

文章编号: 1004-4353(2016)04-0335-04

一种单相光伏并网逆变器控制技术

吴必瑞, 韩梁

(宁德师范学院 物理与电气工程系, 福建 宁德 352100)

摘要: 为了解决光伏电池最大功率的传输问题,通过建立光伏发电系统的数学模型,提出了一种单相光伏并网逆变器的控制技术. 仿真实验显示,该控制方法能够实现对逆变器输出电压、电流的稳定控制,且能够使光伏电池保持最大功率输出,进而验证了该控制方法的有效性和可行性.

关键词: 光伏电池; 逆变器; 控制; 仿真

中图分类号: TM464

文献标识码: A

Research on control technology of a single phase photovoltaic grid connected inverter

WU Birui, HAN Liang

(Department of Physics & Electrical Engineering, Ningde Normal University, Ningde 352100, China)

Abstract: In order to solve the problem of the maximum power transmission of photovoltaic cell, through establishing the mathematical model of photovoltaic power generation system. This paper presented a single phase photovoltaic grid connected inverter control technology. Simulation experiments should that the control method adopted in this paper could realize the stability control of the inverter output voltage and current and maintained the maximum power output of photovoltaic cell, and then verified the validity and feasibility of the control method.

Keywords: photovoltaic cell; inverter; control; simulation

20 世纪 80 年代开始,光伏发电系统投入实际应用,组串式逆变器随之问世,并受到广泛关注. 光伏并网逆变器技术的核心是 PWM 控制技术^[1]. 近年来,随着对 PWM 控制技术的不断深入研究, PWM 控制技术已取得了较大进展,其中并网逆变器数控化的使用有效地提高了并网效率^[2-3]. 目前,国内对并网逆变器的研究主要集中在并网逆变器分离的两级能量转换结构,但在转换的效率、结构制造和控制策略等方面仍需进一步研究^[4]. 文献[5-6]的作者采用 PI 和重复控制实现了并网逆变器控制方案,但其内模中含有一个周期延迟环节,使得动态响应相对较慢. 文献[7]的作者虽然对并网逆变器中 LC 滤波器进行

了详细地分析计算,但没有解决最大功率的传输问题. 鉴于上述研究中存在的问题,本文提出了一种单相光伏发电逆变器的控制方案.

1 光伏发电系统的数学建模

1.1 光伏电池的数学模型

光伏电池是利用光伏效应将太阳光能转化为电能,根据电子学理论,其等效电路如图 1 所示. 图 1 中, I_{sc} 为光子在光伏电池中的电流, I_D 为二极管通过 PN 结的总扩散电流,其表达式为

$$I_D = I_{D0} \left[\exp \left(\frac{q(U_{PV} + I_L R_s)}{AKT} \right) - 1 \right]. \quad (1)$$

式(1)中: I_{D0} 为无光照时电池的饱和电流; q 为电

子电荷(1.6×10^{-19} C); A 为电池常数因子, 取值 1; K 为玻耳兹曼常数(1.38×10^{-23} J/K); T 为绝对温度; R_s 为等效串联电阻.

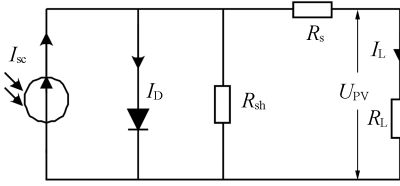


图 1 光伏电池等效电路

由图 1 和电路理论可得负载电流 I_L 为

$$I_L = I_{sc} - I_D - \frac{U_{PV} + I_L R_s}{R_{sh}}, \quad (2)$$

式中 U_{PV} 为负载电压, R_s 为等效并联电阻.

在工程实际中, R_s 可近似为零, R_{sh} 可近似为无穷大, 因此光伏负载电流和电压的特性表达式可分别表示为:

$$I_L = I_{sc} - I_{D0} (e^{\frac{qU_{PV}}{AKT}} - 1), \quad (3)$$

$$U_{PV} = \frac{AKT}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_{sc} - I_L}{I_{D0}} + 1\right). \quad (4)$$

1.2 最大功率点跟踪 MPPT

电导增量法是 MPPT 控制常用的一种算法, 基本原理是根据 dP/dU 的导数值是否大于零来判断, 用公式表示为

$$\frac{dP}{dU} = \frac{d(IU)}{dU} = I + U \frac{dI}{dU} = 0. \quad (5)$$

由式(5) 可得

$$\frac{dI}{dU} = -\frac{I}{U}. \quad (6)$$

根据电导增量法原理, 光伏电池要输出最大功率点, 必须满足公式(5). 光伏电池的输出功率在增量前后对应的电流增量为 dI 、电压增量为 dU , 只要测出这一时刻的 dI/dU 和 I/U , 就能够判断光伏电池下一次的扰动方向, 得到光伏电池的最大功率. 电导增量法的控制流程如图 2 所示. 图中 $U(K)$ 、 $I(K)$ 为第 K 时刻的电压、电流.

