

单相光伏并网逆变器控制技术的研究

分析了单相两级式光伏并网逆变器的控制策略。前级DC/DC变换器主要用于最大功率点追踪(MPPT)，并介绍了一种有别于多数MPPT的控制方法，即首先给定最大功率点处的电压值，将检测到的太阳能电池板的输出电压和电流通过双环控制来实现MPPT；后级DC/AC变换器采用全桥电路，在传统PI+P调节的基础上引入比例谐振(PR)调节，分析了其良好的动态性能。最后根据所采用的控制方法，搭建了基于Saber软件的系统模型并给出了输出波形，从而也验证了前后级控制方法的可行性。

陈以明/盐城供电公司

0 引言

单相两级式光伏并网逆变器一般由DC/DC升压电路和DC/AC逆变电路组成^[1]。它与单级式相比，虽然结构复杂，但其前、后级可分开控制，且容易实现；另外，前级DC/DC变换器可根据不同的太阳能电池板输入电压而选用不同的拓扑结构，应用上较单级式相对灵活。然而，两级式光伏并网逆变器若要实现前级和后级的功率解耦，需要有一个稳定的直流母线电压。

单相两级式光伏并网系统图如图1所示。前级完成最大功率点追踪

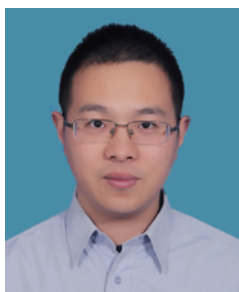
(MPPT)，后级DC/AC则需要承担起稳定直流母线电压和输出并网的任务^[2]。

由于太阳能电池板的表达式是一个非线性时变函数，而Boost电路的输出又靠后级控制得到，很少有文献对前级建模进行研究^[3]，而基于Saber平台的仿真研究少之又少，本文以此为出发点进行逐级研究和仿真。

1 DC/DC级模型的建立

在建立前级模型之前，需要先确定太阳能电池板的参数，根据文献[3]提出的模型搭建方法，本文先在Matlab中搭建光伏电池板的输出特性方程并进行仿真。

设定单块太阳能电池板参数为： $V_{oc}=29.2\text{ V}$ ， $I_{sc}=8.09\text{ A}$ ， $V_m=23.6\text{ V}$ ， $I_m=7.42\text{ A}$ 。其中， V_{oc} 为太阳能电池板的开路电压； I_{sc} 为太阳能电池板的短路电流； V_m 为太阳能电池板最大功率点处的电压； I_m 为太阳能电池板最大功率点处的电流。选用10块太阳能电池板作为一组串联，然后再将三组进行并联，组成一个光伏阵列。光伏阵列的 $P-V$ 特性曲线



陈以明/工程师

关键词/Keywords

MPPT ·
逆变器 ·
Saber ·
PR调节 ·

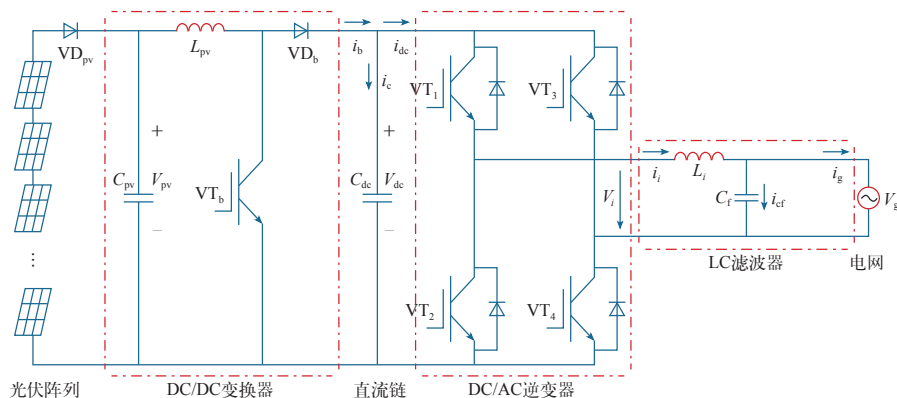


图1 单相两级式光伏并网系统示意图

仿真如图2所示。

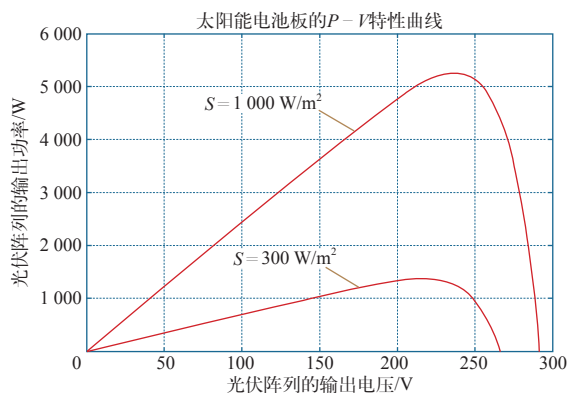


图2 光伏阵列的 $P-I$ 特性曲线

从图2中可以看出,随着光照强度增加,最大功率输出和开路电压均有增加。在光照强度为 300 W/m^2 时光伏阵列的输出功率大约为 $1\,400\text{ W}$,在 $1\,000\text{ W/m}^2$ 下约为 $5\,300\text{ W}$ 。

