

并网光伏发电系统动态建模及仿真分析研究

陆 畅,冯政协,智勇军

(国网河南省电力公司平顶山供电公司,河南 平顶山 467001)

摘 要:以光伏发电系统工程应用需求出发,建立了光伏电池阵列详细数学模型,对光伏电池板特性进行了深入研究,并建立了直流升压斩波电路、最大功率跟踪算法及三相逆变电路电磁暂态数学模型。对光伏电池板的输出特性和光伏发电系统运行功能进行了分析,采用 Matlab/Simulink 仿真验证了理论分析的正确性。

关键词:光伏发电;最大功率跟踪;升压斩波;动态建模

Abstract: Based on the practical requirements of photovoltaic (PV) power generation systems , the mathematical model of PV array is established , the output characteristics of PV panel is analyzed , and the electromagnetic transient models of DC - DC boost chopper , maximum power point tracking (MPPT) controller and three - phase inverter are presented. The output features of PV panel and the operation functions of PV power generation system are analyzed , and the effectiveness of the theoretical analysis is verified by the simulation results from Matlab/Simulink.

Key words: photovoltaic power generation; maximum power point tracking (MPPT); boost chopper; dynamic modeling

中图分类号: TM615 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2016) 02 - 0015 - 05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.02.004

0 引 言

随着传统化石能源的逐渐枯竭,绿色可再生能源得到了迅猛的发展。近年来太阳能光伏(PV)发电技术得到了各国的持续关注,已经成为利用太阳能的主要方式之一。光伏并网系统是世界光伏系统的主流应用方式,即光伏系统通过并网逆变器与当地电网相连,通过电网将光伏系统所发出的电能进行再次分配,如供给当地负载或进行电力调峰等^[1-5]。

随着光伏产业的迅速发展,光伏发电容量的大幅度提升,一些问题也相应地突显出来,例如光伏阵列发电效率低、光伏并网发电对电网影响大、并网逆变器需满足更高的要求^[6-10]。作为光伏并网系统的核心和关键,并网逆变器需满足诸多的要求:实现最大功率跟踪,有功无功解耦控制,输出满足电网电能质量要求,具有更大的单体容量、更高的电压等级等^[11-17]。

针对光伏发电系统工程应用的实际需求出发,

科技项目: 国网河南省电力公司平顶山供电公司科技项目 (SGHAPD00JYJS1500490)

通过建立光伏电池阵列详细模型、光伏电池板特性研究、直流升压斩波电路、最大功率跟踪算法及三相逆变电路模型,研究光伏发电系统的详细电磁暂态模型并给出了基于 Matlab/Simulink 的仿真波形,对光伏电池板的输出特性和光伏发电系统整体运行功能进行了分析,验证了理论分析的正确性。

1 光伏电池阵列模型

当光照射到半导体上时,光子将能量提供给电子,电子将跃迁到更高的能态,在这些电子中,作为实际使用的光电器件里可利用的电子有:价带电子、自由电子或空穴、存在于杂质能级上的电子。光伏电池可利用的电子主要是价带电子,由价带电子吸收光子的能量跃迁到导电的过程决定光的吸收称为本征吸收或固有吸收。

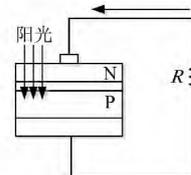


图 1 光伏电池原理示意图

如图1所示,光伏电池能量转换的基础是半导体PN结的光生伏特效应。如果将外电路短路,则外电路中就有与入射光能量成正比的光生电流流过,这个电流称为短路电流,另一方面,若将PN结两端开路,则由于电子和空穴分别流入N区和P区,使N区的费米能级比P区能级高,在这两个费米能级之间就产生了电位差,可以测得这个值,并称之为开路电压。

