文章编号:1005-0523(2013)01-0010-05

直接功率控制在三相光伏并网系统中的研究

宋平岗[1],王 锴[1],兰 洁[2],李 澄[1]

(1. 华东交通大学电气与电子工程学院,江西 南昌 330013; 2. 华南师范大学数学科学学院,广东 广州 510631)

摘要:逆变器的控制在光伏并网系统中起着核心的作用,在三相光伏并网系统的基础上对并网逆变器提出了一种直接功率控制的方案。直接功率控制(DPC)仅需要测量交流侧的电压与电流,通过坐标转换,计算出瞬时有功功率与无功功率,得到的结果分别与PI调节得到的参考有功功率以及给定无功功率进行比较,经过滞环比较器,开关表等环节来控制并网变流器。Matlab/Simulink仿真结果表明,并网逆变器直接功率控制方法简单,并网功率因数接近于1,电流谐波小,具有良好的动态和稳态性能。

关键词:逆变器;三相光伏并网;直接功率控制;开关表

中图分类号:TM464 **文献标志码**:A

随着能源危机以及环境污染日益严重,以太阳能为代表的可再生清洁能源逐渐成为研究重点。光伏系统在并网中容易产生诸多问题,例如并网电流的谐波污染严重,谐波污染将会给相邻通信设备带来电磁干扰而引起误操作、加快电力设备老化、增加电能损耗,严重时会给电网的安全运行带来威胁。因此为了维护电网的安全,实现低谐波含量的并网电流,需要采用有效可行的方法对并网谐波进行有效抑制。

文献[1]对三相脉冲宽度调制(PWM)整流器进行了数学建模,分析了电压定向DPC控制系统的原理,通过Matlab/Simulink仿真验证了三相PWM整流器的直接功率控制能够有效抑制谐波、功率因数高。文献[2]对滑模变结构的直接功率控制技术进行了研究,验证了滑模变结构相对于PI控制系统具有更强的抗网侧电压扰动能力。文献[3]在静止坐标系下PWM整流器的瞬时功率的基础上,提出了一种新型的准直接功率控制,实现了PWM整流器运算量小、动态响应迅速又简便可靠的控制。

并网逆变器是将光伏系统产生的直流电转换为并网交流电的关键设备,选择有效的并网逆变器控制策略能够有效减小谐波污染,传统的电压、电流双环控制不仅结构、控制复杂,而且电压、电流动态响应速度慢,直接功率控制(DPC)是对瞬时有功与无功的直接控制,本文将DPC策略应用于三相光伏并网系统中,实现了并网系统功率因数接近于1、电流谐波小、电流、电压快速动态响应以及稳态性能。

1 光伏并网系统数学模型

1.1 光伏数学模型

太阳能电池是光伏系统(PV)系统主要部分,它将太阳能转化为电能从而被利用。其等效电路如图1所示。

I_{ph} 为光伏电池输出短路电流, I_d 为二极管结电流, C_f 为结电容, R_s 为串联等效电阻, R_{sh} 为并联等效电阻。忽略 R_s, C_f ,可得太阳能电池输出电压 u 与输出电流 I 满足:

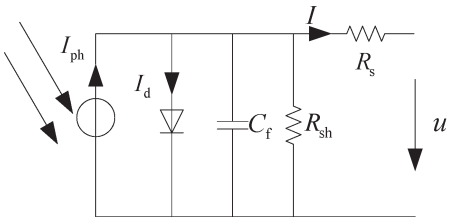


图1 光伏电池等效电路

Fig.1 Photovoltaic battery equivalent circuit

收稿日期:2012-10-28

作者简介:宋平岗(1965—),男,教授,博士,研究方向为电力电子与可再生能源。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$I=I_{\mathrm{ph}}-I_0\left\{\exp\left[\frac{q(u+R_sI)}{nkT}\right]-1\right\}-\frac{u+R_sI}{R_{\mathrm{sh}}} \tag{1}$$

