

[控制系统]

基于精细化控制策略的分布式光伏并网仿真建模研究

文/中电普瑞科技有限公司 王珊丹

描述了分布式光伏发电的背景，并研究光伏并网原理，选定并网逆变器精细化控制策略为对象展开研究。分别对逆变器控制策略、静止坐标系下的数学模型、同步旋转坐标系下的数学模型进行研究。同时对电网电压定向矢量控制策略、P/Q控制策略作了详细的研究分析。最后建立模型情况及选定参数，并着重分析了基于电网电压定向矢量控制和P/Q控制方式下仿真结果分析对比，验证了其控制方法的合理性与可行性。

分布式光伏发电是一种清洁、环保、经济、高效和可靠的发电方式。它可以起到节约能源、削峰填谷、缓建输配电设备、减少线损和提高供电可靠性等经济效益的作用。对其进行建模和仿真研究，可以提高研发效率，降低研制成本。对电力系统进行仿真研究不但是电力系统动态分析与安全控制的基本工具，也是电力部门用来指导电网运行的基本依据，作为一种新兴的特殊的电力系统，更需要相关研究。此外，建模及仿真是实际应用的基础，因此，对系统进行建模与仿真

研究，具有重要的理论意义和实用价值，无论是研究其保护与控制问题，还是研究其规划设计问题，都需要强有力的仿真工具作为基础。

光伏系统数学模型

1. 光伏发电系统并网结构

光伏发电并网系统是指光伏电池阵列利用太阳能产生直流电流经过DC/DC变换器、逆变器变成交流电对本地负荷及电网供电。其系统结构图如图1所示。

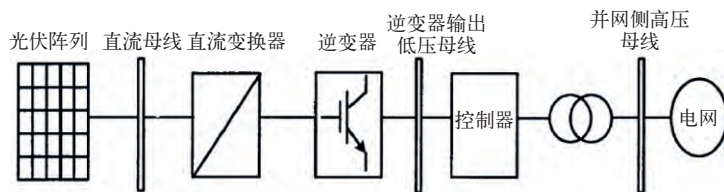


图1 光伏发电并网系统结构图

2. 光伏并网逆变器部分介绍

(1) 逆变器控制策略及简介

逆变器控制策略如下。

1) 基于电网电压定向矢量控制策略。该控制策略就是设定电流方向以电网电压空间矢量的方向为基准。

基于电网电压定向控制能否实现高性能稳

态运行和快速动态响应，很大程度上依赖于电流内环的设计。在同步旋转坐标系下设计电流内环，各交流分量均转换为直流量，便于闭环调节器的设计，同时可以很方便地与正弦脉宽调制（SPWM）或空间矢量脉宽调制（SVPWM）接口，有利于网侧滤波参数的设计，是目前应用最广泛的控制策略。其核心是直接控制并网电流跟

跟踪其参考指令值,之后通过坐标反变换以及脉宽调制得到开关驱动信号信息,从而实现逆变。该方法可以很好地保证控制系统的稳态和动态性能指标,并且并网电流质量受电网电压参数变化影响较小。图2即为电网电压定向控制框图。图3为以电网电压单相峰值点作为旋转角的零点,使 d 轴方向与电网电压矢量对齐,和 dq 坐标系下的矢量图。具体坐标变换会在下面以数学公式的形式具体展示。

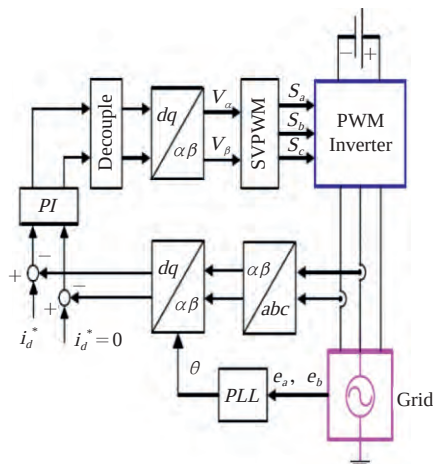


图2 电网电压定向控制框图

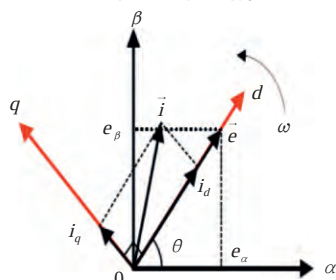


图3 dq 坐标系矢量图

2) P/Q 控制策略。在同步PI电流控制的并网逆变器中,控制系统由直流电压外环和有功、无功电流内环组成。直流电压外环的作用是为了稳定或调节直流电压,显然,引入直流电压反馈并通过一个PI调节器即可实现直流电压的无静差控制。由于直流电压的控制可通过控制 i_d 来实现,因此直流电压外环PI调节器的输出量即为有功电流内环的电流参考值,从而对并网逆变器输出的有功功率进行调节。无功电流内环的电流参考值是根据向电网输送的无功功率参考值而得。根据瞬时有功功率 p 、无功功率 q 分别为