1.1 单体光伏电池数学模型

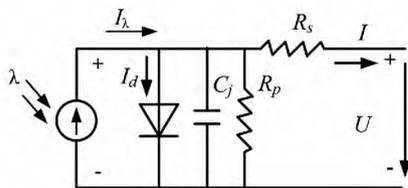


图2 光伏电池精确等效电路模型

光伏阵列具有强非线性伏安特性,根据所需功率等级由一系列光伏组件串、并联形成,而光伏组件又是由一定数量小功率的光伏电池连接而成。图2为光伏电池精确的等效电路模型,它由光生电流源、并联二极管、并联电容、并联电阻和串联电阻组成。光伏电池产生的光生电流 I_λ 与入射光的光照强度 λ 和光伏电池的面积成正比。流经二极管的电流 I_d 随着结电压 U_d 及逆向饱和电流 I_0 不同而变化。

串联电阻 R_s 为电池的体电阻、电极导体电阻、电极和硅表面间接触电阻等组成部分的等效电阻,一般其值很小 R_s 约在 $7.7 \text{ m}\Omega \sim 15.3 \text{ m}\Omega$ 。并联电阻 R_p 是PN结和电池边缘的漏泄电阻等组成部分的等效电阻。一般来说, R_p 在 $200 \Omega \sim 300 \Omega$ 之间。由于光伏电池内器件的瞬时响应时间与绝大多数光伏系统的时间常数相比微不足道,因此结电容 C_j 在分析中常被忽略。参照图2中的电压、电流正方向,可以用式(1)描述光伏电池输出电流 I 。

$$I = I_\lambda - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(U + IR_s)}{AKT}\right) - 1 \right] - \frac{U + IR_s}{R_p} \quad (1)$$

利用该式不可能求出负载电压 U 或电流 I 的显性表达式。定义 U_d 如下:

$$U_d = U + IR_s \quad (2)$$

$$I_\lambda = \lambda [I_{sc} + K_i(T - 298)] \quad (3)$$

将式(2)代入式(1)得到

$$I = I_\lambda - I_0 \left[\exp\left(\frac{qU_d}{AKT}\right) - 1 \right] - \frac{U_d}{R_p} \quad (4)$$

式中: A 为二极管的理想因子,一般在 $1 \sim 2$ 之间变化; K 为玻尔兹曼常数, $K = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; T 为绝对温度,单位为 K ; q 为电子电荷, $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$; λ 为光照强度, kW/m^2 ; I_{sc} 为标准测试条件光照强度 (1 kW/m^2) 及环境温度为 298 K 时所测得的光生电流,在标准测试条件下等式 $I_\lambda = I_{sc}$ 成立; K_i 为光生电流随温度变化系数,一般取 $K_i = 0.0017$ 。

1.2 光伏电池特性研究

假设太阳光照强度和温度不发生变化,光伏电池的输出特性曲线如图3、图4所示。

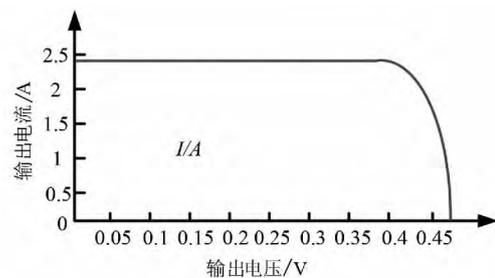


图3 光伏电池 $I-U$ 曲线

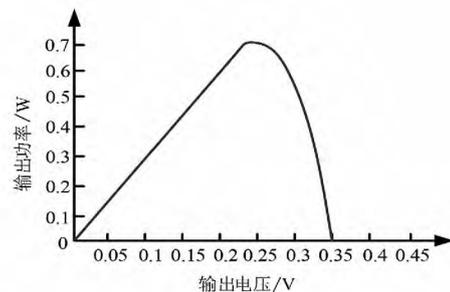


图4 光伏电池 $P-U$ 曲线

从图3和图4可以看出,在一定的光照强度和温度下,光伏电池所输出的电压和电流在一条曲线上变化,同时输出的功率也在随之变化。其中,在 $P-U$ 曲线中存在一点,此时光伏阵列的输出功率最大,此点称为光伏阵列的最大功率点 (maximum power point, MPP),其对应的电流值为最大功率点电流 I_m ,对应的电压值为最大功率点电压 U_m ,由 I_m 和 U_m 构成的矩形面积也是该曲线所能包含的最大矩形面积,称为光伏电池的最大输出功率 P_m ,可由式(5)得出

