

# 基于电流解耦控制的光伏并网系统仿真分析

张琪祁, 徐 政

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 光伏并网发电是太阳能利用的重要途径, 而并网逆变器结构的选择和控制策略的改进是其研究的重点。在 PSCAD/EMTDC 平台上搭建了单级三相光伏并网系统的仿真模型, 仿真模型中的并网逆变器采用双闭环的控制策略, 其中电流内环根据非线性控制理论中反馈线性化的思想, 实现电流的解耦控制, 电压功率外环采用 PI 控制。仿真结果表明: 该控制策略不仅控制精度高, 稳定工作域大, 并且必要时能在一定范围内对配网的无功进行调节, 提高配网稳定性。

**关键词:** 光伏系统; 并网逆变器; 电流解耦控制; PSCAD/EMTDC; 无功调节

**中图分类号:** TM615

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-4551(2010)11-0095-04

## Simulation analysis of a grid-connected PV system based on current decoupled controlling

ZHANG Qi-qi, XU Zheng

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Grid-connected photovoltaic (PV) system is considered as an important part of the solar energy. Aiming at grid-connected inverter's structure and control strategy of PV systems, a single-stage three-phase grid-connected PV system with double closed-loop controlling was established in PSCAD/EMTDC. According to the theory of the feedback linearization of nonlinear system, a current decoupled controller based on input-output variable feedback linearization was designed as current inner loop, PI controllers were used in the outside loop. The simulation results verify that the control strategy has high control accuracy, great stability domain. Meanwhile, the grid-connected PV systems can regulate reactive power in certain range to improve the stability of distribution network.

**Key words:** photovoltaic (PV) system; grid-connected inverter; current decoupled controlling; PSCAD/EMTDC; reactive power regulation

## 0 引 言

气候变化和能源危机已成为全人类共同面临的问题。建设和发展智能电网被认为是一种有效的节能减排的途径<sup>[1-2]</sup>, 包含太阳能在内的清洁可再生能源的大力开发和利用。光伏并网发电系统是太阳能利用的重要方式, 主要包括太阳能光伏电池阵列、控制器和逆变器等部件, 其核心环节为并网逆变器<sup>[3-4]</sup>。

对逆变器的研究重点在于其结构的选择和控制策略的改进。按能量转换的级数来划分, 逆变器结构包括单级式无变压器结构、单级式带工频变压器结构、多级式结构等类型, 不同结构的逆变器主要在体积、灵活性、损耗等性能上有所不同, 其选择关系到逆变器的效

率和成本<sup>[5]</sup>。逆变器的控制包括光伏阵列工作点跟踪控制、逆变器跟踪电网控制、孤岛效应的检测与控制等具体内容, 对不同控制策略的选择影响到光伏并网稳定性和电能质量等<sup>[6]</sup>。

目前针对光伏并网系统开展仿真研究的软件以 Matlab/Simulink 为主<sup>[7]</sup>, 较为单一。鉴于电力电子器件在光伏发电系统中的普遍应用, PSCAD/EMTDC 软件较适合开展光伏发电相关的仿真研究。文献[8]中利用该软件研究了光伏阵列和最大功率跟踪 (MPPT) 的仿真模型, 但未涉及光伏发电系统的交直流转换并网。

本研究在 PSCAD/EMTDC 平台上搭建了完整的单级三相光伏并网系统的仿真模型, 并针对该光伏并网系统进行时域仿真研究。

# 1 光伏并网逆变器的要求和控制策略

## 1.1 光伏并网对于逆变器的要求

逆变器必须包括以下基本功能以确保光伏阵列向电网馈电<sup>[9-10]</sup>:①将光伏阵列产生直流电转化成正弦交流电;②其输出电流与电网电压同频同相,即功率因数为 1。

针对第二点,有文献提出了不同的看法<sup>[11-12]</sup>:由于光伏并网系统的输出功率受光照强度、温度变化的影响,会造成含光伏发电系统的配电网电压经常性波动,因而可利用光伏发电系统对配电网进行无功补偿,提高电网的稳定性,以减少电网中配电电压/无功调节装置的频繁动作。

## 1.2 并网逆变器的控制策略

本研究采用的单级三相光伏并网逆变器是一个多变量、强耦合、非线性的系统。一般的控制技术很难达到理想的控制特性。本研究将电机控制领域中的电流内环,电压、功率外环的双闭环控制理论引入到光伏并网系统中。针对电流内环若采用 PI 调节技术,存在参数调试繁琐、系统稳定工作域小等缺点,本研究根据输入/输出反馈线性化思想的非线性控制理论,对电流内环采用解耦控制策略<sup>[13-14]</sup>。