式中：q 为单位电荷；I_0 为反向饱和电流；n 为调整系数；k 为波尔兹曼常；T 为PN结绝对温度。

1.2　三相光伏并网系统数学模型

三相光伏并网系统结构简图如图2所示。

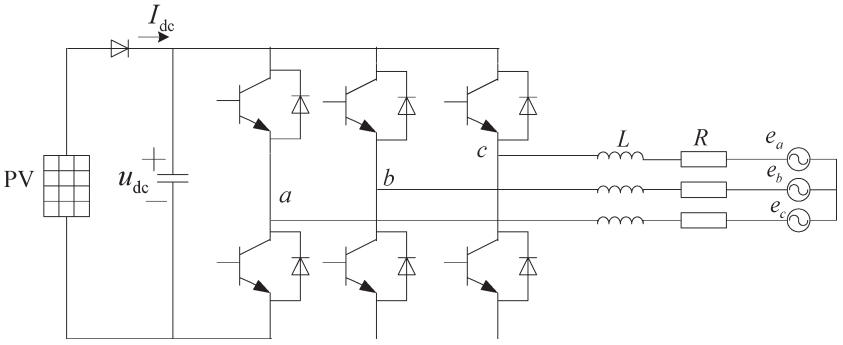


图2　三相光伏并网电路图

Fig.2　Three-phase photovoctaic gricd-connected diagram

根据电路原理，可以得到其状态空间方程如式(2)。

$$\left.\begin{aligned}
\dot{i}_a&=-\frac{R}{L}i_a-\frac{1}{L}e_a+\frac{u_{\mathrm{dc}}}{3L}(-T_1-T_2+2T_3)\\
\dot{i}_b&=-\frac{R}{L}i_b-\frac{1}{L}e_b+\frac{u_{\mathrm{dc}}}{3L}(-T_1-T_2+2T_3)\\
\dot{i}_c&=-\frac{R}{L}i_c-\frac{1}{L}u_c+\frac{u_{\mathrm{dc}}}{3L}(-T_1-T_2+2T_3)\\
\dot{u}_{\mathrm{dc}}&=\frac{1}{C}I_{\mathrm{dc}}-\frac{1}{C}(i_aT_1+i_bT_2+i_cT_3)
\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

式中：e_a，e_b，e_c 分别为三相交流电压；i_a，i_b，i_c 分别为三相电流；R 为每相等效电阻；L 为每相滤波电感；C 为直流侧电容；i_{dc} 为直流侧的输出电压；$T_i(i=1,2,3)$ 表示变流器各桥臂的通断情况，T_i 等于1时上桥臂导通，下桥臂关断，T_i 等于0反之。

2　光伏并网直接功率控制原理及其数学模型

从能量的角度来看，当交流电压给定时，如果PWM整流器的瞬时功率可以控制在允许范围内，那么瞬时电流可以通过间接控制在允许的范围内，这种控制策略就叫做直接功率控制(DPC)。

2.1　基于直接功率控制的三相光伏并网方框图

图3为光伏并网DPC系统框图，光伏并网系统主要包括最大功率点跟踪(MPPT)、直流变直流(DC/DC)转换、直流交流(DC/AC)转换，其中DC/AC转换由DPC控制实现，DPC控制系统主要由直流电压外环和功率控制内环组成，直流侧电压、瞬时有功、无功功率的闭环调节均采用PI调节器，瞬时有功功率给定值 p_{ref} 由直流侧电压PI调节器的输出乘以直流侧电压得到。为了实现网侧单位功率因数运行，因此设置给定无功功率为 $q_{\mathrm{ref}}=0$，通过查表得到 S_a，S_b，S_c（S_a，S_b，S_c 为变流器各桥臂的开关状态），从而控制逆变器上桥臂与下桥臂开关导通。

2.2　并网系统DC/DC侧

PV模块由扰动观察法实现最大功率点跟踪，通过boost电路实现DC/DC升压。得到的升压电压通过变流器与电网连接。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

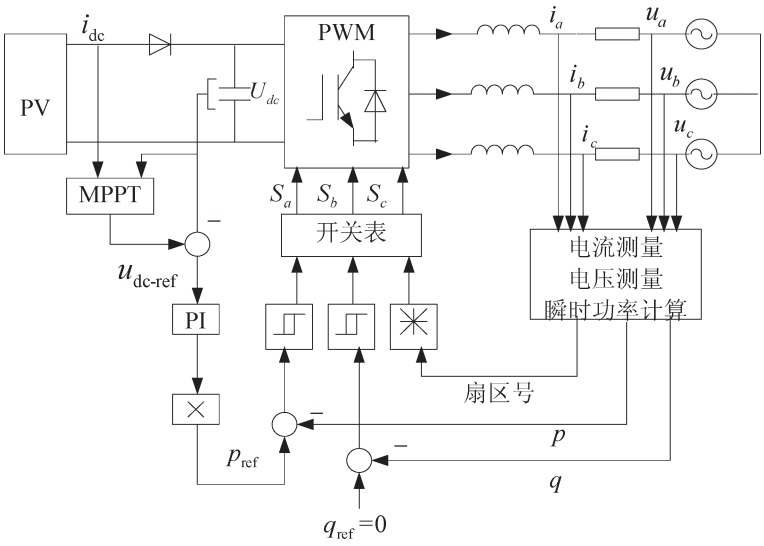


图3 直接功率控制的光伏并网结构图

Fig.3 Photovoltaic grid-connected of DPC structure diagram

2.3 直接功率控制主要环节的实现

1）功率的计算。在 $\alpha-\beta$ 静止坐标系下，计算瞬时有功功率 p 和无功功率 q 的公式如下：

$$\left.\begin{aligned} p&=ui=u_\alpha i_\alpha+u_\beta i_\beta\\ q&=ui=u_\beta i_\alpha-u_\alpha i_\beta \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