$$P_m = U_m \times I_m = F_F \times I_{sc} \times U_{oc} \quad (5)$$

式中 F_F 表示光伏电池的填充因子或曲线因数。

3 直流斩波电路模型及 MPPT 算法

3.1 直流升压斩波电路模型

如图5所示,DC/DC变换环节主要作用是调节光伏阵列的工作点,一方面使其工作在最大功率点,另一方面维持输出电压的相对稳定,使系统输入具有比较宽的电压范围。DC/DC环节可以采用多种形式的拓扑结构,通过调节DC/DC变换器的占空比来实现对直流输出电压的控制。

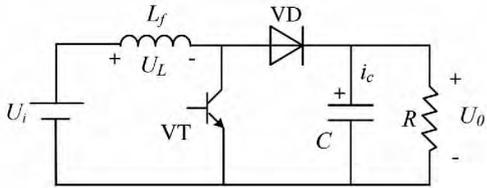


图5 Boost DC/DC变换器电路

Boost变换器是输出电压 \$U_o\$ 等于或高于输入电压 \$U_i\$ 的单管不隔离直流变换器,如图5所示。由图5可见,Boost变换器中电感 \$L_f\$ 在输入侧,一般称为升压电感。开关管VT为PWM控制方式,但它的最大占空比 \$D\$ 必须限制,不允许在 \$D=1\$ 情况下工作。当开关VT导通时,电感 \$L_f\$ 开始储存能量,电感电流随之增加,二极管VD截止,电容 \$C\$ 向负载供电,此时 \$U_L = U_i\$。

当开关VT截止时,由于电感电流不能突变,电感电流逐步减小,产生感应电动势,感应电动势电位左负右正 \$U_L < 0\$,使得单向二极管VD导通,并与电源一起经过二极管向负载供电,同时向电容充电,此时 \$U_L = U_i - U_o\$,由于 \$U_L < 0\$ 成立,所以输出电压大于输入电压,因此,这种变换器适用于蓄电池电压高而太阳能光伏输出电压低的情况。一般来讲,Boost变换器存在电感电流连续(包含临界状态)和电感电流断续两种工作模式。

1) 电感电流连续工作模式

工作于电感电流连续模式时,电路在1个开关周期内相继经历2个开关状态。分析如下:

当 \$t=0\$ 时,驱动开关管导通,二极管VD反偏截止,使输入输出隔离,输入的能量储存在电感中不能输出,电感电流线性上升。两端呈现正向电压 \$U_L = \infty\$。

当 \$t=t_{on}\$ 时,开关管关断,输入的能量与电感储存的能量一起传给负载,假定电路中所有的元件均为理想元件,不考虑电路中功率损耗,电感两端电压 \$U_L = U_i - U_o\$,电感释放能量,电感电流线性衰减。电压在一个周期内的积分等于0,则有

$$U_i t_{on} + (U_i - U_o) t_{off} = 0 \quad (6)$$

因此,输出电压与输入电压和占空比的关系为

$$U_o = \frac{U_i}{1-D} \quad (7)$$

式中 \$D\$ 为开关管占空比。

2) 电感电流断续工作模式

升压型电路中电感电流连续的临界条件为

$$\frac{L}{RT} = \frac{D(1-D)^2}{2} \quad (8)$$

电感电流断续时,总是有 \$U_o > U_i/(1-D)\$,且负载电流越小, \$U_o\$ 越高。在大多数情况下,Boost电路的输出均接在蓄电池或逆变器直流侧。在较小的系统采样时间内,Boost电路的 \$U_o\$ 变化很小,故可得