### 1.2.1 电流内环反馈线性化控制

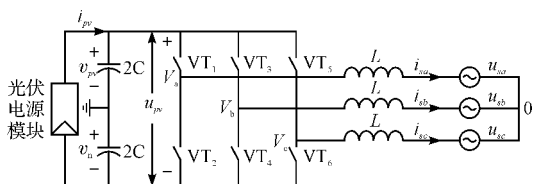


图 1 单级三相光伏并网逆变器主电路拓扑

单级三相光伏并网逆变器主电路拓扑结构如图 1 所示,当配网侧系统平衡时,同步旋转坐标系下逆变器的数学模型可以表示成下式:

$$\begin{cases} \frac{di_{sd}}{dt} = \frac{1}{L}u_{sd} - \frac{R}{L}i_{sd} + \omega \cdot i_{sq} - \frac{1}{L}S_d u_{pv} \\ \frac{di_{sq}}{dt} = \frac{1}{L}u_{sq} - \frac{R}{L}i_{sq} - \omega \cdot i_{sd} - \frac{1}{L}S_q u_{pv} \\ \frac{du_{pv}}{dt} = \frac{1}{C}S_d i_{sd} + \frac{1}{C}S_q i_{sq} - \frac{1}{C}i_{pv} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $u_{sd}, u_{sq}$ —配网电压的  $d, q$  轴分量;  $i_{sd}, i_{sq}$ —配网电流的  $d, q$  轴分量;  $S_d, S_q$ —同步坐标系下的开关函数 ( $S=1$  桥臂导通,  $S=0$  桥臂关断)。

现引入一组输入变量  $x_d, x_q$ , 这组变量与逆变器输出电流  $i_{sd}, i_{sq}$  之间呈线性解耦关系。根据逆变器的拓

扑结构,输出电流  $i_{sd}, i_{sq}$  由这组新的输入变量  $x_d, x_q$  来表示,且满足如下的关系式:

$$\begin{cases} \frac{di_{sd}}{dt} + \lambda_1 i_{sd} = \lambda_1 x_d \\ \frac{di_{sq}}{dt} + \lambda_2 i_{sq} = \lambda_2 x_q \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),得:

$$\begin{cases} \lambda_1 x_d = \lambda_1 i_{sd} + \frac{1}{L}u_{sd} - \frac{R}{L}i_{sd} + \omega \cdot i_{sq} - \frac{1}{L}S_d u_{pv} \\ \lambda_2 x_q = \lambda_2 i_{sq} + \frac{1}{L}u_{sq} - \frac{R}{L}i_{sq} - \omega \cdot i_{sd} - \frac{1}{L}S_q u_{pv} \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)求得逆变器的输入变量  $u = [u_1, u_2] = [S_d, S_q]$  的值,即:

$$\begin{bmatrix} S_d \\ S_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \frac{L}{u_{pv}} \begin{bmatrix} \frac{1}{L}u_{sd} - \frac{R}{L}i_{sd} + \omega \cdot i_{sq} - \lambda_1(x_d - i_{sd}) \\ \frac{1}{L}u_{sq} - \frac{R}{L}i_{sq} - \omega \cdot i_{sd} - \lambda_2(x_q - i_{sq}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

由上式可知,通过引入新的输入变量  $x_d, x_q$  和电压耦合补偿项  $\omega i_{sd}, \omega i_{sq}$ , 不仅使输出电流  $i_{sd}, i_{sq}$  与新变量  $x_d, x_q$  之间呈线性关系,而且实现了非线性方程的解耦。

根据式(4),可得输入/输出反馈线性化的电流解耦控制器结构,如图 3 所示。可以通过选择合适的参数  $\lambda_1, \lambda_2$ , 使电流控制器具有良好的性能。图 2 中电流控制器的输出变量  $S_d$  和  $S_q$  分别对应参考调制电压的  $d$  轴和  $q$  轴分量。至于引入的输入变量  $x_d, x_q$ , 分别为外环控制器输出  $d, q$  轴电流指令值。

