

单级式光伏并网逆变系统设计研究

智能电网和微电网理论的提出,为光伏并网发电技术提供了更为广阔的发展空间。在对光伏并网逆变技术研究的基础上,对单级式光伏并网系统进行了设计研究。首先对光伏并网逆变系统的结构进行了分析,确定了系统的主电路拓扑、滤波电路结构和工频变压器的联结方式。然后提出了一种可以实现电流零稳态误差的PR控制策略,并对PR控制器进行了分析和设计。最后对单级式光伏并网逆变系统建立了数学模型,并通过Matlab仿真对上述研究和设计进行了验证。

曹 雷 张 敏/广西电网有限责任公司桂林供电局

0 引言

随着全球工业化进程的逐步展开,世界各国对能源的需求急剧膨胀,全球将再一次面临能源危机^[1]。人类要解决能源问题,只能依靠科技进步,大规模地开发利用新能源。在众多新能源中,太阳能具有独特的优势,全球的能源专家们一致认定^[2]:太阳能将成为21世纪最重要的能源之一。随着智能电网和微电网理论的提出,为光伏并网发电技术提供了更为广阔的发展空间,因此对光伏并网逆变技术进行研究具有十分重要的意义。

本文在对光伏并网逆变技术研究的基础上,对单级式光伏并网系统进行了设计研究。首先对光伏并网逆变系统的结构进行了分析,确定了系统的主电路拓扑、滤波电路结构和工频变压器的联结方式。然后提出了一种可以实现电流零稳态误差的PR控制策略,并对PR控制器进行了分析和设计。最后对单级式光伏并网逆变系统建立了数学模型,并通过Matlab仿真对上述研究和设计进行了

验证。

1 单级式光伏并网逆变系统设计

太阳能在电力系统的应用可简单分为并网发电型光伏系统与独立发电型光伏系统。光伏并网发电系统的结构如图1所示。主要包括PV太阳能电池光伏阵列、 C_d 直流稳压电容、逆变器、 L_f 滤波电抗器、 C_f 滤波电容、隔离变压器T、交流电网和控制器。太阳能光伏电池所输出的直流电能,利用DC/AC全桥逆变器转换为交流电能,经滤波后通过隔离变压器并入电网^[3]。

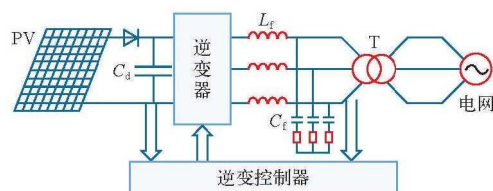


图1 单级式光伏并网逆变系统结构示意图

这种单级式系统结构没有前级DC/DC环节,直接通过逆变器经工频变压器隔离升压并网,具有结构紧凑、效率高、良好的抗雷击和消除尖波的性能。

1.1 光伏并网逆变器

逆变器的控制模式一般可分为四种类型,分别为电压源电压控制型、电压源电流控制型、电流源电压控制型和电流源电流控制型。如图2所示,以电流源为输入的逆变器直流侧要串联一个大电感提供较稳定的直流输入,但这一大电感往往会导致系统的动态响应差。因此,文中采用电压源输入的逆变器,如图3所示。



