

# 具有谐波抑制与无功补偿功能的光伏并网系统\*

王 萍, 郑常宝

(安徽大学 电气工程与自动化学院, 安徽 合肥 230039)

**摘要:** 介绍了一种新型的光伏并网发电系统模型, 在并网发电的同时实现了对电网中的无功和谐波的补偿与抑制。基于光伏阵列的等效电路模型, 在 Matlab 仿真环境下, 建立光伏阵列的通用仿真模型。利用该模型, 设计新型的光伏并网发电系统。该系统将光伏并网系统的发电控制和无功补偿、有源滤波相结合, 使得光伏并网发电系统不仅可以并网发电还具有谐波抑制与无功补偿的功能, 进而提高电网的供电质量和能力。最后对该系统进行仿真实验验证, 仿真结果验证了系统模型的正确性和有效性。

**关键词:** 光伏并网系统; 瞬时无功功率; 最大功率点跟踪; 谐波抑制与无功补偿

中图分类号: TM615

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2011)14-0058-04

## A grid connected photovoltaic system with harmonic suppression and reactive power compensation

Wang Ping, Zheng Changbao

(Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei 230039, China)

**Abstract:** A novel model of grid-connected photovoltaic system is advanced, and it can generate electricity as well as compensate reactive power and suppress harmonic. A versatile simulation model for photovoltaic array is developed based on the equivalent circuit model of photovoltaic module under Matlab environment. By the model, we design a new photovoltaic power generation system. The controlling of photovoltaic power system is combined with harmonic and reactive compensation in this system. The system's dual-purpose operation solves both the power generation need, and helps to eliminate the problem of harmonic and reactive pollution. So it can improve the quality and capacity of power supply. At last, a simulation is performed to test the model, and the conclusion shows its correctness and validity.

**Key words:** photovoltaic grid connected system; instantaneous reactive power; maximum power point tracking; harmonic suppression and reactive compensation

随着能源与环境问题的日益严峻, 开发新能源和可再生能源已迫在眉睫。太阳能是一种清洁的随处可得的可再生能源, 对环境无污染, 因此备受关注并且前景看好。常规的光伏并网发电系统的主要功能是完成光伏阵列的并网发电控制, 即将光伏阵列的直流电能转换为与电网同频同相的交流电能馈送给电网, 并保证有较好的并网功率因素, 它的控制调节与电网负载特性无关。而希望光伏阵列在光伏并网发电的同时还可以对电网中的无功和谐波进行补偿和抑制, 从而提高电网供电的质量和能量。为此本文介绍了一种新的光伏并网发电系

统, 它利用光伏并网逆变主电路的特点, 将光伏并网的发电控制与无功补偿、有源滤波相结合, 使得主电路具备提供有功和无功电流的控制功能。系统可以检测负载电流中的无功和谐波分量, 进而达到无功电流补偿控制的目的。并网系统的仿真结果表明, 该系统在进行发电的同时可以有效地进行谐波抑制与无功补偿。

### 1 光伏阵列模型的建立与仿真

#### 1.1 光伏阵列的数学模型

基于光伏阵列的等效电路模型<sup>[5]</sup>如图 1 所示, 在 Matlab 环境下建立其通用仿真模型。

\* 基金项目: 安徽省教育厅重点科研项目(KJ2009A144)

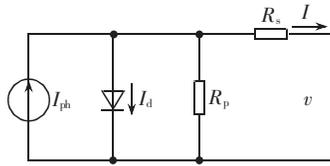


图1 光伏阵列等效电路

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{V+R_s I}{V_t a}} - 1 \right) - \frac{V+R_s I}{R_p} \quad (1)$$