$$U_i = U_o(1-D) \quad (9)$$

在双级式光伏系统中,Boost电路的输入电压即为光伏方阵的输出电压。由式(9)可知,调节 \$D\$ 即可改变输入电压,从而达到最大功率跟踪(MPPT)目的。可见,如果 \$D\$ 过小, \$U_o\$ 将会小于蓄电池的端电压,从而无法对蓄电池充电,因此 \$D\$ 存在一个最小值 \$D_{min}\$。设Boost电路的输入电压为光伏方阵的开路电压 \$U_{oc}\$,可得

$$D_{min} = 1 - \frac{U_{oc}}{U_o} \quad (10)$$

Boost电路的 \$D\$ 在 \$U_i\$ 变化时,可控制光伏方阵的输入电压在0与方阵开路电压之间变化,光伏方阵在最大功率点处的电压 \$U_m\$ 可通过调整 \$D\$ 来实现。

3.2 最大功率点跟踪方法

采用基于恒电压跟踪法(CVT)的MPPT方法,其原理如图6所示。当环境温度为 \$25^\circ\text{C}\$ 时,光照强度由 \$1000\text{ W/m}^2\$ 变化到 \$250\text{ W/m}^2\$ 时,MPPT分布在同一条垂线两侧,最大功率点处输出电压变化不大,近似认为是恒定的。因此,只要保持光伏电源输出电压等于某一光照强度下的最大功率点的输出电压值,就能基本保持光伏电源以最大功率输出。实际上是把MPPT控制转换为恒电压控制,这是CVT控制的理论依据。

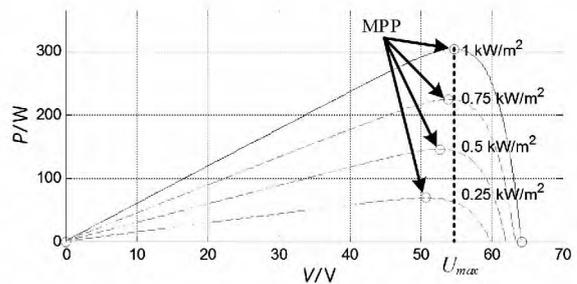


图6 MPPT恒电压跟踪法

4 并网逆变器电路模型

以三相两电平并网逆变器为例,建立了相应的电路模型,并利用坐标变换进行了等效简化,从而为后续并网逆变器控制方案的设计提供理论依据。并网逆变器的直流侧接到光伏阵列的输出端,假设电网为理想电网 LCL 滤波电感为线性电感,逆变侧滤波电感的等效电阻以及功率开关器件的等效电阻用 R_1 表示,并网侧滤波电感等效电阻用 R_2 表示,同时忽略线路上的寄生电阻,基于三相 LCL 滤波器的并网逆变器拓扑结构如图 7 所示。

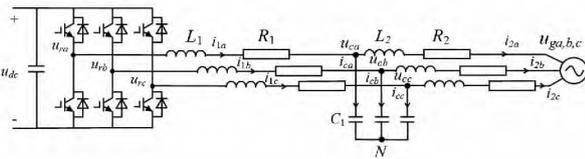


图 7 基于 LCL 滤波的并网逆变器拓扑结构

其中 u_{rabc} 和 i_{1abc} 分别表示并网逆变器的输出侧电压和输出侧电流; u_{cabc} 和 i_{cabc} 分别表示交流侧滤波电容的电压和电流; i_{2abc} 和 u_{gabc} 分别表示并网侧电流和并网电压。当电网电压对称时,根据 KVL 和 KCL 定理建立如下所示的 LCL 滤波器微分方程。

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_{1k}}{dt} + R_1 i_{1k} = u_{rk} - u_{ck} \\ C_1 \frac{du_{ck}}{dt} = i_{1k} - i_{2k} \\ L_2 \frac{di_{2k}}{dt} + R_2 i_{2k} = u_{ck} - u_{gk} \end{cases} \quad (11)$$

