

# 光伏发电系统的并网重复控制及仿真

周雪松, 宋代春, 马幼捷, 程德树  
(天津理工大学, 天津 300384)

**摘要:**完成了对光伏发电并网控制的设计及仿真。系统采用了两级式拓扑结构:前级用直流变换器进行最大功率跟踪及直流母线电压调整;后级用逆变器将直流电能逆变送入电网。为了实现并网电流的精确控制使用了离散重复控制技术。最后,通过 Matlab 软件对上述设计进行了仿真校验,得到并网电流总谐波畸变率为 1%,逆变器功率因数为 97.91%,整体效率为 87.4%,符合并网要求。

**关键词:**光伏发电系统;逆变器;仿真

**中图分类号:**TM464

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-100X(2010)05-0008-03

## Grid-connected Repetitive Control and Simulation of Photovoltaic Power Generation System

ZHOU Xue-song, SONG Dai-chun, MA You-jie, CHENG De-shu  
(Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

**Abstract:**The article makes a further research on the topic of grid-connected photovoltaic.Considering the characteristics of photovoltaic cells and grid requirements,two level topological structure is adopted in the system.In order to realize the maximum power point tracking and the bus voltage regulating,DC/DC inverter is used.The direct current will be converted into alternating current which is sent to the grid by the inverter.Among them,the repetitive control technology is applied to the inverter in order to achieve a precise control to the current.Finally,the simulation is done by using the Matlab.A set of experimental results carried out on a computer are provided to validate the proposed approach.

**Keywords:**photovoltaic power generation system; inverter; simulation

**Foundation Project:**Supported by National Natural Science Foundation of China(No.50877053);Tianjin Natural Science Fund Project(No.09JCYBJC07100)

### 1 引言

在能源危机日益加重的今天,太阳能光伏发电以其清洁、方便等优势得到了飞速发展。其中并网发电因集成度高、使用方便、价格低廉等特点成为新能源开发利用的一个重要分支,是未来光伏发展的一个主要方向。

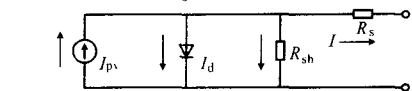
光伏电池的输出功率受外界因素影响较大,经常处于变动状态。目前广泛研究的单级式拓扑结构要求并网逆变器必须借助一个功率变换环节实现升压、最大功率点跟踪、DC/AC 逆变以及光伏阵列和电网之间的电隔离<sup>[1]</sup>。因此该拓扑结构含有变压器,电压波动大,控制方法复杂,不易实现。采用两级式克服了此缺陷,将最大功率跟踪与并网控制分别考虑。前级用直流变换器代替变压器对电压进行调整,并完成最大功率跟踪;后级用逆变器完成对电能的变换<sup>[2]</sup>。尽管状态反馈控制、变结构滑模控制、无差拍控制、单周控制等先进的控制方法被试着应用到逆变器的控制中,但均存在一定弊端,实际应用并不广

泛。考虑到逆变器自身的死区效应及非线性负载导致的波形畸变,采用对周期性扰动有较好抑制作用的重复控制技术来完成逆变器控制,可在一定程度上提高系统的稳态精度。

### 2 并网系统的各组成部分

#### 2.1 光伏电池模型

光伏电池的的输出特性具有强烈的非线性,其等效电路如图 1 所示。



$I_d$  为流过二极管的反向饱和和漏电流,数量级为  $10^{-4}$

图 1 光伏电池模型

太阳能电池的特性公式为:

$$I = I_{pv} - I_0 \left[ e^{\frac{q(U+IR_s)}{AKT}} - 1 \right] - \frac{U+IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中: $I_{pv}$  为光伏电池短路电流; $R_{sh}$  为光伏电池并联电阻; $R_s$  为光伏电池内阻, $R_s < 1 \Omega$ 。

