

光伏电路的 PSpice 仿真与实验研究*

方波¹, 陈兰莉²

(1. 许昌学院, 河南 许昌 461000;

2. 南阳理工学院, 河南 南阳 473004)

摘要: 基于硅光伏电池单元的物理模型和光伏组件及光伏阵列的串并联结构, 采用 PSpice 构建了小型硅光伏阵列的仿真模型, 并利用该模型对光伏直流 BUCK 变换电路的开环和恒压控制闭环特性进行了仿真研究。仿真结果与实验数据对比表明, 此模型能够在较高的近似程度上方便地模拟实际光伏电池的行为特性, 将 PSpice 软件用于光伏发电系统的仿真是可行的。

关键词: 光伏组件; BUCK 变换电路; 开环; 闭环; 恒压控制; PSpice 仿真

中图分类号: TM774

文献标识码: A

PSpice simulation and experiment research on photo-voltage circuit

FANG Bo¹, CHEN Lan Li²

(1. Xuchang University, Xuchang 461000, China;

2. Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China)

Abstract: The simulation model of Si type PV array is constructed with the devices in the PSpice library based on physical model of PV cell and parallel/series connection of PV array. Based on this model, open and closed loop characteristics of BUCK circuit is studied by PSpice simulation. Simulation results compared with experiments show that the PSpice model can expediently simulate characteristics of PV groupware to a high approximation degree and PSpice software can be used for PV power system simulation.

Key words: PV Groupware; BUCK circuit; open loop; closed loop; constant voltage control; PSpice simulation

在光伏发电系统的研究开发过程中, 利用计算机对系统进行仿真和辅助设计有着重要的意义。光伏系统仿真虽然能用 MATLAB 下的 SIMULINK/Power System 工具包来实现, 并且在控制策略方面具有很大的优势, 但是其采用的功率器件模型过于简单, 电力电子主电路建模也不够灵活^[1-2]。PSpice 是一款功能强大、应用广泛的电子电路仿真软件, 具有元器件丰富、支持数模混合仿真、使用方便等优点^[3]。本文将 PSpice 仿真软件引入到光伏发电系统, 将基于 PSpice 元器件库的硅型光伏电池仿真模型用于光伏直流变换电路的模拟, 对光伏 BUCK 变换电路的开环特性、闭环特性进行了仿真研究。为了验证基于 PSpice 的光伏发电系统仿真的有效性, 本文对仿真电路进行了实验研究, 并将仿真和实验结果进行了比较。

1 硅型光伏电池的 PSpice 仿真模型^[1-4]

目前应用最广泛的硅型光伏电池的等效电路如图 1 所示, 其中, I_{ph} 为光生电流, I_{ph} 值反映入射光的辐照度。 I_D 为暗电流, 即光伏电池无光照时由外电压作用下 P-N

结内流过的单向电流, 它反映当前环境温度下通过 P-N 结的总扩散电流。 R_s 为等效串联电阻, R_{sh} 为等效旁路电阻, R_L 为电池的外接负载电阻。

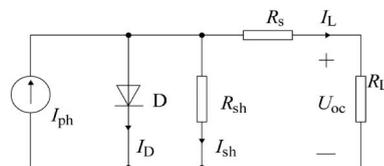


图 1 硅型光伏电池的等效电路

根据图 1 列写各变量方程式如下:

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{qU_D}{AKT}} - 1 \right) \quad (1)$$

$$I_L = I_{ph} - I_D - \frac{U_D}{R_{sh}} = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q(U_{oc} + I_L R_s)}{AKT}} - 1 \right) - \frac{U_D}{R_{sh}} \quad (2)$$

$$I_{sh} = I_0 \left(e^{\frac{qU_{oc}}{AKT}} - 1 \right) \quad (3)$$

$$U_{oc} = \frac{AKT}{q} \ln \left(\frac{I_{sh}}{I_0} + 1 \right) \quad (4)$$

* 基金项目: 2008 年度河南省科技攻关计划项目 (082102240096)