其中,  $R_s$  为串联电阻, 忽略不计以简化计算;  $R_p$  为并联电阻;  $I_{ph}$  为光生电流;  $I_d$  为暗电流。整理上式可得光伏阵列的数学模型:

$$I = (I_{sc} + K_I \Delta T) \frac{G}{G_n} - \frac{I_{sc} + K_I \Delta T}{e^{\frac{V+K_V \Delta T}{a V_t}} - 1} \left( e^{\frac{V}{V_t a}} - 1 \right) - \frac{V}{R_p} \quad (2)$$

其中,  $V_t = N_s K T / q$ ,  $I_{sc}$  为短路电流;  $V_{oc}$  为开路电压;  $K_I$  为电流温度系数;  $K_V$  为电压温度系数;  $a$  为二极管理想常数;  $q$  为电子电荷;  $K$  为玻耳兹曼常数;  $\Delta T = T - T_n$ ,  $T$ ,  $T_n$  为实际温度和标准温度(单位 K);  $G$ ,  $G_n$  为实际太阳辐射和标准太阳辐射。

### 1.2 光伏阵列的最大功率点跟踪 (MPPT)

光伏阵列 P-V 特性是非线性的, 存在唯一的最大功率点。光伏阵列在任意光照和任意环境下的功率为:

$$P = IV = \left( (I_{sc} + K_I \Delta T) \frac{G}{G_n} - \frac{I_{sc} + K_I \Delta T}{e^{\frac{V+K_V \Delta T}{a V_t}} - 1} \left( e^{\frac{V}{V_t a}} - 1 \right) - \frac{V}{R_p} \right) V \quad (3)$$

由极值条件  $dp/dv=0$  得:

$$\left( (I_{sc} + K_I \Delta T) \frac{G}{G_n} - \frac{I_{sc} + K_I \Delta T}{e^{\frac{V+K_V \Delta T}{a V_t}} - 1} \left( e^{\frac{V}{V_t a}} - 1 \right) - \frac{2V}{R_p} \right) - \left( \frac{I_{sc} + K_I \Delta T}{e^{\frac{V+K_V \Delta T}{a V_t}} - 1} e^{\frac{V}{V_t a}} - \frac{V}{V_t a} \right) V = 0 \quad (4)$$

式(4)为超越方程, 用迭代法求解。本文采用以简单且收敛速度快而被广泛应用的牛顿迭代法来求解出对应最大功率点的电压:  $V_{k+1} = V_k - P'(V_k)/P''(V_k)$ , 当  $|V_{k+1} - V_k| \leq \varepsilon$  时,  $V_{max} = V_{k+1}$ 。其中  $V_{k+1}$  和  $V_k$  分别是  $V$  的第  $K+1$  次和第  $K$  次迭代值,  $\varepsilon$  为迭代精度,  $P'(V_k)$  和  $P''(V_k)$  分别是第  $K$  次迭代下  $P$  对  $V$  的一阶导数和二阶导数。将所得的最大功率点电压  $V_{max}$  代入式(2), 得  $I_{max}$ , 进而可求得最大功率  $P_{max} = V_{max} \cdot I_{max}$ 。

### 1.3 光伏阵列模型的仿真

基于上述数学模型, 在 Matlab 环境下利用 Simulink 工具<sup>[3]</sup>建立光伏阵列的仿真模块, 改变其中各个参数可得到具有不同 I-V 特性的光伏阵列, 特性曲线如图 2、图 3 所示。