#### 2.2 最大功率跟踪

系统中 DC/DC 变换器采用 Boost 电路,为使其输出电压维持在 440 V,调节占空比  $D$  最为关键,在功率平衡的情形下通过改变  $D$  可间接调节光伏电池工作电压并完成最大功率跟踪<sup>[3]</sup>。

$$U_o = \frac{U_i}{1-D} \quad (2)$$

**基金项目:**国家自然科学基金项目(50877053);天津市自然科学基金项目(09JCYBJC07100)

**定稿日期:**2009-11-26

**作者简介:**周雪松(1964-),男,江西人,博士生导师,教授,研究方向为电力电子和电力系统自动化。

这里采用电导增量法来实现最大功率跟踪,其工作原理如下:由光伏电池在最大功率点处的斜率为零,有:

$$P_{\max}=UI, \quad \frac{dP}{dU}=I+U\frac{dI}{dU}=0 \quad (3)$$

最大功率点处的条件为:

$$dI/dU=-I/U \quad (4)$$

若输出电导的变化量等于输出电导的负值,则光伏电池工作于最大功率点;若  $dI/dU > -I/U$ , 说明  $dP/dU > 0$ , 光伏电池的输出电压应增加, 由式(2)可知, 应减小  $D$  的值, 此时  $D=D-\Delta D$ ; 若  $dI/dU < -I/U$ , 说明  $dP/dU < 0$ , 光伏电池的输出电压应减小, 由式(2)可知, 应增大  $D$  的值, 此时  $D=D+\Delta D$ 。综合以上分析, 其工作流程如图 2 所示。

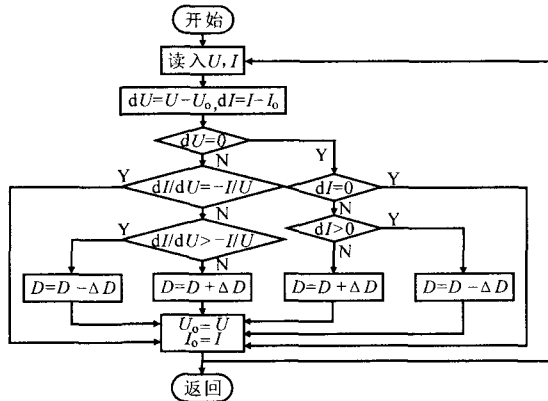


图 2 电导增量法流程图

根据图 2, 在 Matlab / Simulink 下, 借用 Embedded Matlab Function 编程, 最终所得最大功率模块如图 3 所示。

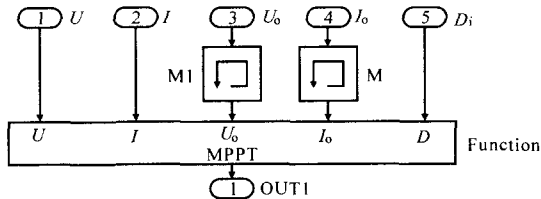


图 3 MPPT 模块图

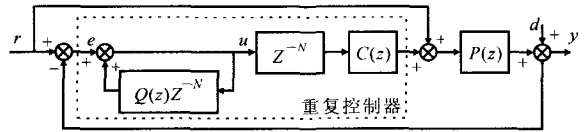
$U, I$  为当前光伏电池输出的电压电流;  $U_0, I_0$  为上一周期光伏电池输出电压、电流, 作为此次循环的初值;  $D_1$  作用同上; 输出为此次循环的  $D$ 。第 1 次循环的初始值  $U_0=62\text{V}, I_0=4.8\text{A}, D=0.86$ 。

### 2.3 并网逆变器

并网逆变器是并网光伏系统的核心部件和技术关键, 不仅可将光伏电池发出的直流电转换为交流电, 还可对频率、电压、电流、相位、有功与无功等进行控制, 从而决定送入电网的电能质量, 以及系统的能量转换效率。对并网逆变器的控制是研究重点, 其所用方法多种多样, 但实际中重复控制技术应用最多<sup>[4]</sup>。

重复控制是基于内膜原理的控制理论, 其基本思想是假设在前一基波周期中出现的波形畸变将会在

下一个基波周期的同一时间重复出现, 控制器根据给定信号与反馈信号的误差来确定所需的校正信号。该控制信号在下一周期被加至原控制信号上来消除基波中出现的重复畸变。逆变器由于自身的死区效应及所带的非线性负载会产生畸变, 应用重复控制可以消除由死区效应产生的畸变和由非线性负载引起的部分波形畸变。图 4 示出重复控制系统的结构图。



