

并网型光伏发电系统控制策略研究

谢寒冰, 郭前岗, 周西峰

(南京邮电大学 自动化学院, 江苏 南京 210046)

摘要: 根据单相电压源型光伏并网发电系统的结构组成及其工作原理, 采用双环控制策略, 针对传统 PID 控制器在相位幅值控制方面存在的误差, 采用新型的重复控制器, 提高了系统的准确性; 针对电网电压作为并网系统的扰动量, 采用前馈补偿技术, 提高了该系统的稳定性。Matlab 仿真实验结果表明, 该控制策略输出的交流电与电网电压更加同步。

关键词: 单相光伏并网发电系统; 双环控制; 重复控制器; Simulink

中图分类号: TM615

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2013)08-0072-03

Research on the control technology of a single-phase photovoltaic grid-connected system

Xie Hanbing, Guo Qian'gang, Zhou Xifeng

(College of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210046, China)

Abstract: According to the basic structure and the working principle of a single-phase voltage source grid-connected PV system, it adopts the double-loop control technology. Aiming at deviation of the PID controller in the amplitude and phase, this paper uses a repetitive controller in this system which improves its accuracy; As for the grid voltage which be regarded as the grid disturbance, this paper uses the feed forward compensation technique to improve the performance of the system. The Matlab simulations results show that the presented methodology is able to make the output AC track the grid voltage more efficiently.

Key words: single-phase photovoltaic grid-connected system; double-loop control; repetitive controller; Simulink

近年来,随着世界能源消耗的增加,以太阳光为代表的可再生能源发电受到了广泛重视。光伏并网发电系统凭借造价低、应用广泛、输出波形稳定等特点,其应用比例快速增长,已成为光伏技术的主流应用。由于要求光伏并网发电系统输出的交流电与电网电压严格同步,所以光伏并网发电系统控制的关键和难点在于确定了光伏电池的最大功率输出后,如何综合考虑功率变换器的动态性能、系统干扰、输出波形失真、并网电流和电网电压同步等问题。基于此,在选取了单相电压源型并网光伏系统作为研究对象后,利用传统的双环控制策略,采用新型重复控制技术,并结合电网电压前馈控制技术,在 Matlab/Simulink 环境下进行了仿真研究。结果表明,并网电流的重复控制可改善稳态情况下的并网电流波形,降低对电网的污染,同时电网电压的前馈控制也抵消了电网电压对系统的扰动影响。

1 并网型光伏发电系统的结构与数学模型

光伏发电系统按照发电功率及容量可以分为单相

和三相两种,采用单相并网系统,有便于理论分析且性能可靠;按照直流侧电源形式可分为电压型和电源型两类,采用电压源型系统,有输入电压稳定且干扰较小等特点;根据逆变器级数又可分为单级式和两级式系统,采用两级式控制系统,系统的控制环节比较容易设计和实现。基于此,本文采用两级式单相电压源型并网光伏发电系统。

1.1 单相电压源型并网光伏发电系统结构

单相电压源型并网光伏发电系统如图 1 所示。其中,光伏组件阵列将接收到的太阳光直接转换为电能。通常这个环节输出的电压不能达到逆变的要求,可以通过一个升压斩波电路对其进行升压,并将输出电压通过并联一个储能电容,作为逆变器的输入信号,从而构成电压源型逆变器。逆变器的主电路通常采用全桥逆



图 1 单相电压源型并网光伏发电系统结构示意图

技术与方法 Technique and Method

变电路,使用 IGBT 作为功率器件。为了控制逆变器中功率器件的关断还需采用脉宽调制技术(PWM)。通常逆变器的输出电压还会含有较多的高次谐波分量,因而必须在逆变器的输出侧设计一个低通 LC 滤波器来减小谐波含量,以得到平滑的正弦波,防止对电网电压造成污染。