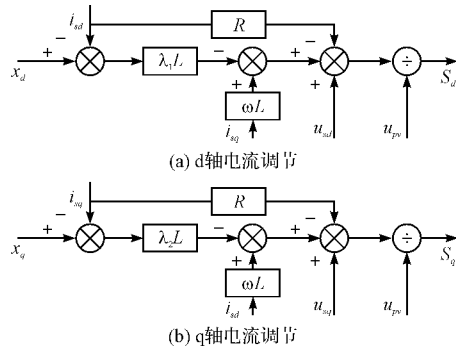


图 2 内环电流控制框图

### 1.2.2 外环 PI 控制

在配网侧平衡的条件下,取配网电压矢量  $\vec{u}_s$  的方向为  $d$  轴方向,有  $u_{sd} = U_s$  ( $U_s$  为电网电压空间矢量的模值),  $u_{sq} = 0$ , 且忽略逆变器损耗,则逆变器两侧有功平衡。有

$$\begin{cases} P = 3 \cdot U_s i_{sd} / 2 = u_{pv} i_{pv} \\ Q = -3 \cdot U_s i_{sq} / 2 \end{cases} \quad (5)$$

相对于光伏并网系统的容量,配网侧可等效为无穷大电源,由式(5)可知, $U_s$  值变动很小,可以通过调节  $d$  轴电流  $i_{sd}$  和  $q$  轴电流  $i_{sq}$ ,对配网侧的有功功率和无功功率进行独立控制。在本研究中,控制器外环  $d$  轴采取定直流电压控制; $q$  轴采取定输入配电网的无功功率控制,如图 3 所示。

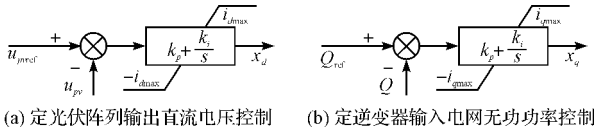


图 3 外环 PI 控制框图

综上所述,结合内环电流输入/输出反馈线性化控制,外环 PI 控制,就构成了所采用的光伏并网单级三相逆变器的控制器系统,如图 4 所示。

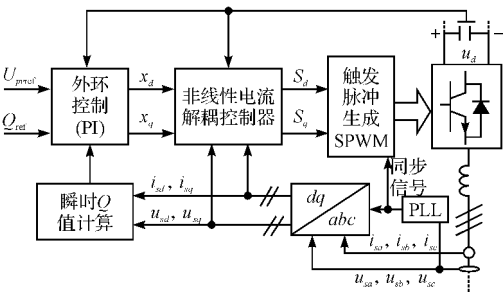


图 4 光伏并网三相逆变器控制系统结构图

2 并网光伏系统的仿真

在 PSCAD/EMTDC 平台上搭建如图 2 所示的光伏并网发电仿真系统,其中光伏阵列模块由四个光伏组件串联组成,光伏组件根据文献[15]提供的参数进行模拟,在 Matlab 2007b 下对光伏阵列模块进行特性分析,光伏阵列模块的  $U$ - $I$ 、 $U$ - $P$  特性曲线图如图 5、图 6 所示。

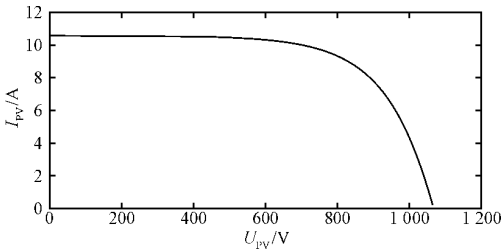


图 5 光伏阵列模块的  $U$ - $I$  特性曲线

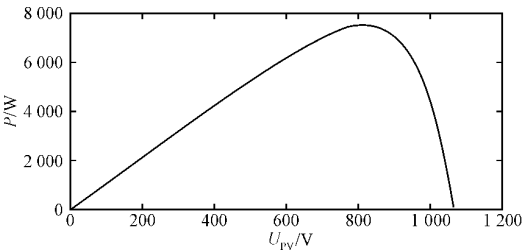


图 6 光伏阵列模块的  $U$ - $P$  特性曲线

并网逆变器模块使用章节 1.2 中所阐述的控制方式。在  $d$  轴电压参考值  $V_{ref1}=0.818\text{ kV}$ , $q$  轴无功功率参考值  $Q_{ref}=0\text{ Mvar}$  条件下,由逆变器输出配网的 A 相电压电流波形图如图 7 所示。由图可知,该并网逆变器能够在将光伏阵列模块输出的直流电转化为交流电的同时,使输出电流很好地跟踪了配网电压,不但频率相同,而且功率因素为 1。