$r$  为正弦参考信号;  $y$  为逆变器输出电压;  $d$  为周期性的扰动  
 $e$  为误差信号;  $Z^{-N}$  为周期延迟环节;  $N$  为一个基波周期的采样次数  
 $C(z)$  为重复控制环路的补偿器;  $P(z)$  为控制对象

图 4 逆变器的重复控制图

因带 LC 滤波器的逆变电源在空载时有最强的振荡倾向, 故系统以空载状态谐振频率处的稳定性作为设计指标。图 5 示出逆变器拓扑结构。

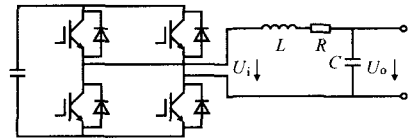


图 5 逆变器结构图

取  $L=0.47\text{mH}, C=20\mu\text{F}$ , 电感的寄生电阻  $R=0.9\Omega$ , 输出到输入的传递函数为:

$$\Phi(s) = \frac{1/(sc)}{sL+R+1/(sc)} = \frac{1}{9.4 \times 10^{-9}s + 1.8 \times 10^{-5}s + 1} \quad (5)$$

经  $Z$  变换后得:

$$P(z) = \frac{0.126z + 0.122}{z^2 - 1.6606z + 0.9087} \quad (6)$$

由于死区效应和非线性负载引起的谐波主要是中低频的, 故在设计控制器时应着重考虑。 $C(z)$  是针对  $P(z)$  设置的, 其目的是使被控对象具有零相移、单位增益特性, 对高频段急剧衰减。为此, 补偿器的形式可设计为  $C(z) = K_r z^k C_1(z) C_2(z)$ , 其中  $C_1(z)$  为二阶低通滤波器;  $C_2(z)$  为零相移 FIR 函数;  $z^k$  为超前环节,  $K_r$  为调整系数。图 6 示出补偿器中各部分的波特图, 可见补偿效果较好。

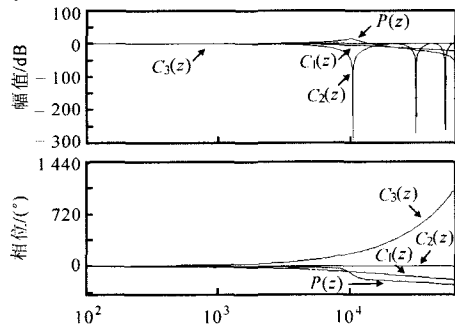


图 6 补偿函数波特图

(1) 滤波器  $C_1(z)$  的设计 由图 6 可见, LC 滤波器在  $1.03 \times 10^4 \text{ rad/s}$  处存在谐振峰值, 对此可借助

$C_1(z)$ 和零相移陷波滤波器来消除,以实现中低频增益为1。为防止 $C_1(z)$ 振荡环节再次出现谐振,阻尼比需大于0.707,这里取值1.6。同时,对补偿系统的滤波器截止角频率可取 $1.03 \times 10^4$  rad/s,这样 $C_1(z)$ 可设计为:

$$C_1(s) = \frac{10300^2}{s^2 + 2 \times 1.6 \times 10300s + 10300^2} \quad (7)$$

经 $z$ 变换得:

$$C_1(z) = \frac{0.0805z + 0.0468}{z^2 - 1.0652z + 0.1924} \quad (8)$$

(2)零相移 FIR 函数 $C_2(z)$ 的设计 单一的二阶滤波器不能有效地消除逆变器的谐振峰值,它在降低高频增益的同时影响到了中低频增益,降低了误差收敛速度和稳态精度,所以要用到零相移 FIR 函数。零相移 FIR 函数为<sup>[9]</sup>:

$$C_2(z) = \left( \sum_{i=0}^m a_i z^i + \sum_{i=0}^m a_i z^{-i} \right) / \left( 2 \sum_{i=0}^m a_i + a_0 \right) \quad (9)$$