$$p = 1.5(e_d i_d + e_q i_q) \quad (1)$$

$$q = 1.5(e_d i_q - e_q i_d) \quad (2)$$

基于电网电压定向时, $e_q = 0$,则上式可简化为

$$p = 1.5 e_d i_d \quad (3)$$

$$q = 1.5 e_d i_q \quad (4)$$

若不考虑电网电压的波动,即 e_q 为一定值,这表明并网逆变器的瞬时有功功率和无功功率仅与并网逆变器输出电流的 d 、 q 轴分量 i_d 、 i_q 成正比。这表明,如果电网电压不变,则通过 i_d 、 i_q 的控制就可以独立控制并网逆变器的有功、无功功率。由式(3)和式(4)可知,经过简单的计算就可以根据系统需要的有功功率、无功功率得到 d 、 q 轴分量 i_d 、 i_q 。因此,可以直接通过给定的有功功率 P_{ref} 、无功功率 Q_{ref} 控制光伏并网逆变器的有功、无功功率输出。图4为 P/Q 控制的分布式发电单元,图5为 P/Q 控制的控制框图。

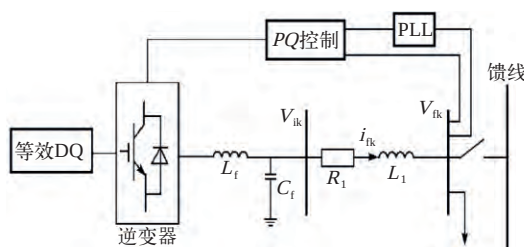


图4 P/Q 控制的分布式发电单元

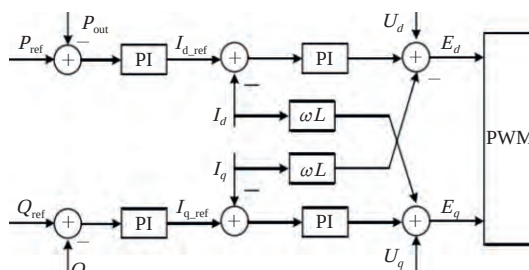


图5 P/Q 控制框图

光伏并网逆变器等效电路如图6所示。图6中, e_x 为电网侧相电压; i_x 为并网电流; u_x 为逆变器交流侧输出相电压, $x=a, b, c$; u_{dc} 为中间直流电压; i_{dc1} 为逆变器直流侧输入电流; i_{dc2} 为输出电流; n 点为电源中点; O 点为直流侧中点; e_x 、 u_x 均为相对电源中点电压; L 为滤波器的等值电感; R 为考虑滤波电感内部的等值电阻、线路电阻及开关器件死区效应的综合等效电阻; C 为直流侧电容。

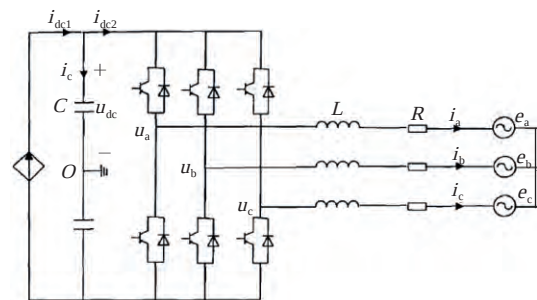


图6 光伏并网逆变器等效电路

(2) 静止坐标系下的数学模型

首先定义二值逻辑开关函数： $s_x = 1$ 表示x相上桥臂导通，下桥臂关断； $s_x = -1$ 表示x相上桥臂关断，下桥臂导通。由图6可得到光伏并网逆变器在三相静止坐标系下的方程如式(5)所示。

$$\begin{cases} Ri_a + L \frac{di_a}{dt} = (u_{a0} + u_{on}) - e_a \\ Ri_b + L \frac{di_b}{dt} = (u_{b0} + u_{on}) - e_b \\ Ri_c + L \frac{di_c}{dt} = (u_{c0} + u_{on}) - e_c \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = i_{dc1} - i_{dc2} \end{cases} \quad (5)$$