图 2、图 3 中各条曲线表示不同光照条件下光伏阵列的 I-V、P-V 特性曲线, 它们与典型的光伏阵列特性

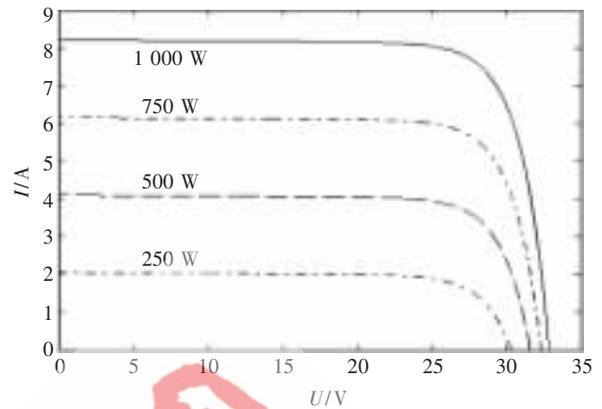


图2 光伏阵列 I-V 特性曲线

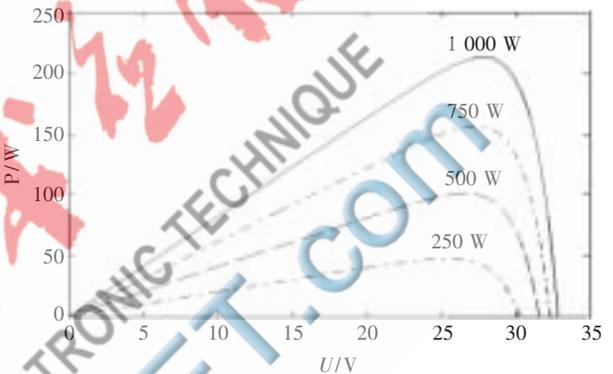


图3 光伏阵列 P-V 特性曲线

曲线相一致, 验证了本文中光伏阵列仿真模型的正确性和实用性。

## 2 光伏阵列并网系统的原理

本文设计的新型光伏并网发电系统<sup>[4]</sup>最大的特点就是将光伏并网发电控制与无功补偿相结合, 使得光伏阵列在并网发电的同时还可对电网进行谐波抑制与无功补偿。其基本原理是: 基于瞬时无功功率理论对负载电流、电压进行检测, 经指令电流运算电路得出含有负载电流谐波及无功分量的指令电流, 将指令电流和并网电流进行比较, 产生 PWM 波控制逆变电路中各 IGBT 的导通和关断, 实现并网电流对指令电流的跟踪, 最终得到理想的电网电流。其工作原理如图 4 所示, 其中 PV 为光伏阵列; MPPT 单元为最大功率跟踪控制单元, 它完成光伏阵列最大功率点工作电压的确定。AVR 为电压调节控制单元, 其调节输出是并网电流有功分量的幅值给定  $i_p^*$ 。瞬时无功检测及指令电流合成单元完成对电网电流的无功检测并最终合成并网电流的指令值。电流控制单元采用滞环比较的控制方式, 保证并网电流对指令电流的实时跟踪。

### 2.1 无功电流瞬时检测及指令电流的合成

本文设计的并网系统在发电的同时要实现谐波抑制与无功补偿, 因此指令电流的计算是一个关键。指令电流的计算包括无功和谐波电流的补偿指令电流计算、光伏并网发电有功指令电流计算及这两者的合成运算。

## 网络与通信 Network and Communication

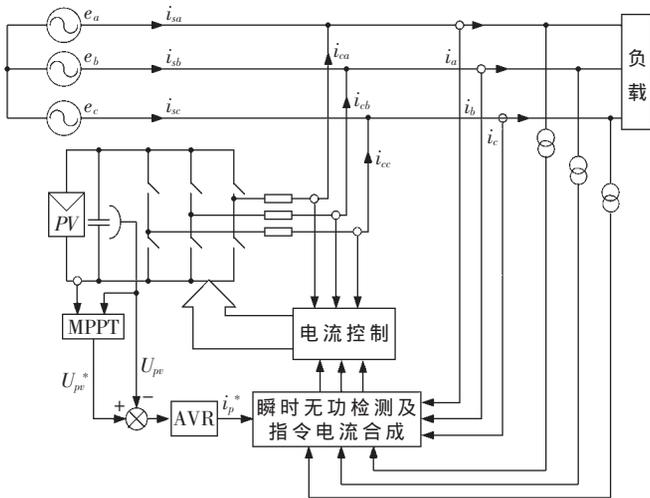


图4 光伏阵列并网系统原理图

谐波电流的检测方法有很多,其中以基于瞬时无功功率理论的检测方法速度最快、应用最广,因此本文利用该检测方法来同时实现谐波电流的检测和指令电流的合成。其中运用数字锁相环(PLL)跟踪A相电网电压的相位,因此检测结果不会受电压畸变的影响,可以保证电流检测的精度。