1.1 基于Saber仿真模型的建立

DC/DC变换器选用Boost电路来实现MPPT,由于前级变换器只实现最大功率输出,那么从另一个角度来实现最大功率点追踪,即事先知道太阳能电池板的参数及其配置,通过环路控制来将光伏阵列的输出电压稳定在最大功率点处所对应的值。环路控制框图如图3所示。

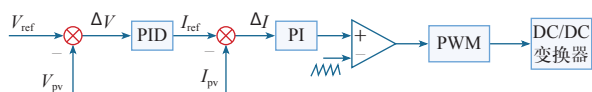


图3 DC/DC变换器的控制框图

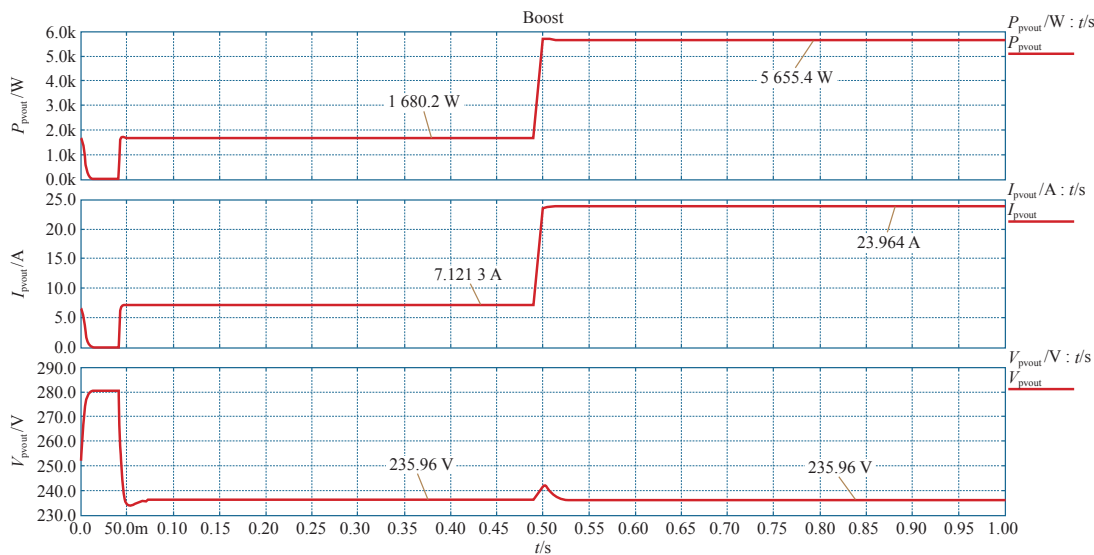


图4 太阳能电池板的电气输出曲线

将给定太阳能电池板在最大功率点处对应的电压值 V_{ref} 与实测太阳能电池板的输出电压 V_{pv} 进行比较,其误差经过PID调节后,得到太阳能电池板输出电流的参考值 I_{ref} ,然后跟实际输出电流比较,将误差进行PI调节后,再与三角载波比较,进而得到驱动Boost电路开关管的PWM波。由于DC/DC变换器的母线电压靠后级进行稳压,所以在仿真中用了一个直流源表示。

1.2 基于Saber平台的电路仿真结果

太阳能电池板的参数设计参照上述介绍,同时将仿真中太阳能电池板的电压给定值设定在 236 V 。从图2可以看出,光照变化前后 V_m 略有变化,本文忽略其变化,设为恒定值。光照强度开始时设为 300 W/m^2 ,当运行 0.5 s 后突然变化到 $1\,000\text{ W/m}^2$,太阳能电池板的输出电压、电流以及功率曲线如图4所示。

由图4可以看出,太阳能电池板的输出电压在光照变化前基本稳定在 235.96 V ,当光照发生变化后,其输出电压也被稳定在了 235.96 V 。光照变化前,太阳能光伏阵列追踪到的最大功率通过加载水平线的方法测得为 $1\,688.4\text{ W}$ 。光照发生变化后,追踪到的稳定输出功率为 $5\,655.4\text{ W}$,跟图2在Matlab中搭建的仿真结果比较略微大了 200 W ,原因是Matlab所搭建的工程模型忽略了光伏电池板的内阻,再加上公式简化,在输出电压等级较高