当a相上桥臂导通，下桥臂关断时， $s_a = 1$ ；且 $U_{a0} = U_{dc}$ ，当a相上桥臂关断，下桥臂导通时， $s_a = -1$ ，且 $U_{a0} = -U_{dc}$ ，因此有 $U_{a0} = s_a U_{dc}$ ，同理有 $U_{b0} = s_b U_{dc}$ ， $U_{c0} = s_c U_{dc}$ ，将其代入式(1)，得

$$\begin{cases} Ri_a + L \frac{di_a}{dt} = (s_a u_{dc} + u_{on}) - e_a \\ Ri_b + L \frac{di_b}{dt} = (s_b u_{dc} + u_{on}) - e_b \\ Ri_c + L \frac{di_c}{dt} = (s_c u_{dc} + u_{on}) - e_c \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = i_{dc1} - \frac{s_a i_a + s_b i_b + s_c i_c}{2} \end{cases} \quad (6)$$

对于三相对称系统，有

$$\begin{cases} e_a + e_b + e_c = 0 \\ i_a + i_b + i_c = 0 \end{cases} \quad (7)$$

将式(6)、式(7)式联立得

$$u_{on} = -\frac{1}{3}(s_a + s_b + s_c)u_{dc} \quad (8)$$

将式(8)代入式(6)得

$$\begin{cases} Ri_a + L \frac{di_a}{dt} = u_{dc} (s_a - \frac{1}{3} \sum_{k=a,b,c} s_k) - e_a \\ Ri_b + L \frac{di_b}{dt} = u_{dc} (s_b - \frac{1}{3} \sum_{k=a,b,c} s_k) - e_b \\ Ri_c + L \frac{di_c}{dt} = u_{dc} (s_c - \frac{1}{3} \sum_{k=a,b,c} s_k) - e_c \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = i_{dc1} - \frac{s_a i_a + s_b i_b + s_c i_c}{2} \end{cases} \quad (9)$$

可以看出，由此得到的采用开关函数描述的数学模型中含有时变的交流量，给控制系统的设计带来了困难。因此，可将式(9)由三相静止坐标系转换到以电网角频率同步旋转的dq坐标系中，将三相基波交流物理量变换为直流量，简化控制系统的设计。

(3) 同步旋转坐标系下的数学模型

将dq坐标系的d轴定向于电网电压矢量方向

时，其坐标转换矩阵为

$$C_{3s/3r} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \\ -\sin \omega t & -\sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

这样可以推得，光伏并网逆变器在dq坐标系下的数学模型为

$$\begin{cases} Ri_d + L \frac{di_d}{dt} = s_d u_{dc} + e_d + \omega L i_q \\ Ri_q + L \frac{di_q}{dt} = s_q u_{dc} - e_q + \omega L i_d \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = i_{dc1} - \frac{2}{3}(s_d i_d + s_q i_q) \end{cases} \quad (11)$$

当电网三相对称且稳态运行时，式(11)中的各电压、电流分量均为直流量，而开关函数 s_d 和 s_q 中，既包含直流分量又包含高频分量，用 $\bar{s}_d$ 和 $\bar{s}_q$ 分别表示开关函数中的直流分量，可得逆变器交流侧输出基波电压的dq分量分别为

$$\begin{cases} u_d = \bar{s}_d u_{dc} \\ u_q = \bar{s}_q u_{dc} \end{cases} \quad (12)$$

考虑三相平衡系统时，设三相并网逆变器的网侧基波电压、电流分别为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} E_m \cos \omega t \\ E_m \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \\ E_m \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} I_m \cos(\omega t - \varphi) \\ I_m \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi) \\ I_m \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

式(13)中， E_m 为电网基波电压幅值， I_m 为网侧基波电流幅值； ω 为电网基波角频率； φ 为功率因数角。

可以推得

$$\begin{cases} e_d = E_m \\ e_q = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} i_d = I_m \cos \varphi \\ i_q = -I_m \sin \varphi \end{cases} \quad (14)$$