根据瞬时无功功率理论<sup>[1]</sup>,三相负载电流  $i_a, i_b, i_c$  经过变换矩阵和低通滤波器LPF后得到基波有功直流分量。 $i_p^*$ 是光伏并网直流指令分量,由光伏阵列最大功率点工作电压  $U_{pv}^*$ 和当前光伏阵列输出电压  $U_{pv}$ 经调节器AVR调节后得到的有功直流分量。基波有功直流分量和  $i_p^*$ 相叠加经过变换矩阵得到负载电流的基波有功分量  $i_{qpf}, i_{bpf}, i_{cpf}$ ,将其与负载电流相减得到指令电流,指令电流表达式如下:

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{qpf} \\ i_{bpf} \\ i_{cpf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a(t) - \sqrt{\frac{2}{3}} \sin \omega t \overline{i_p^*(t)} \\ i_b(t) - \sqrt{\frac{2}{3}} \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \overline{i_p^*(t)} \\ i_c(t) - \sqrt{\frac{2}{3}} \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \overline{i_p^*(t)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_p^* \sin \omega t \\ i_p^* \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \\ i_p^* \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(5)即为光伏并网指令电流表达式,第一项为瞬时无功功率理论得到的无功及谐波电流分量,是并网电流无功分量指令;第二项为光伏阵列输出的并网电流有功分量指令,它体现了光伏阵列发电功率的大小。

## 2.2 电流跟踪控制

电流跟踪控制电路的作用是根据得到的指令电流和逆变电路输出的实际并网电流之间的相互关系,得到控制逆变电路中各器件通断的PWM信号,从而保证并网交流电流跟踪指令电流的变化。本文采用滞环比较器<sup>[2]</sup>

的瞬时值比较方式进行电流跟踪控制。该方法把指令电流与实际并网电流的偏差作为输入,通过滞环比较器产生PWM信号来控制开关器件的通断,从而使得实际并网电流可对电网电流进行谐波抑制和无功补偿。

## 3 并网系统仿真及实验研究

对本文的并网系统进行仿真,负载是带阻感负载的三相整流桥,实验结果如图5~图7所示。由图5可以看出,当光伏并网系统发电的同时进行谐波抑制时,a相电流接近正弦波即不再含有谐波,但a相电流、电压存在一定的相位差,即a相电流含有无功分量。图6表示并网发电的同时对电网中的无功进行补偿,图中a相电流、电压同频同相无相位差,即无功得到了完全的补偿,a相电流不再含有无功分量但含有谐波分量。此时并网电流包括无功分量和有功分量而不再含有谐波分量,因此图中的指令电流波形为三相正弦波并且与a相电压存在一定的相位差。图7则表示并网发电的同时进行谐波抑制和无功补偿,此时a相电流、电压同频同相,无功