时,跟Saber中较为精确的模型相比会有一些的误差。但从结果中可以验证该控制方法的可行性和准确性。

2 逆变并网的控制策略

后级的DC-AC部分,采用单相全桥电路完成逆变器向电网输送功率。根据并网对逆变器输出的要求,本文采用双闭环控制方式。传统的基于PI、PR调节的双环控制虽然简单,但PI控制对正弦的参考电流很难达到控制效果^[4]。当输出滤波器的电容较大时系统可能发生振荡。因此,为克服其不足,采用基于比例谐振(PR)调节的环路控制结构^[5-6]。

2.1 逆变电路控制方法

双闭环的外环为直流电压控制,通过PI调节稳定直流侧电压来实现逆变器输入、输出能量的平衡;电流内环的电流幅值参考值 I_m^* 由直流电压外环调节器的输出给定,通过检测获得电网电压相位角 θ ,并由 $\sin \theta$ 、 I_m^* 的乘积获得瞬时输出电流的参考信号 i_L^* 。为了抑制电网电压的扰动,采用了电网电压前馈控制,电流环的输出与电网电压的前馈信号叠加后,经过SPWM调制输出驱动信号来控制逆变桥的开关管,以实现单相逆变器的并网控制。系统控制框图如图5所示。

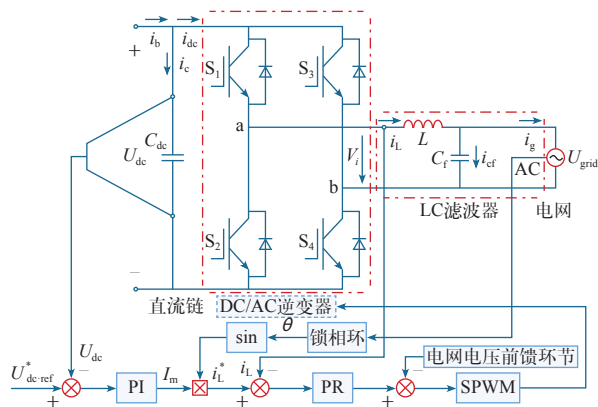


图5 基于PI、PR调节的单相并网系统双环控制结构图

PR调节器的传递函数为

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (1)$$

忽略线路内阻以及开关损耗等,由图5取 i_L 为

状态变量,有基本关系式,即

$$L \frac{di_L}{dt} = u_{ab} - u_{grid} \quad (2)$$

根据调制原理可得

$$u_{ab} = \frac{v_r}{V_m} U_{dc} \quad (3)$$

式中, v_r 为逆变器正弦波调制波; V_m 为高频三角载波幅值。

对式(2)进行拉普拉斯变化,得

$$I_L(s) = \frac{1}{sL} [U_{ab}(s) - U_{grid}(s)] \quad (4)$$

构造系统闭环传递函数,如图6所示。

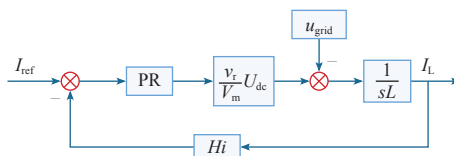


图6 逆变电路传递函数结构图

不考虑电网电压的影响,设定直流母线电压为360 V,逆变电感为1 100 μF,采样倍数为0.05,三角载波幅值为3,调节PI、PR参数。电流环的传递函数为

$$G_{i2}(s) = G_{PR}(s) \frac{V_{bus}}{V_m} \frac{1}{sL} H_i \quad (5)$$

求其Bode图,如图7、图8所示。

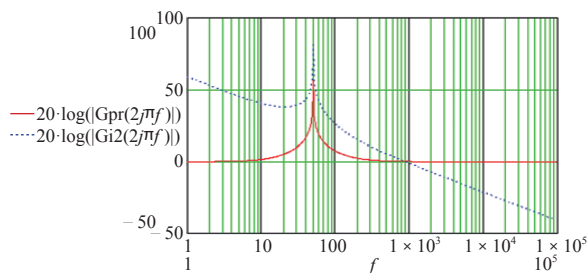


图7 基于PR调节电流环幅频特性曲线

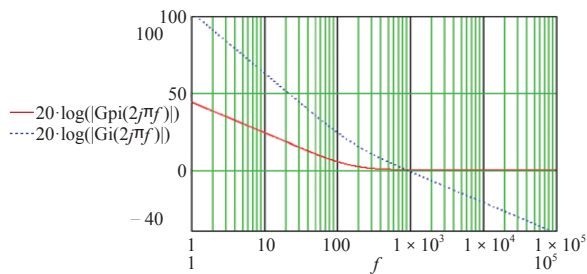