式中 $k = a, b, c$ 分别表示各相上的状态方程。LCL 滤波器在 $\alpha\beta$ 静止坐标系下的数学模型如图 8 所示。

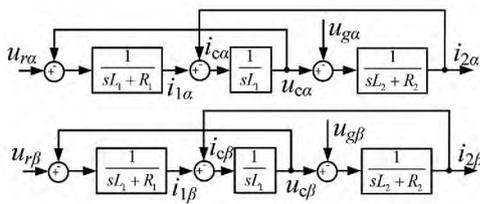


图 8 $\alpha\beta$ 静止坐标系下 LCL 滤波器数学模型

5 仿真分析

5.1 光伏电池模型仿真

根据光伏电池峰值功率 P_{max} 、开路电压 V_{oc} 、短路电流 I_{sc} 、最大功率点电压 V_{mp} 、最大功率点电流

I_{mp} , BP Solar SX3 190 光伏电池在不同光照环境下 ($S = 1 \text{ kW/m}^2, 0.75 \text{ kW/m}^2, 0.5 \text{ kW/m}^2, 0.25 \text{ kW/m}^2$), 温度 $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的 $I-U$ 和 $P-U$ 特性曲线如图 9 所示。

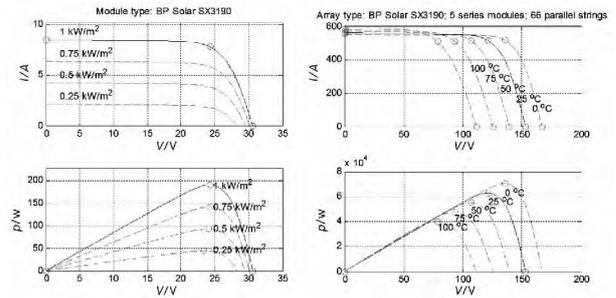


图 9 BP Solar SX3190 光伏模块不同光照 (不同温度) 下 $I-U P-U$ 特性曲线

由图 9 可知,光伏电源既非恒压源又非恒流源,是一个非线性直流电源,在一定的温度下随着太阳光照强度的增加,光伏电源输出电流增加较大,而输出电压变化却较小。光伏电源输出的功率也随着输出电流的增加而不断的增大。由此得出如下结论:光照强度的增加使得光伏电源输出的功率增加;反之,光伏电源输出的功率会减小,因此具有正特性。

在一定的光照强度下,随着温度的变化,光伏电源输出电压变化较大,而输出电流变化较小,但是,温度的影响较光照强度的影响总体上要小得多。由此得出结论:温度的增加使得输出电压减小、输出电流增加,输出功率减少;反之,光伏电源输出的功率会相应增大,具有负温度特性。

5.2 光伏发电系统仿真分析

对三相光伏逆变系统进行了系统仿真,光伏系统通过 Matlab/Simulink 进行软件建模,其仿真模型如图 10 所示。100 kW 的 PV 阵列通过 DC-DC 升压变换器和三相三电平电压源逆变器连接到 25 kV 电网。详细模型包括以下几个部分:

- 1) PV 阵列: 该光伏模块可以在 1000 W/m^2 的光照辐射下传送最大 100 kW 的功率。
- 2) 5 kHz DC-DC 升压变压器: 升压变压器把 PV 的输出电压升高到 500 V。开关占空比通过 MPPT 优化,用了恒电压跟踪的最大功率跟踪方法,MPPT 自动改变占空比以产生需要的电压并且达到最大功率。