对于三相平衡系统，并网逆变器输出到电网的有功、无功功率可表示为

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} E_m I_m \cos \varphi = \frac{3}{2} e_d i_d \\ Q = \frac{3}{2} E_m I_m \sin \varphi = -\frac{3}{2} e_d i_q \end{cases} \quad (15)$$

由式(15)可知当电网电压幅值不变时,光伏并网系统输送到电网的有功 P 只与 i_d 有关,无功 Q 只与 i_q 有关。因此,可以通过分别控制 i_d 、 i_q 的大小控制有功、无功功率,这就实现了有功功率与无功功率的解耦。忽略开关器件的开关损耗和滤波器上的有功损耗,由并网逆变器输出到电网的有功功率和直流侧有功功率的平衡关系可得

$$2u_{dc}i_{dc2} = \frac{3}{2}e_d i_d \tag{16}$$

由式(16)可知,在直流侧电压和电网电压恒定时并网逆变器输出到电网的有功功率取决于逆变器直流侧输出电流的大小。

建立模型及参数情况

1. 基于电网电压定向矢量控制策略模型

利用MATLAB/SIMUINK针对100 kW光伏并入400 V配电网的情况进行搭建,其中模型模块部分分为光伏电池模块、MPPT最大功率跟踪模块、DC/DC Boost升压模块、逆变器模块、Chopper模块、滤波模块(L滤波器)、测量模块、负荷模块、故障模块和电网模块。

2. P/Q控制模型

P/Q控制模型与基于电网电压定向矢量控制策略的模型的区别仅在于控制策略的不同。

3. 参数列表

1) 光伏电池参数列表如表1所示。

表1 电动机与变压器匹配						
电源 参数	温 度	光强	短路	开路	最大功率	最大功率
	/℃		电 流	电 压	点 电 流	点 电 压
数值	25	随机 变化	297.6 /A	420 /V	277.6 /A	360 /V

2) Boost升压模块参数列表如表2所示。

表2 Boost电路参数		
电感电容参数	电感/H	电容/F
数值	0.005	0.003

3) 基于电网电压定向的矢量控制参数列表如表3所示。

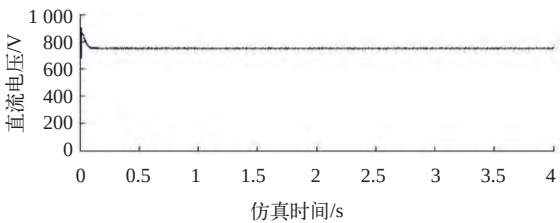
表3 基于电网电压定向的矢量控制参数			
直流母线电压 /V	变频器控制信号 产生方式	调制信号 频率/Hz	三角载波 频率/Hz
750	SPWM	3 300	1 600

4) Chopper模块参数列表如表4所示。

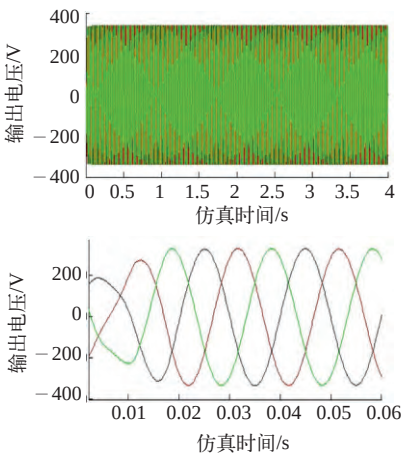
表4 Chopper电路参数		
直流电压 侧触发条件	交流电流 侧触发条件	投入crowbar的耗能 电阻值/Ω
实际电压值大于 $1.2U_{ref}$	实际电流值大于 $2I_{ref}$	0.2

稳态模型仿真

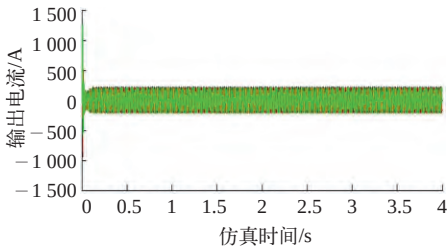
基于电网电压定向矢量控制策略的仿真图如图7所示。



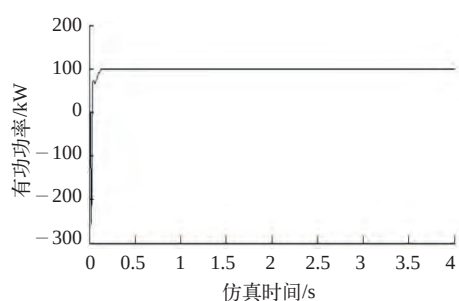
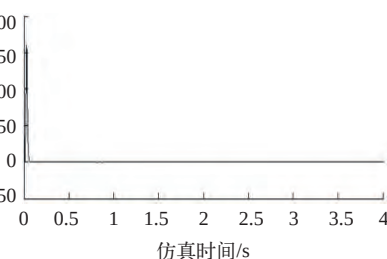
(a) 光伏电源输出的直流侧电压波形