图8 基于PI调节电流环幅频特性曲线

2.2 系统建模及仿真结果

根据前级Boost电路的控制方法,结合图6给出的控制框图,对整个系统搭建Saber仿真模型。

系统运行后的输出结果如图9所示。可以看出被控量电感电流在光照扰动出现后经过一个周期

的调节就能迅速稳定运行,实际电感电流与给定电流的误差的平均值几乎为零,而基于PI调节的电流环误差的输出是一个有差值的包络周期函数。新的控制方法的动态响应较快,有一个稳定的并网电流以及并网功率。

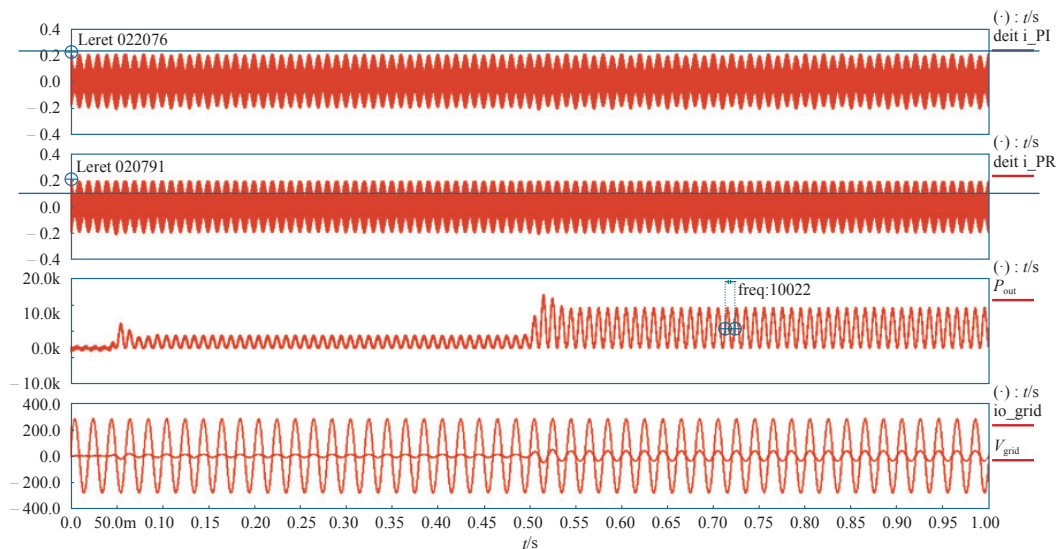


图9 光伏并网系统的输出波形

3 结束语

通过在Matlab中搭建和仿真太阳能电池板的工程应用模型,得到其在不同光照下的最大输出功率。在此数据背景下对单相两级式光伏并网逆变器逐级进行了基于Saber软件的建模和仿真。前级Boost电路采用事先给定最优点处的电压,通过电压外环、电流内环的控制模式获得最大功率的输出,从仿真结果中可以看出,该方法实现了对太阳能电池板的最大功率追踪;后级DC/AC利用全桥逆变电路,对比传统PI、PR调节方法得到被控量与采样值的误差,可知改为PI、PR调节可有效地实现对并网电流的无静差控制。最终采用此方法实现了逆变器的输出稳定地跟踪电网电压的频率和相位,满足了并网对逆变器的要求,尤其在光照发生变化时也能够快速准确地进行调节并网,从而验证了该系统所采用的控制方法的可行性。

参考文献

- [1] 程军照, 吴夕科, 李澍森, 等. 采用Boost的两级式光伏发电并网逆变器系统[J]. 高电压技术, 2009, 35(8): 2048-2052.
- [2] 余运江. 单相光伏并网逆变器的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [3] 蔡文皓, 任辉, 李云, 等. 新型MPPT算法在两级式光伏并网系统中的应用[J]. 可再生能源, 2012, 30(5): 109-112.
- [4] 唐欣, 罗安, 涂春鸣. 基于递推积分PI的混合型有源电力滤波器电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 38-41.
- [5] 张兴, 曹仁贤. 太阳能光伏并网发电及其逆变并网控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [6] Hong-Seok Song, Roger Keil, Peter Mutschler, et al. Advanced control scheme for a single-phase PWM rectifier in traction applications[C]. IEEE 38th IAS Annual Meeting, Salt Lake City, USA, 2003.

(收稿日期: 2017-06-07) **EA**