1.3 光伏发电系统的功率变换

为了提高光伏电池与并网结构的电压匹配, 需在并网电路之间增加一级升压变流器. 本文系统是采用 Boost 型 DC/DC 电路实现的, 其电路如图 3 所示.

由于电路中的电感电压处于稳态时, 其在任意周期内的时间积分等于零, 因此可得

$$V_{pv}DT_s + (V_{PV} - V_{dc})(1 - DT_s) = 0. \quad (7)$$

进一步推导可得

$$\frac{V_{dc}}{V_{pv}} = \frac{1}{1 - DT_s}; \quad \frac{I_{rl}}{I_{pv}} = DT_s. \quad (8)$$

公式(7) 和(8) 中, I_{rl} 为负载的平均电流, V_{pv} 为光伏电池的输出电压, V_{dc} 为 Boost 型 DC/DC 电路的输出电压, T_s 为开关管的开关周期, D 为开关管导通的占空比. 若忽略电路的能量损耗, 则由电路理论可推导出电感和电容的取值为:

$$L = \frac{(1 - D)^2 DV_{dc} T_s}{\eta I_{rl}}, \quad (9)$$

$$C = \frac{I_{rl} DT_s}{\Delta V_{dc} \frac{\Delta i_l}{I_l}}. \quad (10)$$

式(10) 中, I_l 为电感上的平均电流, Δi_l 为输入电流的纹波电流.

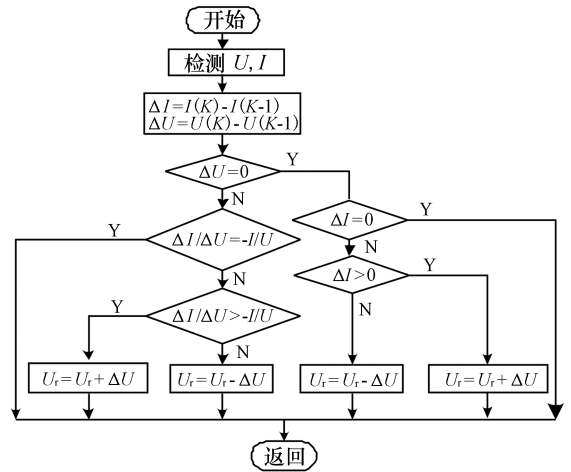


图 2 电导增量法计算最大功率流程图

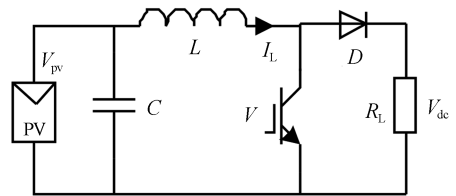


图 3 Boost 型 DC/DC 电路

2 光伏并网控制系统的设计

2.1 电流内环 PI 控制

在并网逆变器中, 把电网压当作扰动信号, 采用前馈控制, 电压对输出的电流传递函数为

$$I_{net}(s) = \frac{G_r(s)(1 + G_f(s)G_{pi}(s))}{1 + G^*(s)} U_{net}(s). \quad (11)$$

式(11) 中, $G^*(s)$ 为开环传递函数, $G_f(s)$ 为前馈

环节的传递函数。设 $G_i(s) = -1/G_{pi}(s)$ ，在公式 (11) 中令 $I_{net}(s) = 0$ ，并将电网电压的前馈补偿理想化，则可得理想的电流内环数学模型，如图 4 所示。图 4 中 i_r 为给定的并网参考电流， i_{net} 为逆变器输出的实际并网电流， $G_{pi}(s)$ 为 PI 调节控制环节， G_{inv} 为逆变系统环节， $G_r(s)$ 为滤波环节。



图 4 理想的电流内环数学模型

电流内环的数学模型传递函数为

$$W(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) \frac{K_{P_{PWM}}}{T_{P_{PWM}}s + 1} \frac{1}{Ls + R_L}. \quad (12)$$

式(12)中， $T_{P_{PWM}}$ 是一时间常数， $K_{P_{PWM}}$ 是逆度器增益。令内环控制为二阶系统，则 PI 控制器的零点必须等于极点，故有

$$\frac{K_p}{K_i} = \frac{L}{R}. \quad (13)$$

由此公式(12) 可简化为

$$W(s) = \frac{1}{\frac{R_L}{K_i K_{P_{PWM}}} s (T_{P_{PWM}}s + 1)}. \quad (14)$$

