

光伏并网发电系统的建模与仿真

电气 172 符贵军

指导教师 马春艳

摘要: 太阳能作为一种清洁无污染且可大规模开发利用的可再生能源, 具有广阔应用前景, 所以研究它具有深远意义。论文在分析光伏逆变系统发展现状与研究热点的基础上, 探讨了光伏逆变系统的重要组成模块, 对直接影响光伏逆变系统的工作效率以及工作状态的最大功率点跟踪控制、光伏逆变器控制等技术进行了详细研究。为研究光伏逆变系统, 本文建立了一套完整的光伏逆变系统模型, 主要包括光伏电池模块, 前级 DC/DC 变换器, 后级 DC/AC 逆变器, 以及相应的控制模块。提出了一种基于 Boost 升压变换器的最大功率点跟踪 (MPPT) 控制策略, 并且将正弦脉冲宽度调制技术 (SPWM) 应用于逆变器控制。最后在 Matlab/Simulink 软件环境下搭建了光伏逆变系统的整体模型, 完成系统性的实验验证。

关键词: 光伏逆变系统; 最大功率跟踪; 光伏电池; 正弦脉冲宽度调制技术

Abstract: As a clean, pollution-free and large-scale renewable energy, solar energy has broad application prospects, so it has far-reaching significance to study it. Based on the analysis of the development status and research hotspots of photovoltaic inverter system, this paper discusses the important modules of photovoltaic inverter system, and studies the maximum power point tracking control, photovoltaic inverter control and other technologies that directly affect the working efficiency and working state of photovoltaic inverter system. In order to study the photovoltaic inverter system, this paper establishes a complete photovoltaic inverter system model, including photovoltaic cell module, front stage DC / DC converter, back stage DC / AC inverter, and corresponding control module. A maximum power point tracking (MPPT) control strategy based on boost converter is proposed, and sinusoidal pulse width modulation (SPWM) technology is applied to inverter control. Finally, the overall model of photovoltaic inverter system is built in the MATLAB / Simulink software environment, and the systematic experimental verification is completed.

Keywords: Photovoltaic inverter system; Maximum power tracking; Photovoltaic cells; Sinusoidal pulse width modulation technology

1 背景

随着经济社会的快速发展, 能源消耗急剧增长, 能源危机也引起了越来越多人的关注, 能源危机在我国乃至世界都是一个长期而严重的问题, 它对于经济的发展和环境的变化有着严重的影响。目前世界资源消耗在逐年递增, 主要表现为: 发展稍微落后的发展中国家为了工业和经济的发展, 忽略了生态环境和能源损耗, 使得能源耗量巨大; 在多元化的不断推进下, 能源耗量最大且污染环境的煤炭基本上早已经被后来的石油所代替, 且最近几年天然气的消耗同样是一个持续上升状态, 所以对于清洁无污染能源的开发和利用相关问题的解决刻不容缓。

太阳辐射的能量中被地球最终接收的可达到 5.4×10^{24} 焦耳, 如果这些能量的十万分之一能量转变为被人们方便利用的电能, 就基本上能满足了目前全世界的用电需求。所以利用太阳能来发电不仅可以缓解日益恶化的环境, 还可以从根本上解决现今能源危机, 它作为一种新的电能生产方式, 以其无污染、无噪音、维护简单等特点显示出无比广阔的发展空间和应用前景。光伏并网发电作为

太阳能发电的主要形式之一，也越来越受到关注。因此深入研究光伏并网发电系统，对于缓解能源危机、保护环境、维护社会稳定、促进经济的可持续发展等都具有深远而重大的理论和现实意义。

2 系统总体方案设计

太阳能光伏发电系统主要由光伏电池组件、Boost 升压斩波电路、MPPT 控制及 DC/AC 逆变控制等组成。太阳能电池组件是利用半导体材料的电子特性实现光电转化，把多个相同规格的电池单体经过串并联组合起来就能得到太阳能电池板。Boost 升压斩波可以调节光伏电池输出电压，实现光伏电池的最大功率点跟踪。DC/AC 逆变器控制可以把太阳能电池板发出的直流电逆变成与电网电压同频同相的交流电，然后并入电网。系统主电路如图 2.1 所示。