3) 三相三电平逆变器: 逆变器将 500 V 的直流电压变换到 260 V 的交流,并且保证单位功率因素。逆变器控制系统采用了双环控制,外环控制环将直

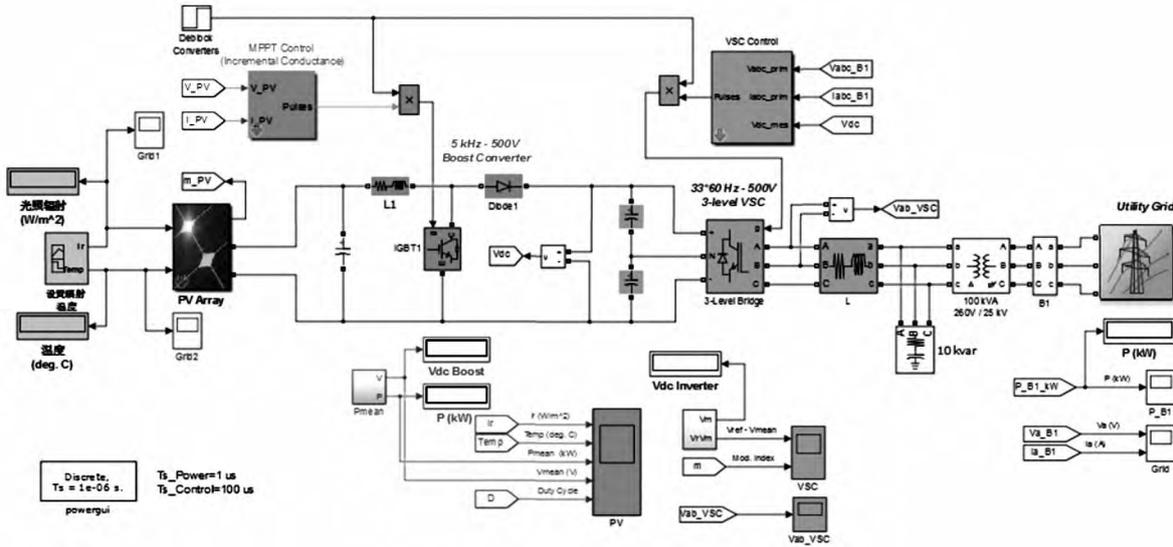


图 10 并网光伏发电系统仿真模型

流母线电压限制为 $\pm 250 \text{ V}$,内环控制分别调节 I_d

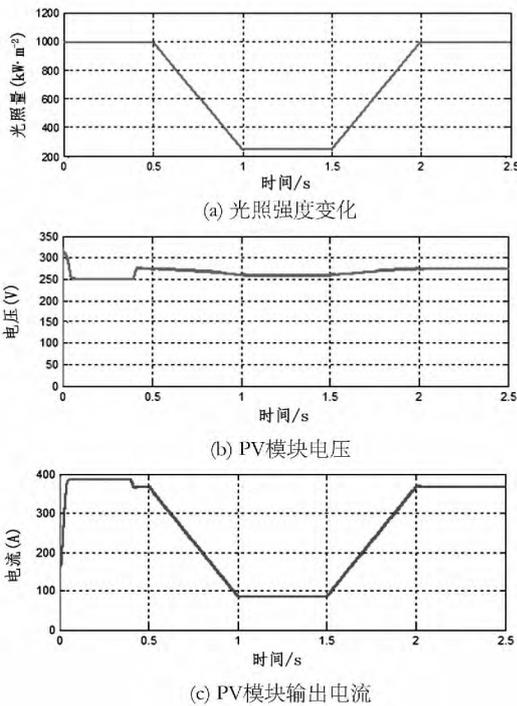


图 11 PV 模块的光照强度、模式电压和输出电流波形图
和 I_q 电网电流 (有功和无功电流)。 I_d 电流参考量是 DC 电压外部控制器的输出 I_q 电流参考设置为 0 以实现单位功率因数。电流控制器 V_d 和 V_q 电压输出被转换成了 3 个调制信号用于 PWM 控制波形。电流/电压控制系统以及 PLL 同步单元都采用了 $100 \mu\text{s}$ 的采样时间。为了得到更好的 PWM 波形, 升压单元的脉冲发生器以及 VSC 变换器采用了更快的采样时间 $1 \mu\text{s}$ 。