当阻尼系数等于 0.707 时，PI 参数可分别取为：

$$K_i = \frac{R_L}{2K_{P_{PWM}} T_{P_{PWM}}}; K_p = \frac{L}{2K_{P_{PWM}} T_{P_{PWM}}}. \quad (15)$$

2.2 电压外环 PI 控制

电压外环控制图如图 5 所示。把电流内环作为控制对象可得

$$i_r = K_{vp} \left(\frac{\tau_v s + 1}{\tau_v s} \right) (V_{dc}^* - V_{dc}), \quad (16)$$

其中直流电压采样延迟为 $e^{-T_v s}$ 。由式(16) 知，电流环的传递函数约等于 $1/(T_v s + 1) = 1/(4T_v s + 1)$ ，于是有

$$W_s(s) = K_{vp} \left(\frac{\tau_v s + 1}{\tau_v s} \right) \frac{1}{T_v s + 1} \frac{K_c}{Cs} = \frac{K_{vp} K_c}{C \tau_v} (\tau_v s + 1) / [s^2 (T_v s + 1)]. \quad (17)$$

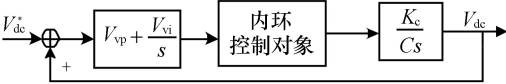


图 5 电压外环数学模型

令外环控制为二阶系统，则有

$$\frac{K_{vp} K_c}{C \tau_v} = \frac{h + 1}{2 \tau_v^2}. \quad (18)$$

在公式(18) 中，取 $h = \tau_v / 4 T_v s = 5$ ， $\tau_v = 20 T_v s$ ，则可得 PI 参数为：

$$K_{vp} = \frac{3C}{20 K_c T_s}; K_{vi} = \frac{K_{vp}}{20 T_s}. \quad (19)$$

3 光伏并网逆变器的 Matlab 仿真

3.1 仿真模型

由电压外环与电流内环控制的数学模型可以得知，并网逆变器的控制一般采用双闭环 PI 控制。其工作原理为：输出的电压与参考电压进行比较后生成一个电压误差信号后，该信号通过第一个 PI 控制器生成电流信号；生成的电流信号与电感的电流信号进行比较后生成电流内环误差信号，该信号经过另一个 PI 控制器即可生成 PWM 信号。逆变器中开关管的通断控制由 PWM 信号驱动。

为了验证逆变器输出的电压电流的效果，本文采用 Matlab/Simulink 仿真软件搭建仿真实验。单相桥式 SPWM 光伏并网逆变器的仿真模型如图 6 所示，该系统主要由光伏电池模块、Boost 型 DC/DC 电路、MPPT 控制模块、开关管驱动信号 PWM 模块、DC/AC 逆变电路、锁相环模块、双闭环 PI 电路模块组成。

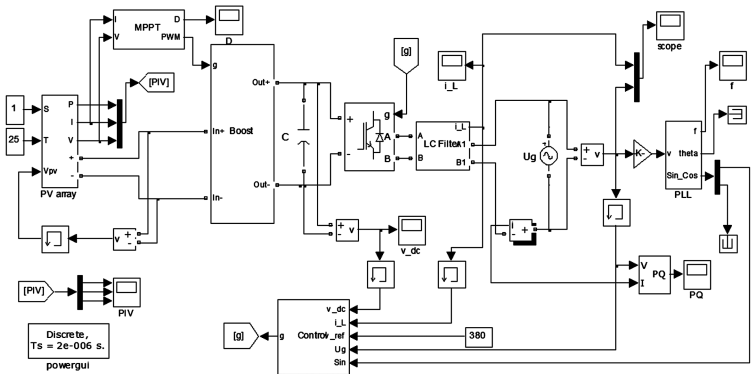


图 6 光伏并网逆变器的仿真模型

3.2 结果与分析

仿真参数的设置为:电感 $L=6\text{ mH}$,电阻 $R=0.1\text{ }\Omega$, $T_{\text{PWM}}=8\times 10^{-5}\text{ s}$, $K_{\text{PWM}}=189$.由式(15)和(19)可得电流内环 $K_p=0.2$, $K_i=3.3$,电压外环 $K_{vp}=0.9$, $K_{vi}=20.7$.由图7可以看出,双闭环PI分别通过电压外环与电流内环实现对输出电压、电流的稳定控制,使逆变电路输出波形逼近正弦.