技术与方法

Technique and Method

其中, I_0 为光伏电池内部等效二极管的 P-N 结反向饱和电流, UD 为等效二极管的端电压, I_{sc} 为短路电流, U_{oc} 为开路电压, q 为电子电荷量 ($1.6 \times 10^{-19} C$), k 为玻尔兹曼常量 ($0.86 \times 10^{-4} eV/K$), T 为绝对温度, A 为 P-N 结的曲线常数。

在式(2)中, R_{sh} 一般为几千欧姆, 因此其对光伏电池的输出特性的影响很小, 可忽略不计。

在实际应用中, 将若干上述光伏电池单元进行串联和并联组合, 即构成光伏电池组件, 再由若干光伏组件进行串联和并联组合即构成光伏阵列, 因此采用 PSpice 构建的光伏组件和阵列的仿真模型如图 2 所示。本文所取光伏电池单元串联数 n 为 36, 并联二极管数 m 根据光伏并联数取为 4, 用以模拟 36 串 4 并 SPS005-12 型光伏电池阵列。

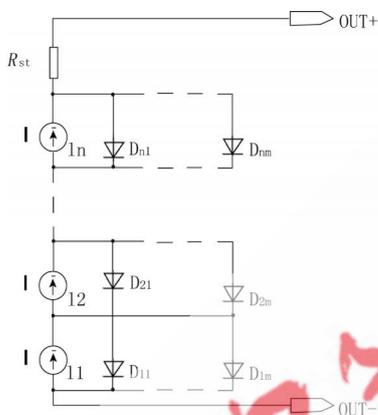


图 2 光伏组件和阵列的 PSpice 仿真模型

2 基于光伏电池 PSpice 模型的 BUCK 变换电路开环特性仿真及实验研究^[5]

由于光伏电池特殊的外特性, 在光伏发电系统中首先要采用直流变换电路进行 DC/DC 变换, 并实现最大功率点自动跟踪。BUCK 电路是实现光伏 DC/DC 变换较常用的电路之一, 其 PSpice 仿真电路如图 3 所示。图中, PV ARRAY 即为图 2 所示光伏阵列模型, D1 为防反充二极管, C1 为蓄能电容, V1 为 PSpice 元件库 SOURCE 子库中 VPULSE 型模拟信号源, 用以设置 BUCK 电路的工作频率和 MOS 管的占空比, E1 为压控电压源, 实现对开关管 M1 的隔离驱动, R3 为电阻负载。

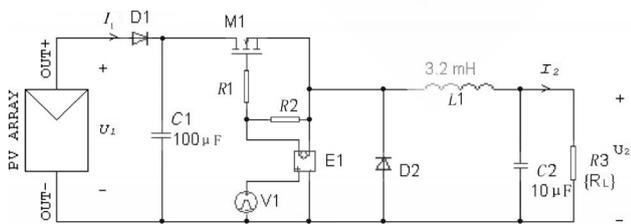


图 3 光伏直流变换器的 PSpice 仿真电路

根据图 3, 若忽略变换电路自身的损耗, 则有如下关系:

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 = U_2^2 / R_L \quad (5)$$

$$U_2 = D U_1 \quad (6)$$

式中, U_1 、 I_1 分别为光伏阵列的输出电压和电流, U_2 、 I_2 分别为 BUCK 变换电路的输出电压和电流, R_L 为 BUCK 电路的电阻负载, D 为占空比。

将(6)式代入(5)式则有:

$$I_1 = \frac{D^2}{R_L} U_1 = \frac{1}{R'_L} U_1 \quad (7)$$

式中, R'_L 为 BUCK 电路负载电阻折算到光伏电池端口上的等效电阻。上式表明, 在一定辐照强度下光伏电池的输出电压和电流不仅受电池本身的 $U-I$ 特性曲线约束, 而且还受外电路特性的约束。当 D 和 R_L 确定后, 光伏电池的外电路特性即 BUCK 电路的输入特性为线性关系, 该过零点的直线与光伏电池的 $U-I$ 特性曲线的交点即为光伏电路的稳态工作点, 如图 4 所示, 图中, $R'_L < R'_L2$ 。