4) 电网: 采用 25 kV 线路接入 120 kV 等效网络。

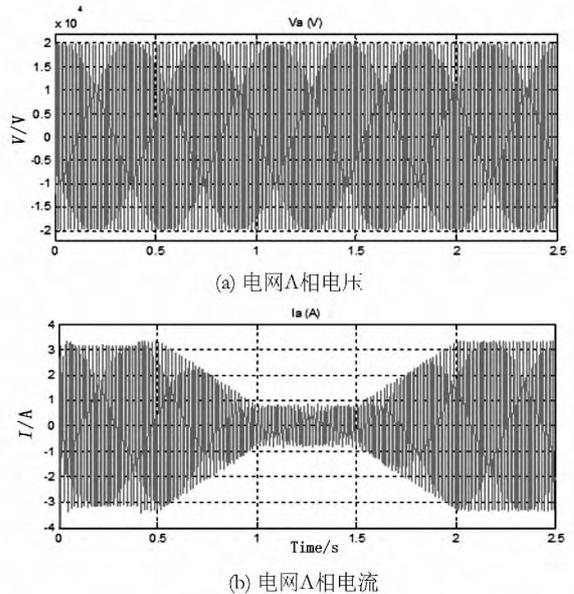


图 12 电网侧 A 相电压和电流波形图

仿真从标准状态开始 ($25^\circ, 1000 \text{ W/m}^2$) ,温度保持不变。如图 11 所示,在 $t = 0.5 \text{ s}$ 时,光照强度从 1000 W/m^2 逐渐降到 250 W/m^2 ,在 $t = 1.5 \text{ s}$ 时,光照强度逐渐恢复至 1000 W/m^2 ;PV 模块电压基本保持不变, PV 模块电流变化趋势和光照强度基本一致,从 400 A 逐渐降到 100 A 。

图 12 为电网 A 相的电压和电流波形,由图 12 (a) 可知,在光照强度变化时,电网 20 kV 母线电压幅值保持恒定,电网电流波形与光照曲线及光伏发电系统有功出力波形保持一致,光伏发电系统始终处于最大功率跟踪状态。

(下转第 58 页)

[2] N. Berbic ,A. Nuhanovic ,V. Madzarevic. Analysis of the Insulated Powergrid Transient Behavior after Faulted Phase Tripping [C]. IEEE MELECON 2004: 106 – 109

[3] Yunge Li ,Wei Shi ,Rui Qin ,et al. A Systematical Method for Suppressing Ferroresonance at Neutral – grounded Substations [J]. IEEE Transactions Power Delivery 2003 , 18(3) : 1009 – 1014.

[4] 王季梅. 高压交流熔断器 [M]. 西安: 西安交通大学出版社 ,2000: 60 – 85.

[5] 韩涛. 电磁式 PT 一次侧熔断器熔断原因分析及防治措施的研究 [D]. 保定: 华北电力大学 2006.

[6] J. Tanggawelu ,B. Mukerjee ,R. N. Ariffin. Ferroresonance

Studies in Malaysian Utility’s Distribution Network [C]. Power Engineering Society General Meeting ,2003: 125 – 128.

[7] 许颖. 电力网中性点接地问题 [J]. 电网技术 ,1991 ,15 (3) : 90 – 93.

[8] E. 斯拉麦卡 ,W. 瓦特西 (西德) . 高低压电网中的暂态过程计算原理 [M]. 北京: 机械工业出版社 ,1983: 11 – 20.