曹 雷/工程师

关键词/Keywords

光伏发电系统·
并网逆变器·
LCL滤波器·
工频变压器·
PR控制·

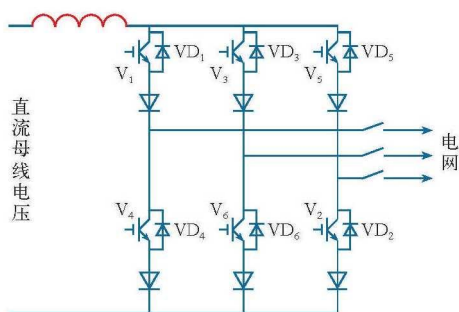


图2 电流型逆变器

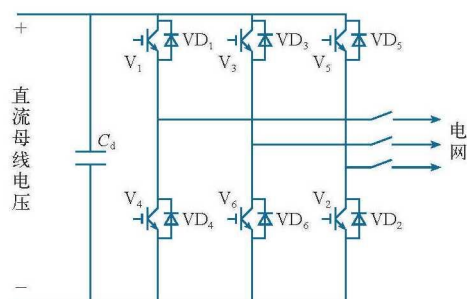


图3 电压型逆变器

逆变器与交流电网并联运行的输出控制可分为电压控制和电流控制。交流电网可视为一个定值的交流电压源，若采用电压控制，则实际上就是一个电压源与电压源并联的系统。这种情况下要保证系统的稳定运行，就必须采用锁相技术以实现与交流电网同步，但是锁相回路的响应较慢、逆变器输出电压不易精确控制，且电网电压易波动，可能在逆变器与电网之间出现环流等问题。若逆变器的输出采用电流控制，则只需控制逆变器的输出电流跟踪电网电压的相位和频率，幅值保持正弦输出，即可达到逆变器并网运行的目的。故本文采用的逆变器结构为电压源电流控制结构，可以有效地进行光伏发电、提高供电质量及减少功率损耗等。

1.2 LCL滤波器

LCL滤波器又称T型滤波器^[4-5]，在PWM整流和可再生能源发电系统中有着较广泛的应用。1995年，M. Lindgren和J. Svensson首先将LCL滤波器应用到PWM整流器中，开创了使用三阶LCL滤波器解决高频问题的先河^[6]。LCL滤波器的阻抗值与流过其电流频率成反比，电流的频率越高，

滤波器的阻抗值就越小，所以其对高频谐波具有较好的抑制效果。LCL滤波器存在谐振频率，在谐振频率下，LCL滤波器可以等效为电感值为前后两个电感之和的L型滤波器，并且等效电感值较纯L型滤波器的电感值要小得多。

与传统的L或LC型滤波器相比较，LCL滤波器具有以下优点：在同样的体积条件下，LCL滤波器具有更好的高频滤波效果；由于与电网的连接端有电感的存在，可以大大减小进网的浪涌电流^[26]。

图4为文中设计的一组LCL滤波器单相等效原理图，其由滤波电感 L_f 、滤波电容 C_f 、工频变压器的一次侧漏感 L_{l1} 组合而成。这种利用工频变压器的漏感与前级LC共同组成的LCL滤波器省去了LCL后级的三个电抗器，在降低成本和减小逆变器体积的同时，实现了高质量的并网电流，充分体现了LCL滤波器的优势。

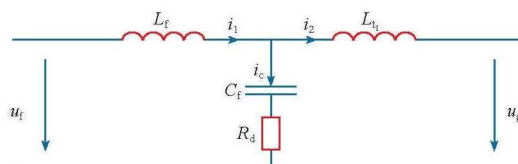


图4 LCL滤波器等效原理图

1.3 工频变压器

由于光伏发电的特殊性，光伏并网系统大规模的投入势必会给电网的可靠性和稳定性带来隐患，如谐波、闪变、直流偏磁和过电压等。因此，有必要研究合适的方案来解决上述问题。一种简单有效的方法是在电网和并网逆变器之间加入工频变压器，起隔离逆变器和电网的作用。由于有了变压器的隔离，逆变器功率器件开关导致的电位浮动所产生的漏电流，以及逆变器在控制中产生的微小直流电流均被有效地隔离和抑制，从而不会对电网产生不良的影响。

三相工频变压器常用的联结方式主要有星形—星形接线（Y/Y）、星形—三角形接线（Y/D）和三角形—星形接线（D/Y）三种。采用不同联结方式的工频变压器对抑制谐波、直流偏磁等问题，在效果上存在一定的差异。通过Matlab仿真

与实验测试确定了D/Yn联结是一种相对较合适的联结方式^[7]。

2 光伏并网逆变系统控制方法设计

目前，光伏并网逆变器的控制方法较多，如滞环比较控制、PI控制、无差拍控制、重复控制和模糊控制等。

对于一个控制系统，要想实现稳态误差为零，则参考信号的频段范围内要具有无穷大增益。对于光伏并网逆变系统，参考信号为正弦，采用常规的PI瞬时值控制在静止坐标系下难以消除稳态误差。为了解决这一问题，一般利用abc-dq坐标变换，在同步旋转坐标系下，将正弦参考信号变成直流信号，使PI控制做到零稳态误差控制。这种情况下，PI控制器虽然满足了无静差控制，但是增加了烦琐的abc-dq坐标变换的算法过程，使得控制器的设计复杂化。为此，本文引入比例谐振控制器（Proportional Resonant, PR）。PR控制器可以在静止坐标系下跟踪参考电流实现零稳态误差控制，简化了控制器的设计。