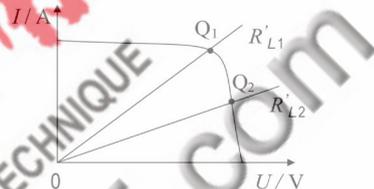


图 4 负载与光伏电池工作点关系

由于环境和负载变化等因素的影响, 占空比和负载常常是变化的, 因而光伏电路也常处于动态之中。(7)式表明, D 和 R_L 是影响光伏电路工作状态的主要因素, 因此, 研究 D 和 R_L 对光伏系统工作状态的影响是必要的。

2.1 负载电阻 R_L 对光伏电路工作状态影响的 PSpice 仿真与实验

假定辐照度不变, 并保持占空比 D 不变, 改变 BUCK 电路的负载电阻 R_L 的大小, 则光伏电池的工作状态随之改变。根据图(2)、图(3), 取光生电流 $I=1400$ mA, 总等效串联电阻 $R_{eq}=5\Omega$, 设 $D=0.8$, 改变负载电阻 R_L , 对基于光伏电池 PSpice 模型的 BUCK 变换电路进行开环负载特性仿真, 根据仿真数据画出的负载特性如图 5 中曲线 1、3 所示。依据图(3)参数对光伏电路的负载特性进行了实验研究, 实验负载特性如图 5 中曲线 2、4 所示。

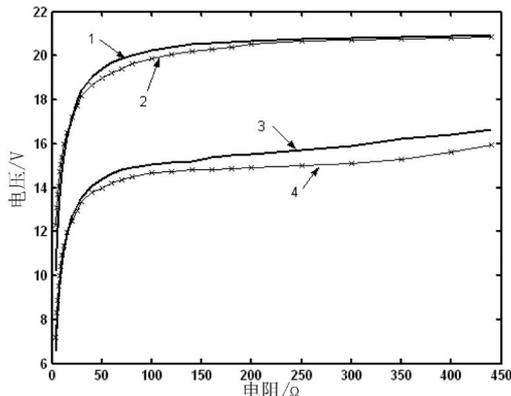


图 5 光伏 BUCK 电路的开环负载特性

《微型机与应用》2010 年第 02 期

技术与方法

Technique and Method

图中，曲线 1、2 分别为光伏电池阵列的输出电压 U_1 随负载电阻 R_L 变化的仿真和实验曲线，曲线 3、4 分别为 BUCK 电路输出电压 U_2 随负载电阻 R_L 变化的仿真和实验曲线。

2.2 占空比 D 对光伏电路工作状态影响的 PSpice 仿真与实验

假定辐照度不变，并保持负载电阻 R_L 不变，改变 BUCK 电路开关管占空比 D 的大小，则光伏电池的工作状态也随之改变。根据图(2)、图(3)，取光生电流 $I=1400\text{ mA}$ ，总等效串联电阻 $R_{st}=5\ \Omega$ ，设负载电阻 $R_L=40\ \Omega$ ，改变占空比 D ，对基于光伏电池 PSpice 模型的 BUCK 变换电路进行开环控制特性仿真，根据仿真数据画出的控制特性如图 6 中曲线 1、3 所示。作为对比，依据图(3)参数进行的实验所描绘的光伏电路开环控制特性如图 6 中曲线 2、4 所示。图中，曲线 1、2 分别为 U_1 随占空比 D 变化的仿真和实验曲线，曲线 3、4 分别为 U_2 随 D 变化的仿真实验曲线。

图 6 表明，仿真和实验结果有较好的一致性，并且光伏系统中光伏电池的输出电压 U_1 在 BUCK 变换电路的控制量占空比 D 的有效控制范围内是随着 D 的增大