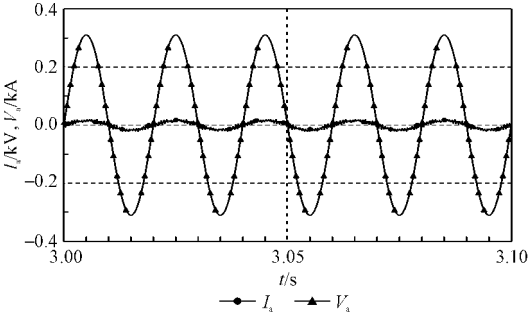


图 7 配网侧 A 相电压电流波形图

依次取控制系统外环  $d$  轴电压参考值分别为  $V_{ref1}=0.818\text{ kV}$ ; $V_{ref2}=0.600\text{ kV}$ ; $V_{ref3}=1.000\text{ kV}$ ,此时保持  $q$  轴无功功率参考值为  $Q_{ref}=0\text{ Mvar}$ ,3 种工况下光伏阵列模块输出的电压电流波形如图 8、图 9 所示,3 种工况下经逆变器输入配网的无功功率波形如图 10 所示。仿真结果表明采用本研究所设计的控制系统可以达到:①对光伏阵列模块的输出电压具有很高的控制精度;②对于光伏阵列模块的输出电压,具有较宽的适应范围,系统的稳定工作域较大;③输出的无功功率受到控制,始终为 0 Mvar。

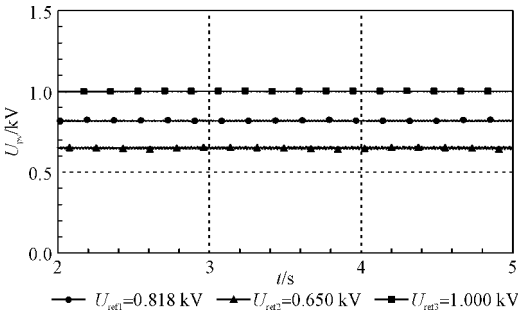


图 8 3 种工况下光伏阵列模块的输出电压波形图

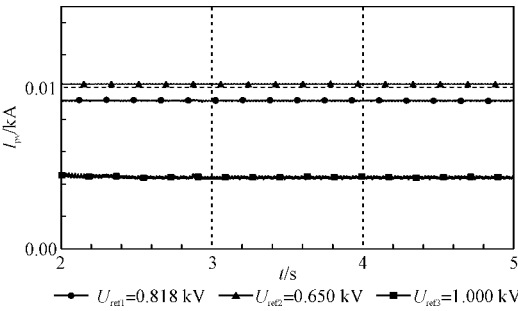


图 9 3 种工况下光伏阵列模块的输出电流波形图

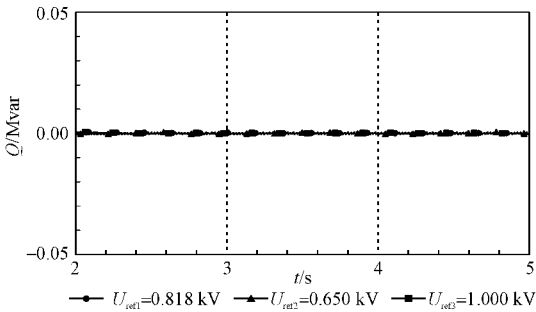


图 10 3 种工况下光伏阵列输入配电网无功波形图

依次取控制系统外环  $q$  轴无功功率参考值为： $Q_{ref1} = 0$  Mvar,  $Q_{ref2} = 0.02$  Mvar,  $Q_{ref3} = -0.02$  Mvar, 此时保持  $d$  轴电压参考值为  $V_{ref} = 0.818$  kV。3 种工况下光伏阵列模块输入配网无功功率波形如图 11 所示。

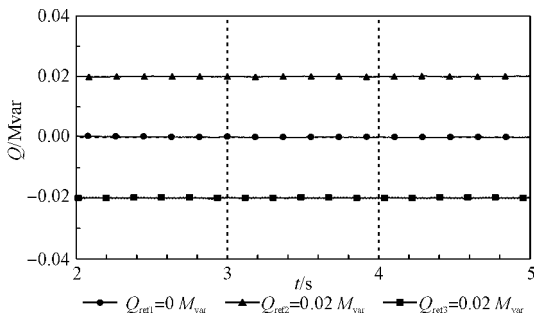


图 11 3 种工况下光源电池输入配网无功波形图

无功控制由工况 2 向工况 3 ( $Q_{ref} = -0.02$  Mvar  $\rightarrow$   $0.02$  Mvar) 转换过程中经逆变器输入配网有功无功功率波形图如图 12 所示。

