin University of Technology](#)
年, 卷(期): 2014(6)

引用本文格式: [卞策. 王云亮. 邸炜松. BIAN Ce. WANG Yun-liang. DI Wei-song 单相光伏并网逆变器控制策略的仿真\[期刊论文\]-天津理工大学学报](#) 2014(6)