2）PI调节器的设计。假设 R 和开关损失忽略不计，系统稳定运行，可以得到

$$p=Cu_{dc}\frac{du_{dc}}{dt}+\frac{u_{dc}^2}{R_L} \tag{4}$$

其中，u_{dc} 为直流侧电压；R_L 为直流侧等效电阻；C 为直流侧电容。假设 $u_{dc}=u_{dc0}+\Delta u_{dc}$（$u_{dc0}$ 为直流侧电压 u_{dc} 的初始值），公式(4)可以等效为

$$p\approx Cu_{dc0}\left(\frac{du_{dc}}{dt}+\frac{u_{dc}}{R_LC}\right) \tag{5}$$

经过拉普拉斯变换，s 为复变量。可得

$$\frac{u_{dc}(s)}{p(s)}=\frac{R_L/u_{dc0}}{R_LCs+1} \tag{6}$$

由于功率内环的开关频率很高，功率内环等效为如下的惯性环节，其中 $G_p(s)$ 为功率内环传递函数，T_p 为功率内环时间周期

$$G_p(s)=\frac{1}{T_ps+1} \tag{7}$$

为了消除直流电压纹波，在控制系统中增加一个截止频率为 $1/T_c$ 的低通滤波器。T_c 为低通滤波器时间周期。

综合公式(6)和(7)，得到如图4的控制系统结构，其中 $G_{PI}(s)$ 为PI调节器的传递函数。

$G_{PI}(s)=K_p+\frac{K_i}{s}$，这样控制系统的开环传递函数是

$$G_{op}(s)=\frac{1}{T_cs+1}\left(K_P+\frac{K_i}{s}\right)\frac{1}{T_ps+1}\frac{R_L}{R_LCs+1} \tag{8}$$

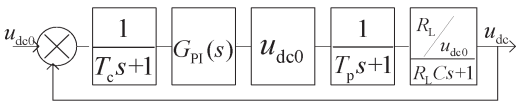


图4 DPC控制系统结构

Fig.4 The structure of DPC control system

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

其中:K_p为PI调节器比例常数;K_i为PI调节器积分常数。$T_p \ll T_c$,$T_p \ll R_L C$,功率内环惯性环节忽略不计,(8)式可以化简为

$$G_{op}(s)=\frac{(K_p s+K_i)R_L}{T_c s^2(R_L Cs+1)} \tag{9}$$

由上式可得PI调节器的参数的表达式为

$$\left.\begin{aligned} K_p &= \frac{0.6T_c}{R_L{}^2 C} \\ K_i &= \frac{0.12T_c}{R_L{}^3 C^2} \end{aligned}\right\} \tag{10}$$

通过公式(10)可以计算得到PI调节器的参数。

3) 开关表。开关表的输入端包括瞬时有功滞环比较值S_p、无功滞环比较值S_q以及扇区号n,扇区号由如下公式得到:

首先找到电网电压空间矢量$\boldsymbol{u}$的位置,由$\boldsymbol{u}_\alpha$,$\boldsymbol{u}_\beta$可得

$$\delta=\arctan\frac{\boldsymbol{u}_\beta}{\boldsymbol{u}_\alpha} \tag{11}$$

其中δ是矢量$\boldsymbol{u}$和α轴之间的角度。将空间电压矢量划分成12个扇区,得到图5所示的扇区空间编号。图5中θ_n由下面的等式来确定:

$$(n-1)\cdot\frac{\pi}{6}\leqslant\theta_n\leqslant n\cdot\frac{\pi}{6},\ n=1,2,3,\cdots,12 \tag{12}$$

瞬时有功、无功与给定有功、无功相比较后得到的值经过滞环比较器,瞬时有功滞器表的上下限取值为(-50,50),瞬时无功滞环器的上下限取值为(-10,10),如果超过最大值就输出1,小于最小值时就输出0。得到的值输入到开关表,通过查表输出得到变流器脉冲信号。直接功率控制所用的开关见表1。

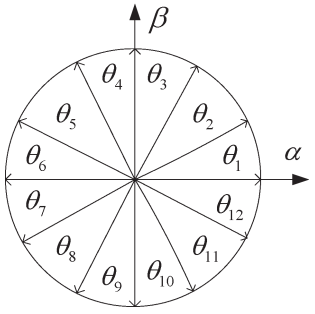


图5　直接功率控制扇区选择

Fig.5　DPC sector selection

表1　直接功率控制的开关表

Tab.1　Switch table of DPC

S_p	S_q	扇区编号											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	7	4	0	6	7	2	0	3	7	1	0	5
1	1	7	0	0	7	7	0	0	7	7	0	0	7
0	0	4	4	6	6	2	2	3	3	1	1	5	5
0	1	5	5	2	2	3	3	1	1	5	5	4	4