(b) 逆变器输出的三相电压波形



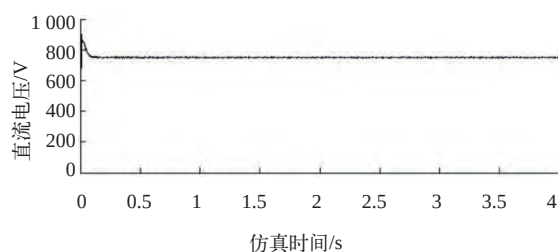
(c) 逆变器输出的三相电流波形



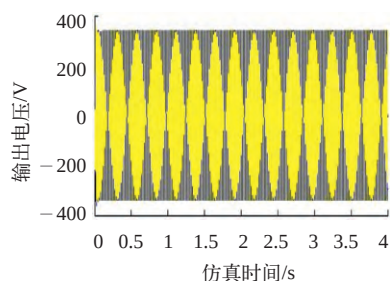
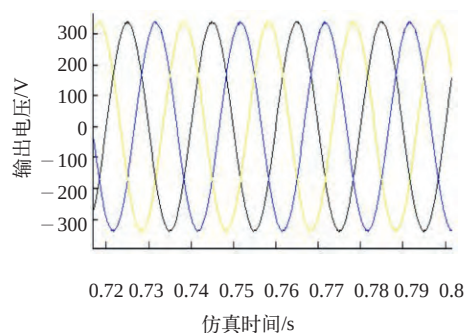
(d) 逆变器输出的有功功率和无功功率波形

图7 基于电网电压定向的矢量控制策略稳态仿真结果图

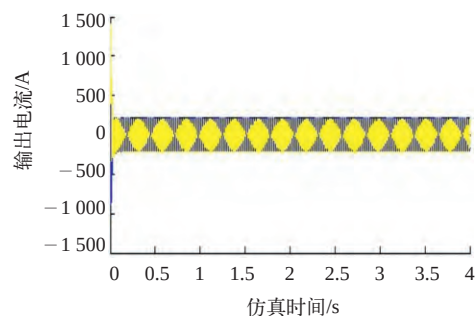
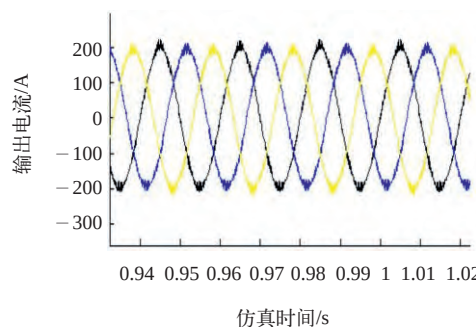
P/Q 控制策略仿真图如图8所示。



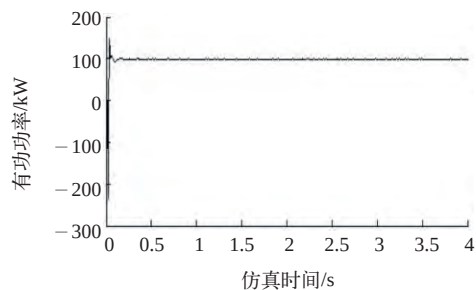
(a) 光伏电源输出的直流侧电压波形



(b) 逆变器输出的三相电压波形



(c) 逆变器输出的三相电流波形



(d) 逆变器输出的有功功率和无功功率波形

图8 P/Q 控制策略稳态仿真结果图

结束语

对于光伏并网的稳态情况，从仿真结果来看，输出电流、电压稳定，直流母线电压可以很快进入稳定的直流状态，同时，有功功率保持 100 kW，无功功率保持 0 kvar，实现了单位功率因数输出。因此，判定两种模型的控制策略是正确的。EA

(收稿日期：2015.10.21)

(编辑：刘群立)