2.1 PR控制器

PR控制器由比例调节器和谐振调节器组成，在基波频率处增益为无穷大，而在非基波频率处增益很小。因此，利用PR控制器可以使系统在基波频率处实现零稳态误差^[8-12]。PR控制器的传递函数如下，即

$$G_{PR}(s) = k_p + k_r \frac{s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (1)$$

式中， k_p 为比例系数； k_r 为谐振系数； ω_0 为谐振角频率。

将基波角频率 ω_0 代入式（1）可得控制器的幅频特性为

$$A_{PR}(\omega_0) = \sqrt{k_p^2 + \left(\frac{k_r \omega_0}{-\omega_0^2 + \omega_0^2} \right)^2} \quad (2)$$

这个值是无穷大的。因此，PR控制器可以实现系统的零稳态误差，同时具有抗电网电压干扰的能力。

2.2 PR控制系统

图5中的PR控制系统框图只需将检测得到的三相交流电流转化到两相静止坐标系下，与给定信号的偏差作为PR控制器的输入，PR控制器的输出为电压控制指令，该指令电压转换成三相交流指令电压后，被送入PWM调制单元生成PWM信号再送至并网逆变器，从而控制功率器件的开断，产生实际所需的交流电压，并使并网电流跟随参考值变化。

3 仿真分析

按照上述设计，在Matlab/Simulink平台上搭建了如图6所示的单级式光伏并网逆变系统仿真模型，并进行了仿真。主要参数为：光伏电池模型输出直流电压 $U_{dc} = 300$ V，输出额定功率 $P = 900$ W，电网额定电压为220 V，额定频率为50 Hz，直流母线稳压电容为3 300 μ F，滤波电感为1.34 mH，滤波电容为8 μ F，工频变压器采用D/Yn接线，电压比为120/380 V；开关频率为9 600 Hz。