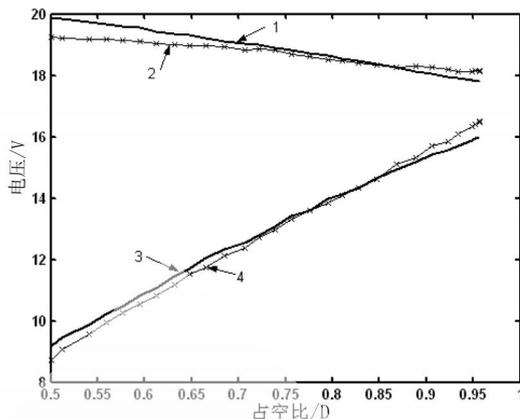


图 6 光伏 BUCK 电路的开环控制特性

而单调递减的(近似为线性)。这一结论对于光伏电池实现最大功率点跟踪(MPPT)控制策略具有实际意义，因为不论哪一种 MPPT 控制算法(包括恒定电压跟踪法、扰动观察法、增量电导法等)，最终都归结为通过占空比的改变来实现对光伏电池工作状态的改变。有鉴于光伏电池 $P-U$ 的单峰特性，占空比与光伏电池工作电压的单调相关性是实现各种 MPPT 算法的前提。

3 基于光伏电池 PSpice 模型的 BUCK 变换电路闭环仿真及实验研究^[3,6]

为了最大限度地发挥光伏电池的发电能力，应在光伏系统中引入闭环控制，以使光伏电池始终工作在最大功率点附近。恒定电压跟踪(CVT)是较实用的最大功率点跟踪方式之一，上述基于 PSpice 的光伏电池模型可用于光伏发电系统的恒定电压跟踪闭环控制仿真，仿真电路如图 7 所示。

图 7 中，OUT+ 和 OUT- 与图 2 相连，D48 为防反充二极管，M4、D47、L1 和 C2 等构成 BUCK 电路，U22、U9A、U16A、U17A、U33A、U34A 等构成 SG3525 控制器的 PSpice 仿真模型，用以模拟 PWM 控制功能，其中，U32、R90、C6 和 R91 等构成 PI 调节器。仿真设置：光伏电池输出设定值为 17.5 V，开关频率 $f_s=10\text{ kHz}$ ，负载电阻 $R_L=20\ \Omega$ ， $t=30\text{ ms}$ 时 R_L 突变为 $10\ \Omega$ ，仿真结果如图 8 所示。图中曲线 1 和曲线 2 分别为光伏电池输