1.2 并网型光伏发电系统数学模型

单相电压源型并网光伏发电系统数学模型如图 2 所示。

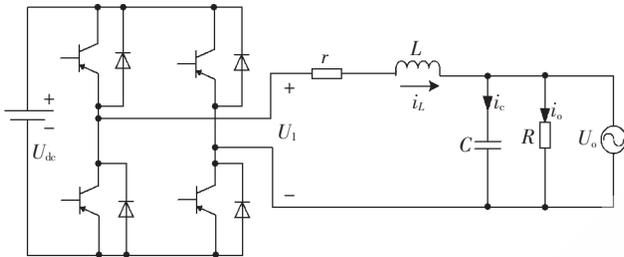
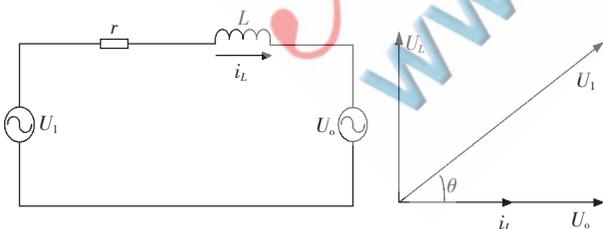


图 2 单相电压源型并网光伏发电系统数学模型

从图 2 可以看出,对于逆变器输出部分,主要采用电流控制方法。把逆变器输出电流作为一个电流源,和电网进行并联工作,而电网一般看作是电压源处理。所以整个控制目标就变成控制逆变器的输出电流,使其频率、相位能够完美地跟踪电网电压变化。这种控制方法相对于控制逆变器输出电压跟踪电网电压的控制策略相对简单。

从以上的数学模型可以得到并网逆变器的等效电路和相应的电压电流矢量图,如图 3 所示^[1]。其中 U_i 为电网电压, U_1 为并网逆变器的输出电压, r 为包括线路电阻、死区效应、开关管导通压降等逆变器中各种阻尼因素的综合等效电阻, L 是电路等效电感值, i_i 为并网逆变器的输出电流。由于并网逆变器的等效负载属于阻感性负载,所以逆变器输出的电压要比电网电压滞后一个相位差 θ ,如图 3(b)所示。因此在研究控制方案时,为了使输出电流与电网电压同频同相,要使电网电压预先滞后于并网逆变器的输出电压。



(a) 并网逆变器的等效电路 (b) 相应的电压电流矢量图

图 3 并网逆变器的等效电路及电压电流矢量图

2 并网型光伏发电系统控制策略研究

系统的整体控制采用双环控制策略,控制过程是电压给定信号 u_r 与电容电压 u_o 比较得到电压误差信号,经过电压调节器 G_v 产生电流给定信号 u_r^* , u_r^* 与电容电压 u_o 比较得到电流误差信号,经过电流调节器 G_i 形成

控制量 u_1 ,从而对逆变器实施控制。

2.1 电网电压前馈控制研究

并网系统的实质是有源逆变系统,其负载为电网,因此,在公共节点处,电网电压值可能会因为回路上其他交流负载的变化而发生突变,此时,并网电流波形就可能发生畸变。从控制理论角度理解,可以将电网交流电压当作是系统的干扰源。为了获得较好的电网扰动抑制效果,系统采用了电网电动势前馈控制策略,以抵消电网的扰动。前馈控制一般不会改变控制系统的特性,另外前馈控制还可以在在一定程度上减轻反馈控制的负担,所以尽量降低反馈控制的增益,有利于系统的鲁棒性。图 4 为具有电网电动势前馈补偿的控制框图。其中, $G_1(s)$ 表示控制对象传递函数, $G_2(s)$ 表示逆变桥及 SPWM 调制电路等效传递函数, $G_3(s)$ 则表示系统串联的 PI 调节器传递函数, K_{PWM} 为逆变器增益。由图可知,当电网电压发生突变(设由 U_{net} 变为 $U_{net} + \Delta u$)时,由于电网电压的干扰,此时输出的并网电流 i_i 的变化量为:

$$\Delta I_{net} = -\frac{G_3(s)[G_2(s)G_n(s)-1]}{1+G_1(s)G_2(s)G_3(s)} \Delta u \quad (1)$$

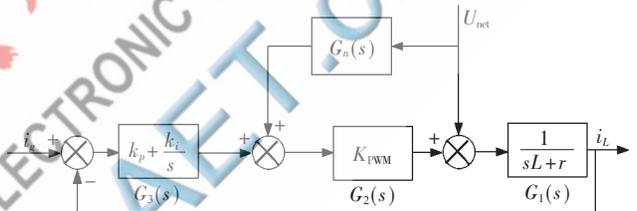


图 4 电网电动势前馈补偿的控制框图

由式(1)可以看出,当电网电压的前馈补偿环节传递函数 $G_n(s) = \frac{1}{G_2(s)} = \frac{1}{K_{PWM}}$ 时,理论上电网电压的扰动影响可以完全消除。