图5 光伏并网发电的同时仅进行谐波抑制

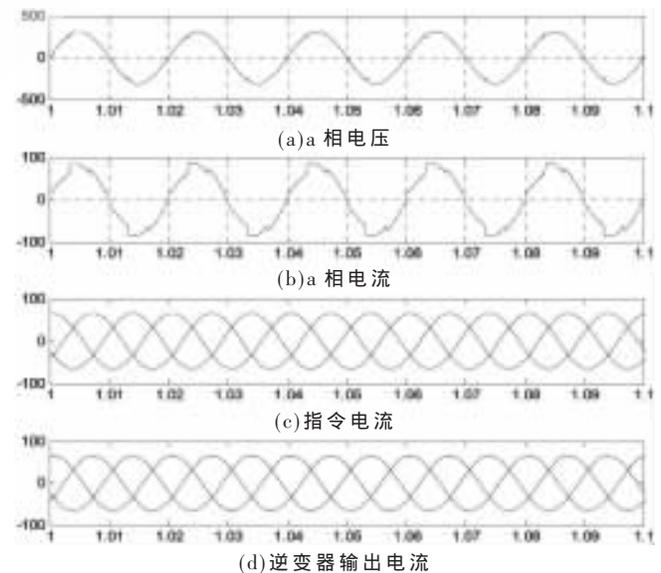


图6 光伏并网发电的同时仅进行无功补偿

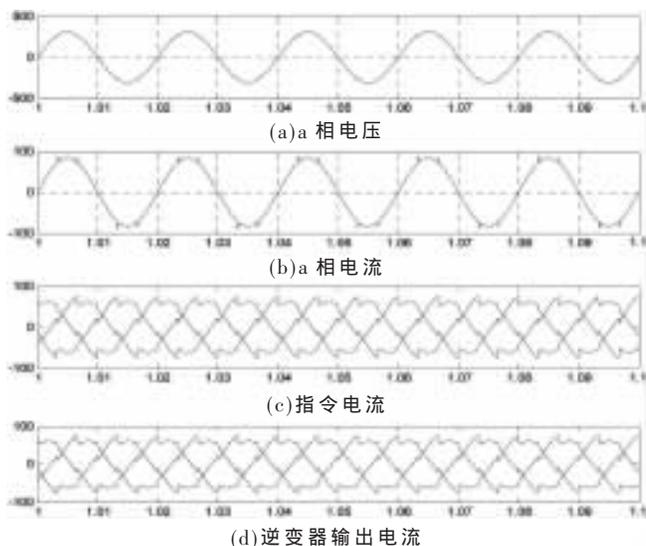


图7 光伏并网发电的同时进行谐波抑制与无功补偿

得到了完全的补偿;a相电流波形接近正弦波表示谐波抑制的效果很好,电流中只存在一些由开关过程引起的毛刺,可忽略不计,流入电网的电流畸变率非常小,处于允许的范围之内,此时光伏系统在并网发电的同时对负载电流进行了有效的谐波抑制与无功补偿。

本文中的光伏阵列通用仿真模块考虑了光伏电池内部参数和外部环境等众多因素并结合了MPPT仿真算法,可以实时模拟光伏阵列的动态特性,具有良好的可信性和实用性。针对常规的光伏并网发电系统只进行并

网发电这一特点,本文提出一种新型的并网发电系统,将光伏并网的发电控制与无功补偿、有源滤波相结合,在保证很好地进行光伏并网发电的同时还对电网中的无功和谐波进行补偿与抑制,从而提高电网供电的质量和能,仿真实验的结果非常好。不足之处是本文中有最大功率点跟踪的实现,采用了实时优化迭代算法,该方法存在一定的误差,可以用其他更好的算法代替。

#### 参考文献

- [1] 王兆安,杨君,刘进军,等.谐波抑制和无功功率补偿[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [2] 王兆安,黄俊.电力电子技术[M].北京:机械工业出版社,2007.
- [3] 林飞,杜欣编.电力电子应用技术的MATLAB仿真[M].北京:中国电力出版社,2009.
- [4] 赵争鸣,刘建政,孙晓瑛,等.太阳能光伏发电及其应用[M].北京:科学出版社,2005.
- [5] VILLALVA M G,GAZOLI J R,FILHO E R.Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays[J].Power Electronics Conference,2009:1244-1254.

(收稿日期:2011-02-18)

#### 作者简介:

王萍,女,1987年生,在读硕士研究生,主要研究方向:光伏并网。

刘常宝,男,1963年生,教授,硕士生导师,主要研究方向:电力电子,光伏并网,电能质量。