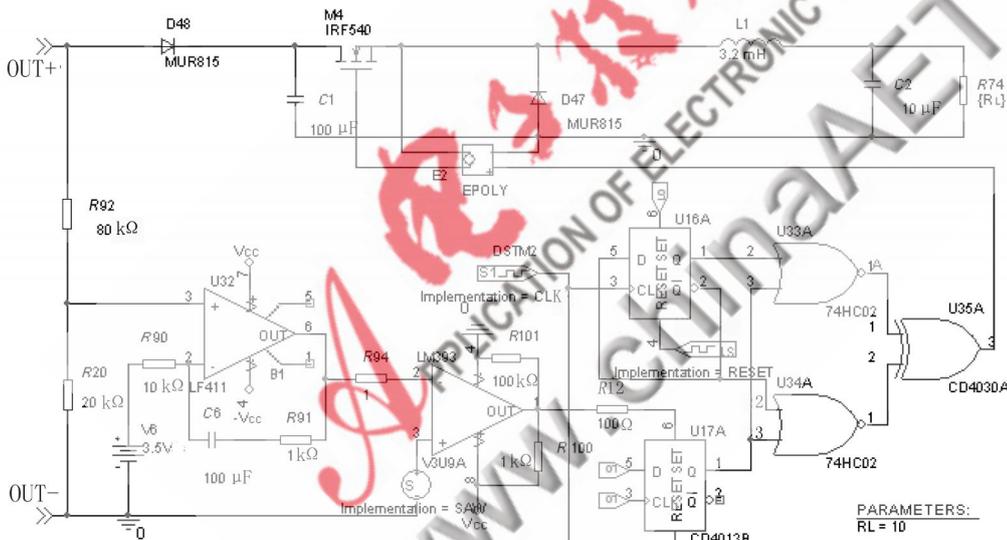


图 7 光伏发电系统恒定电压跟踪闭环控制仿真电路

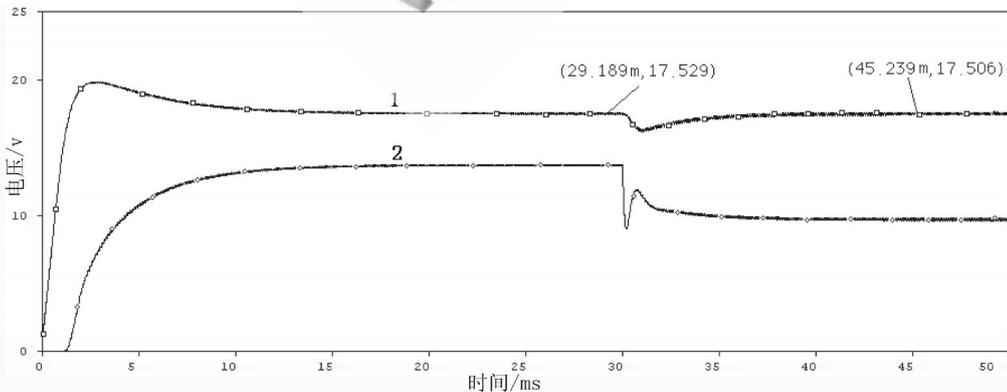


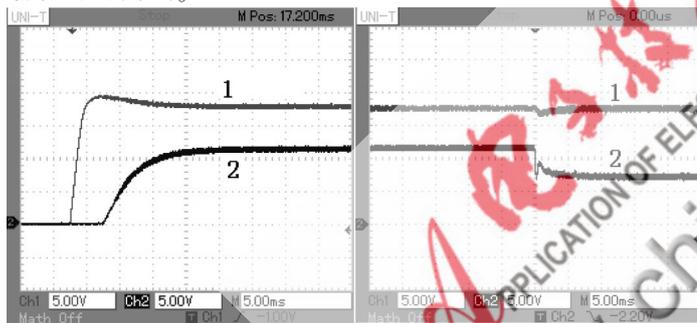
图 8 光伏 BUCK 电路的恒定电压跟踪闭环仿真曲线

技术与方法

Technique and Method

输出电压和 BUCK 电路输出端电压曲线。

根据图 7 所示电路原理和设计参数,采用 SG3525A 型 PWM 控制器和 IR2110 型浮地隔离驱动器搭建了实验电路,用优利德 UT2062C 型数字存储示波器观测的实验波形如图 9(a)、(b)所示。图中,曲线 1 和曲线 2 分别为光伏电池输出电压和 BUCK 电路输出端电压在电路启动时的曲线。



(a) 启动时的实验波形

(b) 负载突变时的实验波形

图 9 光伏 BUCK 电路恒压跟踪的闭环实验波形

本文在构建硅型光伏电池的 PSpice 仿真模型的基础上,利用该模型模拟 PS005-12 型光伏组件功能,实现了光伏直流变换电路的开环仿真运行,分别研究了负载电阻和占空比对电路工作状态的影响,并且构造了 PWM 型控制器 SG3525A 的仿真模型,实现了光伏直流变换电路的闭环仿真。仿真结果与实验实测数据和波形对比表明,本文所建 PSpice 光伏仿真模型能够较好地模拟

程度上方便地模拟实际光伏组件特性和电气功能,因而基于该仿真模型将 PSpice 用于光伏发电系统仿真是可行的。

参考文献

- [1] 赵争鸣,刘建政.太阳能光伏发电及其应用[M].北京:科学出版社,2005.
- [2] 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).
- [3] 贾新章.orCAD/PSpice9 实用教程[M].西安:西安电子科技大学出版社,1999.
- [4] 王长贵,王斯成.太阳能光伏发电实用技术[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [5] 沈辉,曾祖勤.太阳能光伏发电技术[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [6] 倪海东,蒋玉萍.高频开关电源集成控制器[M].北京:机械工业出版社,2004.

(收稿日期:2009-08-18)

作者简介:

方波,男,1973年生,副教授,主要研究方向:电力电子与光伏发电技术。

陈兰莉,女,1972年生,副教授,主要研究方向:物理与电子电气应用。