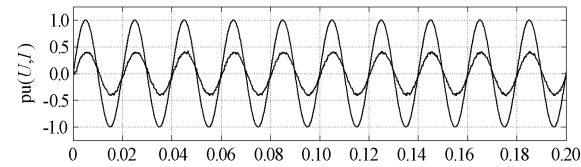


图 7 输入电压电流波形图

仿真结果显示,光伏电池生成的功率 $P=4\text{ kW}$,电流 $I=13.5\text{ A}$,电压 $U=290\text{ V}$,其波形如图8所示.

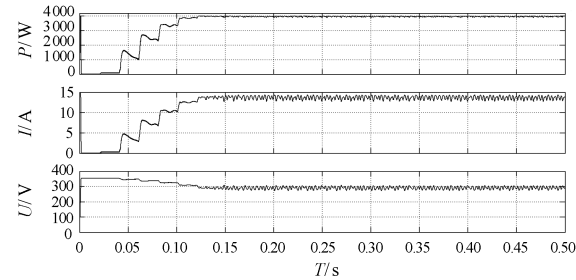


图 8 光伏电池生成的 P-I-U

逆变器输出电流的谐波畸变率如图9所示.由图9可以看出,当最高频率为 25 kHz 时,THD为 0.45% ,且输出电流近似为正弦波,由此表明输出电流可满足并网要求.

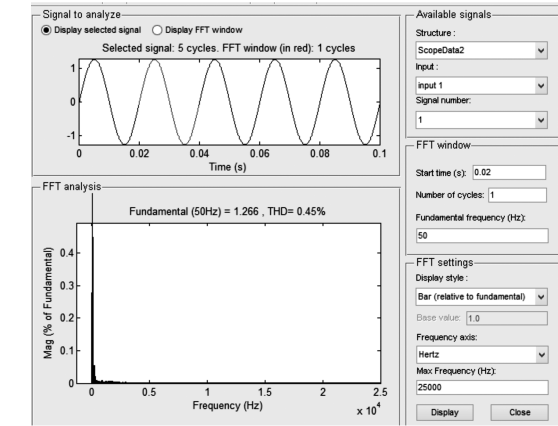


图 9 逆变器输出电流的谐波分析图

单相光伏并网逆变器输出的 P-Q 波形如图

10所示.通过分析有功功率 P 波形可知,功率 P 在 0.15 s 处达到最大功率点;经过一小段振荡后,稳态平均有功功率 $P=3.85\text{ kW}$,无功功率 $Q=120\text{ var}$,功率因数为 0.99 .由此可知,采用电导增量法对MPPT进行控制其效果有显著提高,但跟踪速度较慢.

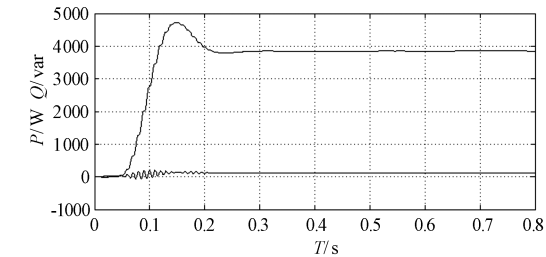


图 10 逆变器输出的 P-Q 波形图

4 结论

本文通过光伏电池等效电路建立了光伏电池的数学模型,通过 Boost 斩波电路控制开关管占空比实现了最大功率点跟踪控制,并建立了电流内环、电压外环的光伏发电控制系统.通过理论推导和 Matlab 仿真表明,本文所采用的控制方法能够实现对逆变器输出电压、电流的稳定控制,并可使光伏电池保持最大功率输出.本文提出的方法具有设计简单、成本低廉等优点,针对MPPT跟踪算法速度较慢的问题,今后将对此做进一步改进,以完善本文方法.

参考文献:

[1] 周林,张林强,廖波.单相光伏逆变器控制技术研究[J].电网技术,2012,36(9):25-30.

[2] Du Wei, Jiang Qirong, Erickson M J, et al. Voltage-source control of PV inverter in a CERTS microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014,29(4):1726-1734.

[3] 曹太强,许建平,祁强.单相光伏并网逆变器控制技术[J].电力自动化设备,2012,32(5):33-37.

[4] 胡雪峰,王璐,龚春英.并网逆变器的补偿控制技术[J].高电压技术,2010,36(12):84-89.

[5] 王弋飞,朱静,李侠,等.基于PI和重复控制的并网逆变器复合控制方案研究[J].高压电器,2015,51(7):87-91.

[6] 赵涛,王吉虎,黄家才,等.基于PI和重复控制三相并网逆变器的设计[J].电力电子技术,2015,49(1):20-22.

[7] 王磊,李照阳,童子权.一种可并网光伏发电逆变器设计[J].仪表技术与传感器,2012(8):22-24.