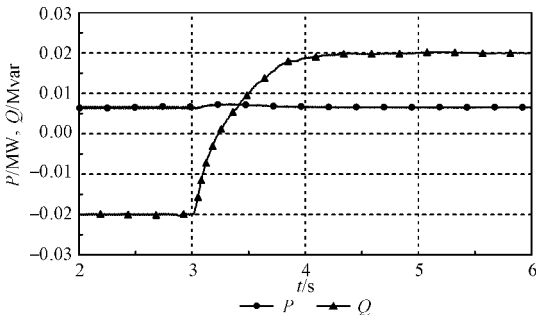


图 12 工况 2 向工况 3 转换输入配网有功无功图

仿真结果表明采用本研究所设计的控制器可以达到:①通过改变输入配网的无功功率参考值,实现高精度的无功功率调节;②当光伏并网系统输出无功功率产生大的变化时,有功波动很小;③能在发出无功和吸收无功两种状态间快速转换,使并网的光伏系统同时起到 STATCOM 的作用,从而提高配网的稳定性。

### 3 结束语

本研究在 PSCAD/EMTDC 环境下搭建了单级三

相光伏并网系统的仿真模型。其中并网逆变器采用双闭环控制,内环根据非线性控制理论中反馈线性化的思想,实现电流的解耦控制,外环分别对电压和无功进行 PI 控制。仿真结果表明,在各种不同的工况下光伏并网系统均能稳定运行,从而验证了控制策略的有效性。同时,本研究所设计的光伏并网系统必要时还能在一定范围内对配网的无功进行调节,对提高电网末梢供电能力和保障电能质量具有重要作用。

### 参考文献 (References):

- [1] U. S. Department of Energy Office of Electric Transmission and Distribution. The Smart Grid: an introduction [EB/OL]. [2009-01-01]. [http://www.oe.energy.gov/DocumentsandMedia/DOE\\_SG\\_Book\\_Single\\_Pages\(1\).pdf](http://www.oe.energy.gov/DocumentsandMedia/DOE_SG_Book_Single_Pages(1).pdf).
- [2] BROWN R E. Impact of Smart Grid on Distribution System Design [C]//Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE, 2008; 1-4.
- [3] 董密, 罗安. 光伏并网发电系统中逆变器的设计与控制方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(20): 97-102.
- [4] 王章权, 陈友荣. 基于 PSIM 和 Simulink 的光伏发电系统协同仿真[J]. 机电工程, 2009, 26(10): 28-61.
- [5] WU T F, CHANG C H, CHEN Y H. A fuzzy-logic-controlled single-stage converter for PV-powered lighting system applications[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2000, 47(2): 287-296.
- [6] MARINGS D C, DEMONTI R. Grid connected PV system using two energy processing stages [C]//Record of the 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, May 19-24, 2002, New Orleans, LA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2002; 1649-1652.
- [7] 王章权, 陈友荣. 基于 PSIM 和 Simulink 的光伏发电系统协同仿真[J]. 机电工程, 2009, 26(10): 58-61.
- [8] 孙自勇, 宇航, 严干贵, 等. 基于 PSCAD 的光伏阵列和 MPPT 控制器的仿真模型[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 61-64.
- [9] CALAIS M, MYRZIK J, SPOONER T, et al. Nverters for single-phase grid connected photovoltaic systems-an overview [C]//IEEE PESC Conf. Rec., 2002; 1995-2000.
- [10] 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.
- [11] 吴理博, 赵争鸣, 刘建政, 等. 具有无功补偿功能的单级式三相光伏并网系统[J]. 电工技术学报, 2006, 21(1): 28-32.
- [12] 汪海宁, 苏建徽, 张国荣, 等. 光伏并网发电及无功补偿的统一控制[J]. 电工技术学报, 2005, 20(9): 114-118.
- [13] TAYLOR, JEWELL R. Feedback Linearization of Fixed Frequency PWM Converters [D]. The University of Texas at Dallas, 2004.
- [14] 陈海荣. 交流系统故障时 VSC-HVDC 系统的控制与保护策略研究 [D]. 杭州: 浙江大学电机系, 2007.
- [15] 冯海峰, 马德林, 许良军. 单级式光伏并网发电系统的仿真分析[J]. 计算机仿真, 2008, 25(3): 245-250.

[编辑: 柴福莉]