图7a为光伏并网逆变系统PR控制下的三相并网电流波形。仿真模型中光伏电池模型输出电压为300 V，仿真中得到的直流母线电压波形如图7b

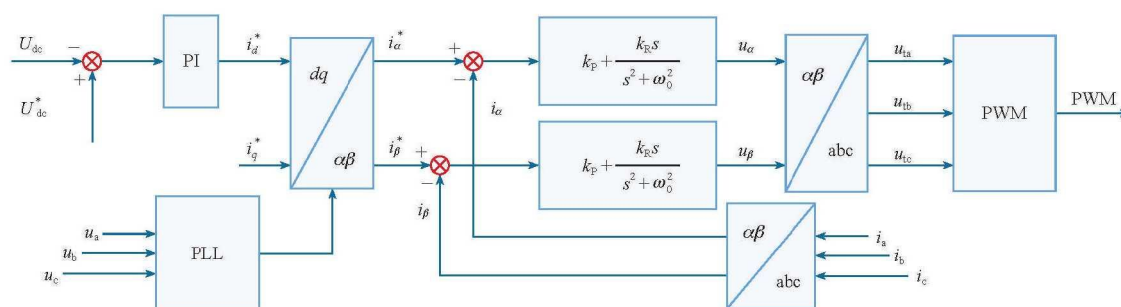


图5 光伏并网逆变器PR控制框图

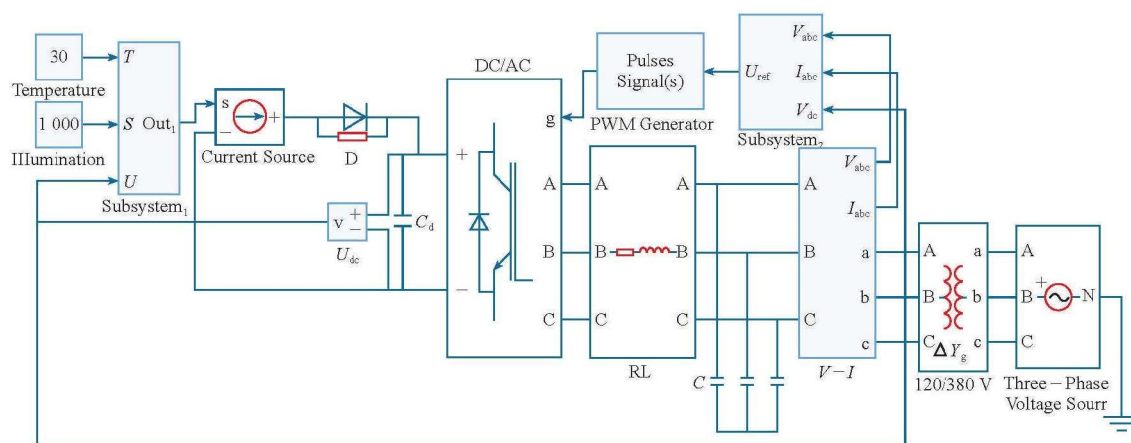
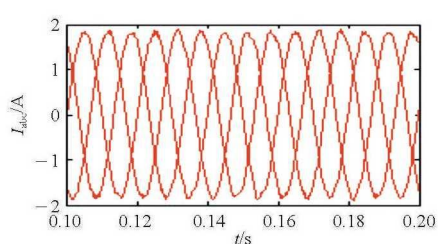


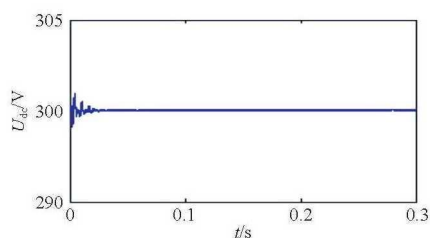
图6 光伏并网逆变器系统仿真设计模型

所示。从图7b中可以看出，直流母线电压经短暂调节后达到稳定，实现了并网逆变器直流侧电压

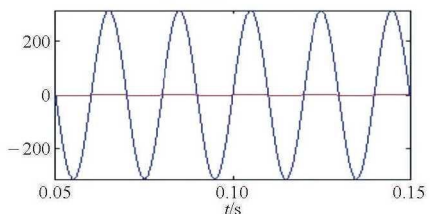
稳定的控制任务。图7c、图7d为电网相电压和并网相电流波形，其中图7d为放大波形。从7d中可



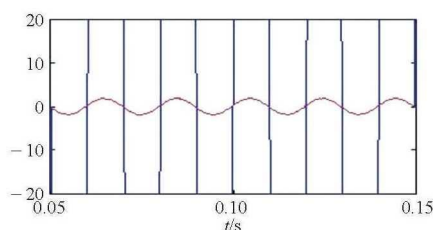
(a) 三相并网电流



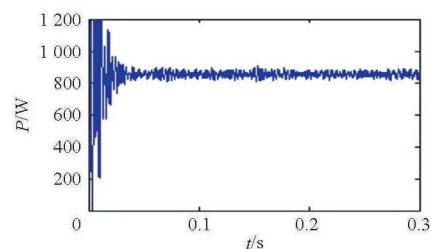
(b) 直流母线电压



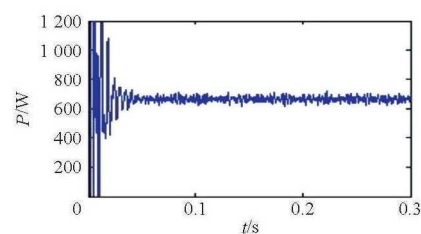
(c) 电网电压与并网电流



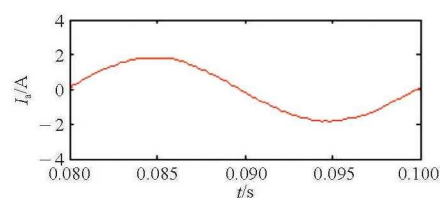
(d) 电网电压与并网电流放大波形



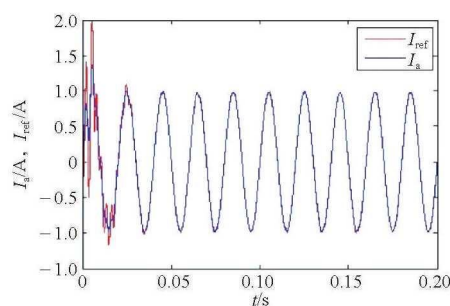
(e) 并网功率 ($S=1000 \text{ W/m}^2$, $T=30^\circ\text{C}$)