3　仿真结果分析

利用Matlab / Simulink7.10建立DPC模型,将交流侧电压峰值设置为110 V,直流侧电压为200 V,PI调节器参数为$K_p=0.6$,$K_i=16$,仿真结果如图6,7所示。

由图6可知,网侧电流波形正弦度良好,电流与电压相位相同。电流在很快的时间内就达到了稳定值,系统的动态响应速度快。

由图7可知,瞬时有功功率在1 300 W左右,而瞬时无功功率在0 Var左右,因此,功率因数接近于1。瞬时有功以及无功功率很快就接近给定值,动态响应速度快。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

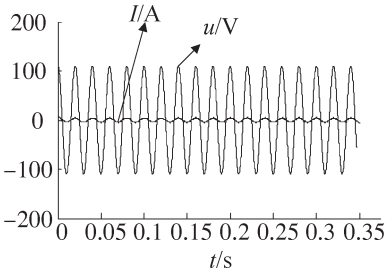


图6 网侧a相电压和电流波形

Fig.6 Wavefom of grid side a phase voltage and current

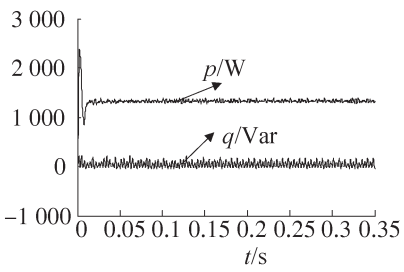


图7 瞬时有功和无功功率

Fig.7 Instantaneous active and reactive power

4 总结

并网逆变器的控制策略是实现光伏并网的核心环节，将直接功率控制应用于光伏并网逆变器中，通过仿真结果可以得到直接功率控制符合网侧变流器运行的指标，证实了该控制策略在光伏并网系统中的可行性。对光伏并网具有一定的意义。

参考文献：

[1] 郑征，王聪，孔德宁. 三相PWM整流器直接功率控制的仿真研究[J]. 微电子学与计算机，2011，28(6)：47-52.

[2] 汪万伟，伊华杰，管霖. 三相电压型PWM整流器滑模变结构直接功率控制[J]. 华南理工大学学报，2009，37(11)：83-87.

[3] 王国君，吴凤江，孙力. 两种PWM整流器直接功率控制策略性能对比[J]. 电力电子技术，2008，42(8)：62- 64.

[4] 张强，林都，任一峰，等. 电压型PWM 整流器直接功率控制系统的仿真研究[J]. 机床电机，2010，6(42)：4-7.

[5] 付志红，董玉玺，朱学贵，等. 直接功率控制的三相空间矢量脉宽调制整流器离散域建模[J]. 电网技术，2011，35(2)：32-37.

[6] 候荣均，王奔，赵思臣，等. 基于直接功率控制的AC-AC换流器控制策略研究[J]. 电测与仪表，2012，49(5)：60-64.

[7] 王继东，苏海滨，王玲花，等. 基于虚拟磁链直接功率控制的光伏并网逆变器控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制，2009，37(6)：80-83.

[8] 喻冲，肖潇. 双馈风机网侧变流器直接功率控制研究[J]. 华东交通大学学报，2010，27(11)：4-7.

[9] 陈诚，王勋，程宏波. 基于改进双闭环控制的光伏并网系统研究[J]. 华东交通大学学报，2012，29(5)：50-56.

[10] AKIRA S，TOSHIHIKO N. Voltage source PWM rectifier inverter based on direct power control and its operation characteristics[J]. IEEE Transactions On Power Electronics，2011，26(5)：56-61.

Direct Power Control of Three-phase Photovoltaic Grid-connected System

Song Pinggang[1]，Wang Kai[1]，Lan Jie[2]，Li Cheng[1]

(1. School of Electrical and Electronic Engineering，East China Jiaotong University，Nanchang 330013，China；2. School of Mathematical Sciences，South China Normal University，Guangzhou 510631，China)

Abstract：Inverter control plays a central role in the photovoltaic grid system. This paper poposes a direct power control scheme of grid-connected inverter on the basis of the three-phase photovoltaic grid system. This study measures the voltage and current of the AC side，calculates the instantaneous active and reactive power through coordinate conversion，then compares the results with respectively the reference active power obtained in PI regulator and given reactive power，and finally completes the grid inverter control by a lag ring comparator and switch table links. Matlab / Simulink simulation results show that the grid-connected inverter direct power control method is simple with good dynamic and steady performance，and network power factor is close to 1 with small current harmonics.

Key words：inverter；three-phase photovoltaic grid；direct power control；switch table

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net