作者简介:

陆 强 (1988) , 硕士 , 助理工程师 , 主要从事电力系统稳定分析与控制的研究。

(收稿日期: 2015 – 12 – 04)

(上接第 19 页)

6 结 论

以光伏发电系统工程应用需求出发 ,建立了光伏电池阵列详细数学模型 ,对光伏电池板特性进行了深入研究 ,并建立了直流升压斩波电路、最大功率跟踪算法及三相逆变电路电磁暂态数学模型。对光伏电池板的输出特性和光伏发电系统运行功能进行了稳态和动态过程分析 ,采用 Matlab/Simulink 仿真验证了理论分析的正确性。

参考文献

[1] Kadri R ,Gaubert J P ,Champenois G. An Improved Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Grid – connected Inverter Based on Voltage – oriented Control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics ,2011 ,58 (1) : 66 – 75.

[2] 张艳霞 ,李璇 ,赵杰. 光伏电源最大功率跟踪的改进扰动观察法 [J]. 天津理工大学学报 2013 29(1) : 21 – 24.

[3] 郑颖楠 ,王俊平 ,张霞. 基于动态等效阻抗匹配的光伏发电最大功率点跟踪控制 [J]. 中国电机工程学报 , 2011 31(2) : 111 – 118.

[4] Tat L N ,Kay – Soon L. A Global Maximum Power Point tracking Scheme Employing DIRECT Search Algorithm for Photovoltaic Systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2010 57(10) : 3456 – 3467.

[5] 王晓 ,罗安 ,邓才波 ,等. 基于光伏并网的电能质量控制系统 [J]. 电网技术 2012 36(4) : 68 – 73.

[6] 孙兴 ,张崇巍 ,孙本新. 采用电流寻优的 MPPT 光伏阵列并网逆变器的研究 [J]. 太阳能学报 2001 22(3) : 306 – 310.

[7] 钱军 ,陶梅玉 ,孙智一 ,等. 光伏电站接入电网对电力系

统电压闪变的影响 [J]. 低压电器 2011(22) : 19 – 22.

[8] 陈四雄 ,曾春保. 兆瓦级光伏并网逆变器关键设计技术 [J]. 电力电子技术 2013 47(4) : 64 – 66.

[9] Widen J ,Wackelgard E ,et al. Impacts of Distributed Photovoltaics on Network Voltages: Stochastic Simulations of Three Swedish Low – voltage Distribution Grids [J]. Electric Power Systems Research 2010 80(12) : 1562 – 1571.

[10] 李峰 ,李威 ,薛峰 ,等. 规模化光伏电站与电网暂态交互影响定量分析 [J]. 电网与清洁能源 ,2011 ,27 (11) : 50 – 56.

[11] Villalva M G ,Siqueira T D ,Ruppert E. Voltage Regulation of Photovoltaic Arrays: Small – signal Analysis and Control Design [J]. IET Power Electronics 2010 3(6) : 869 – 880.

[12] 刘莉敏 ,曹志峰 ,许洪华. 50 kW_p 并网光伏示范电站系统设计及运行数据分析 [J]. 太阳能学报 2006 27 (2) : 146 – 151.

[13] 董伟杰 ,白晓民 ,朱宁辉 ,等. 间歇式电源并网环境下电能质量问题研究 [J]. 电网技术 2013 37(5) : 1265 – 1271.

[14] 杨明 ,周林 ,张东霞 ,等. 考虑电网阻抗影响的大型光伏电站并网稳定性分析 [J]. 电工技术学报 2013 28 (9) : 214 – 223.

[15] 陈权 ,李令冬 ,王群京 ,等. 光伏发电并网系统的仿真建模及对配电网电压稳定性影响 [J]. 电工技术学报 2013 28(3) : 241 – 278.

[16] 龙源 ,李国杰 ,程林 ,等. 利用光伏发电系统抑制电网功率振荡的研究 [J]. 电网技术 2006 30(24) : 44 – 49.

[17] Varma R ,Salama M. Large – scale Photovoltaic Solar Power Integration in Transmission and Distribution Networks [C] // Proceedings of IEEE Power and Energy Society General Meeting ,Detroit 2011.

(收稿日期: 2015 – 12 – 14)