(f) 并网功率 ($S=800 \text{ W/m}^2$, $T=30^\circ\text{C}$)



(g) 并网电流谐波分析



(h) 并网电流跟踪参考电流分析

图7 光伏并网逆变系统仿真波形

可以看出, 并网电流波形能很好地跟随电网电压波形, 与电网电压同频同相, 实现了并网逆变器输出电流正弦和功率因数调节的控制任务。

图7e为光照强度 $S=1\,000\text{ W/m}^2$ 和温度 $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的并网功率波形, 图7f为光照强度 $S=800\text{ W/m}^2$ 和温度 $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的并网功率波形。从图7f中可以看出, 当外界环境发生变化时, 控制系统能够快速跟踪变化并向电网输送稳定的有功功率。

图7g为并网电流的快速傅里叶分析图, 可以看出并网电流波形质量较高, 其总谐波畸变率THD为1.76%, 满足电能质量要求。图7h为并网电流跟踪参考指令仿真波形, 可以看出逆变器输出的并网电流在跟踪参考信号时几乎不存在稳态误差, 跟踪效果较好。

4 结束语

针对目前飞速发展的光伏发电技术在并网运行控制方面遇到的诸多问题, 对光伏并网逆变相关技术进行了分析与研究, 设计了一种单级式光伏并网逆变系统, 通过建立数学模型及仿真对上述研究和设计进行了验证, 对今后智能电网及微电网的发展具有十分重要的意义。

参考文献

[1] 李春鹏, 张廷元, 周封. 太阳能光伏发电综述[J]. 电工材料, 2006(3): 45-48.

[2] 林安中, 王斯成. 国内外太阳电池和光伏发电的发展与前景[J]. 太阳能学报, 1999(增刊): 68-74.

[3] 吴财福, 张健轩, 陈裕凯. 太阳能光伏并网发电

及照明系统[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

- [4] 伍家驹, 张朝燕, 任吉林, 等. 一种用于PWM逆变器的非对称T型滤波器的设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(14): 35-40.
- [5] 钱志俊, 仇志凌, 陈国柱. 有源电能质量控制器的LCL滤波器设计与研究[J]. 电力电子技术, 2007, 41(3): 6-8.
- [6] 孙蔚, 伍小杰. 基于LCL滤波器的电压源型PWM整流器控制策略综述[J]. 电工技术学报, 2008, 23(1): 90-96.
- [7] 曹雷, 张建成. 光伏并网系统隔离变压器联接方式的应用研究[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(7): 84-88.
- [8] Roiu D, Bojoi R. Control design and dynamic analysis for three phase PWM rectifiers under unbalanced voltage dips conditions[C]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009: 308-314.
- [9] Ion Etxeberria-Otadui, Unai Viscarret, Alfred Rufer. New optimized PWM VSC control structures and strategies under unbalanced voltage transients[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 54(5): 2902-2914.
- [10] Teodorescu R, Blaabjerg F, Liserre M. Proportional-resonant controllers and filters for grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Proceedings-Electric Power Applications, 2006, 153(5): 750-762.
- [11] Amin Hasanzadeh, Omer C Onar, Hossein Mo. A proportional-resonant controller-based wireless control strategy with a reduced number of sensors for parallel-operated UPS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(1): 468-478.
- [12] Hornik T, Zhong Q-C. Control of grid-connected DC-AC converters in distributed generation experimental comparison of different schemes[C]. IEEE Power Electronics Controllers For Power Systems, 2009: 271-278.

(收稿日期: 2017-06-28) **EA**