此函数对特定频率的衰减远大于 $C_1(z)$ ,且对邻近频率影响小,结合频率响应波特图,设计如下:

$$C_2(z) = \frac{z^6 + 2 + z^{-6}}{4} \quad (10)$$

(3)超前环节的设计 超前环节作为相位补偿环节以补偿由逆变器控制对象 $P(z)$ 和滤波器 $C_1(z)$ 所引入的总相位滞后, $P(z)$ 在中低频段的相位基本为零, $C_1(z)$ 在中低频段有相移,需对其进行补偿,令 $k=6$ 得:

$$C_3(z) = z^6 \quad (11)$$

(4)调整系数的选取 调整系数的选取是为改善系统的性能,其取值范围为 $0 < K_f < 1$ , $K_f$ 若减小,则系统的稳定裕度增大,收敛速度变慢,稳态误差上升;反之相反,这里取 $K_f=0.9$ 。

### 3 模型搭建及仿真

在设计的基础上搭建仿真模型,将逆变器输出并到220V电网上,逆变器开关频率10kHz,调制比取0.8,单位基波周期的采样次数 $N=200$ ,零阶保持器的采样频率 $10^5$ Hz。系统结构如图7所示。

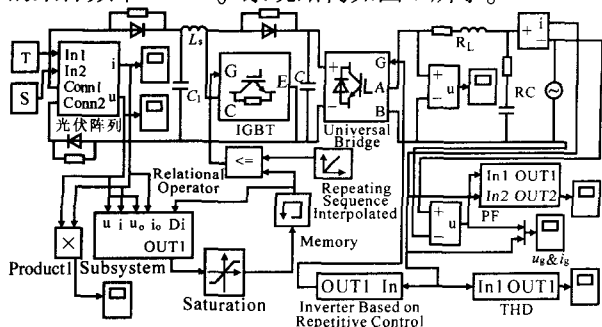


图7 光伏发电并网仿真图

仿真过程中模拟外界环境温度30℃,光照强度1kW/m<sup>2</sup>。求解器选用ode23tb,采用变步长解题器,仿真时间0.1s。仿真波形如图8所示。

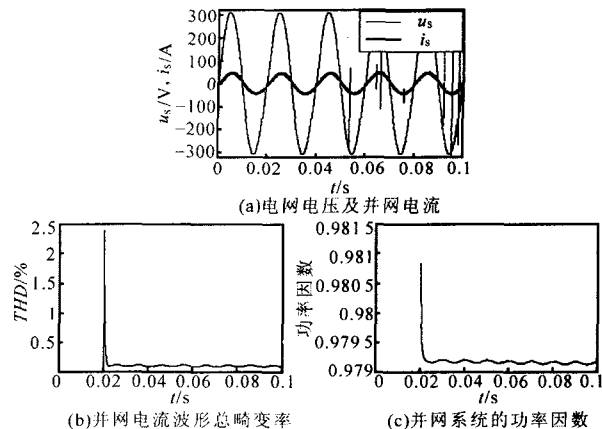


图8 仿真波形

由图8可见,系统不仅能稳定地工作在最大功率点而且能出色的完成并网,能准确迅速地进行最大功率跟踪。并网时,电流为标准正弦波,相位与电网电压几近相同,波形总畸变率约为1%,逆变器功率因数达97.91%,整体效率87.4%,性能优良,符合并网的各项指标。

### 4 结论

运用重复控制技术就两级式光伏发电系统的并网控制进行了详细设计,继而以仿真验证。综合来看,系统波动小,其动态响应速度快,稳态性高。这可为优化系统设计、提高整体效率提供借鉴,具有一定的实际意义。

### 参考文献

- [1] Denis Dondi, Alessandro Bertacchini, Davide Brunelli. Modeling and Optimization of a Solar Energy Harvester System for Self-Powered Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2008, 55(7): 2759-2766.
- [2] Wu Libo, Zhao Zhengming, Liu Jianzheng. A Single-Stage Three-phase Grid-connected Photovoltaic System With Modified MPPT Method and Reactive Power Compensation[J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 2007, 22(4): 52-55.
- [3] Rong-Jong Wai, Wen-Hung Wang. Grid-connected Photovoltaic Generation System[J]. IEEE Trans. on Circuits and Systems, 2008, 55(3): 953-964.
- [4] 胡兴柳. 基于重复控制技术的逆变电源研究[J]. 电力电子技术, 2004, 38(4): 51-53.
- [5] 游志青, 胡育文. 采用重复控制技术的逆变器仿真研究[J]. 机械制造与自动化, 2002, 14(3): 37-40.

欢迎订阅 2010 年度《电力电子技术》期刊

邮发代号: 52-44