2.2 并网电流重复控制研究

图 5 为系统中重复控制器简化结构图。

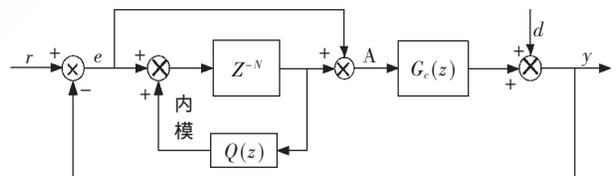


图 5 重复控制器系统结构图

重复控制是一种基于内模原理的控制方法。在传统的重复控制系统中,重复控制器主要由两部分构成:内模和辅助补偿器。内模的作用是产生周期性的参考信号;而辅助补偿器是为了改造控制对象,以增加其稳定裕度。本系统中也采用了 PI 控制器来改造控制对象。其中 N 为一个基波周期内并网电流的采样次数,其值等于一个基波周期内 PWM 的中断次数即载波比,在本系统中,由于开关频率为 10 kHz,电流频率为 50 Hz,故 $N=10\text{ k}/50=200$ 。 $Q(z)$ 可以看成是一阶低通滤波器或者直接看作是不大于 1 的常数。

技术与方法 Technique and Method

系统工作原理是:重复控制器将上一周期的输出量经过 $Q(z)$ 衰减后与当前误差 e 进行逐基波周期累加,当误差 e 周期性地重复出现时,内模的输出也就变成对误差 e 的逐基波周期累加。当误差 $e=0$ 时,内模的输出(即 A 点的输出)不会消去,只是暂时停止变化,此时重复前一周期的波形,同时周期性地输出此波形,从而实现输出对给定的无静差跟踪。内模输出波形通过串联的补偿器 $G_c(s)$ 进行调节,从而增加系统的稳定裕度,改善系统的动态性能^[3]。

具体分析时,忽略线路分布时间常数,仅考虑 PI 控制时,则可以得到系统开环传递函数为:

$$\begin{aligned} G(s) &= G_c(s) \times K_{\text{PWM}} \times \frac{1}{sL+r} \\ &= \frac{K_p T_s + 1}{T_s} \times K_{\text{PWM}} \times \frac{1}{\frac{L}{r} s + 1} \\ &= \frac{K_p T_s + 1}{\frac{L}{r} s + 1} \times \frac{K_{\text{PWM}}}{r T_s} \end{aligned} \quad (2)$$

选择合理的 K_p 、 T ,使两者乘积等于 L/r ,这样可以实现式中的零点和极点对消,此时:

$$G(s) = \frac{K_{\text{PWM}}}{r T_s} \quad (3)$$

上式表明,光伏并网发电系统采用 PI 控制后是一个稳定系统。系统动态响应特性仅与控制器的积分时间常数 T 有关, T 值越小,系统的动态响应就越快。

2.3 系统的整体控制策略

综合以上两小节的研究,设计出重复控制器与电网电压前馈技术相结合的复合型光伏并网发电系统。系统结构主要包括改进型重复控制器和电网电压前馈控制器两部分。其中,改进型重复控制器串联在前向通道中,用来克服周期性的扰动影响,改善系统并网电流的稳态性能;电网电压前馈控制为一个反馈网络,用来抵消电网电压的影响,这样,即使给定电流为零,系统仍然能够产生一个相应的占空比来抵消电网作用,从而使系统成为一个无源跟随系统。

3 系统仿真

3.1 仿真电气参数

电路的主要仿真电气参数如表 1 所示。

3.2 仿真模型

根据相关理论知识,本文在 Matlab2010a 环境下构建仿真模型如图 6 所示^[4]。

由图可知,光伏并网系统主要由以下几部分组成:直流电压输入模块、逆变桥模块、PWM 波形生成模块、交流侧并网模块以及控制系统模块等。

3.3 仿真结果

采用电网电压前馈与改进型重复控制相结合的控制策略后,参考电网电压 U_{grid} 与输出电流 i_c 的波形图如图 7 所示。

表 1 仿真实验电气参数

参数	值
直流侧电压 U_{dc}/V	400
滤波电感 L/mH	1.1
滤波电容 $C/\mu F$	20
负载 R/Ω	2
并网电压 U_{grid} 有效值/V	220
输出基波频率 f_i/Hz	50
PWM 开关频率 f_s/kHz	10
滤波器截止频率 f_i/kHz	1

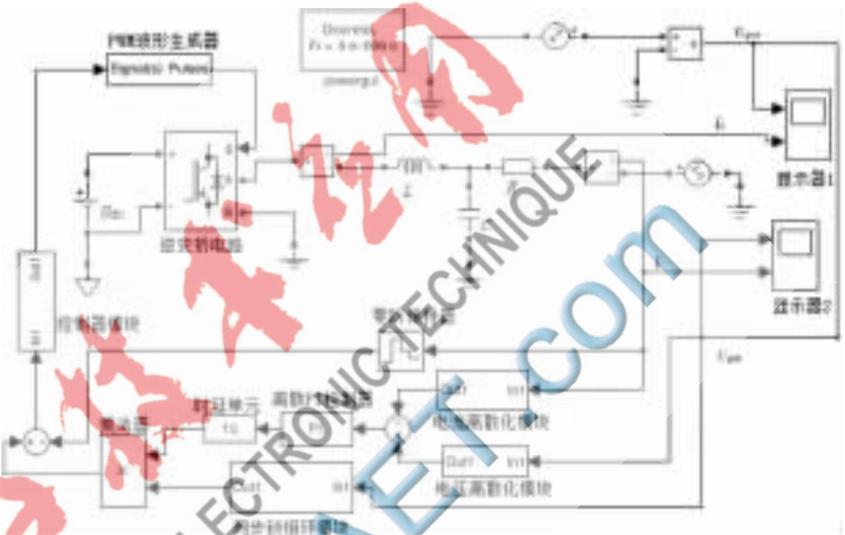


图 6 复合系统模型仿真图

制策略后,参考电网电压 U_{grid} 与输出电流 i_c 的波形图如图 7 所示。



(a) 参考电网电压 U_{grid} 波形



(b) 输出电流 i_c 波形图

图 7 采用复合控制系统后波形

技术与方法 Technique and Method

3.4 仿真结果分析

在实施复合控制以后,并网电流处于稳态,与电网电压频率相同,相位差很小,且波形光滑,基本满足了光伏发电系统并网的要求。

本文提出的光伏并网型发电系统控制策略,有效解决了电网电压对系统的周期性扰动以及输出电流无法完全准确跟踪电网电压的问题。采用本文提出的复合控制策略,利用串联在前向通道中的改进型重复控制器,可克服周期性的扰动影响,改善系统并网电流的稳态性能;另外把电网电压前馈控制作为一个反馈网络,用来抵消电网电压的干扰,使输出电流在相位、频率以及幅值方面紧紧跟踪电网电压,实现对系统的无静差跟踪。根据前面的理论分析以及仿真结果的验证,说明该方案具有一定的有效性和可行性,但关于并网交流侧滤波电路对输出电流的影响还需要深层次探讨。

参考文献

- [1] 姜子晴.单相光伏并网系统的研究[D].镇江:江苏大学,2008.
- [2] 何俊,彭力,康勇.PWM逆变器PI双环控制技术研究[J].通信电源技术,2007,24(3):4-6.
- [3] 郑诗程,刘伟.光伏并网发电系统及其控制策略的研究与仿真[J].系统仿真学报,2009,21(19):6161-6165.
- [4] 薛定宇,陈阳泉.基于Matlab/Simulink的系统仿真技术与应用(第2版)[M].北京:清华大学出版社,2011.

(收稿日期:2012-12-18)

作者简介:

谢寒冰,男,1989年生,硕士研究生,主要研究方向:现代电力电子控制与新能源发电。

郭前岗,男,1960年生,硕士,教授,主要研究方向:新能源发电,电力电子与电力传动。

周西峰,男,1960年生,学士,副教授,主要研究方向:计算机智能监控控制技术,计算机控制与系统集成。

电子技术应用
APPLICATION OF ELECTRONIC TECHNIQUE
www.ChinaAET.com