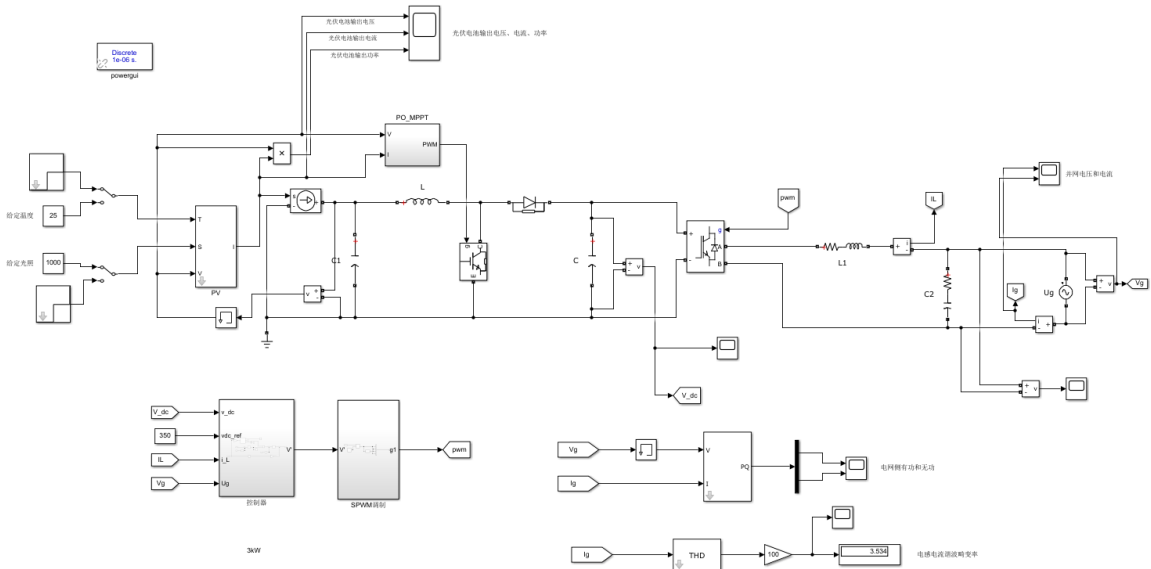


图 2.1 光伏并网发电系统主电路

3 光伏电池建模

光伏电池输出特性具有强烈的非线性，当外界环境温度不变、光照强度变化时，光伏电池短路电流与光强成正比，而开路电压随光强变化不大；当外界环境光照强度不变、温度变化时，对光伏电池的短路电流影响不大，随着温度的上升输出短路电流只是略有增加，但光伏电池的开路电压随温度的上升而下降。

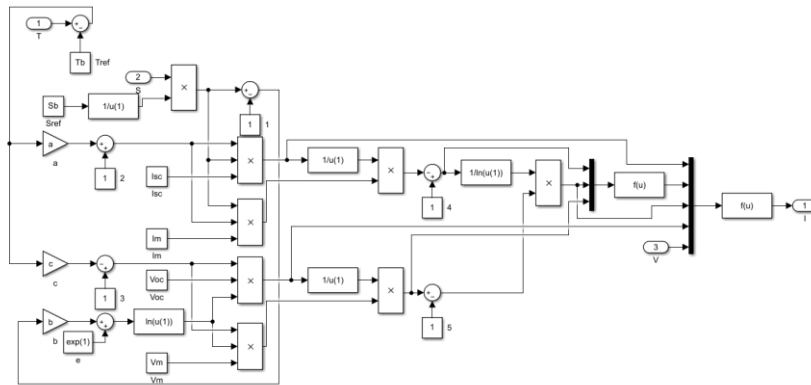


图 3.1 光伏电池模型

在 Matlab/simulink 平台可搭建光伏电池的工程数学模型,如图 3.1 所示。其中 S 为光照强度, T 为环境温度。设定标准条件 $S_{ref}=1000W/m^2$, $T_{ref}=25^\circ C$ 下的最大功率点电流 $I_m=12A$, 最大功率点电压 $V_m=250V$, 开路电压 $V_{oc}=320V$, 短路电流 $I_{sc}=15A$, 补偿系数 $a=0.0025/^\circ C$, $b=0.0005/(W/m^2)$, $c=0.00288/^\circ C$, 最大功率 P_m 为 $3000W$ 。

3.1 光伏特性曲线

由图 3.2 的模型可得出光伏电池的光伏特性曲线。

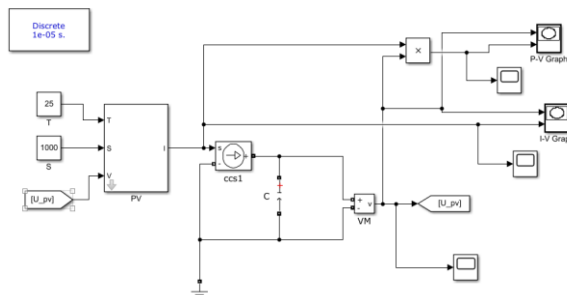


图 3.2 光伏电池输出模块

图 3.3 是电流和电压的特性曲线,可清楚看出开路电压 U_{oc} 为 $320V$, 短路电流 I_{sc} 为 $15A$, 符合前面参数设置。

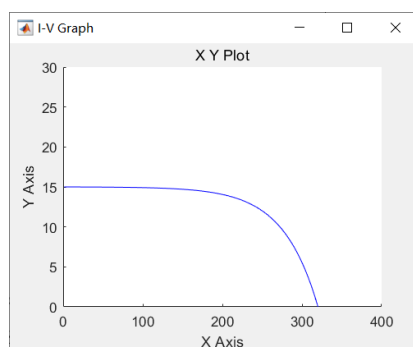


图 3.3 光伏 I-V 曲线

图 3.4 是功率和电压的特性曲线,可大致看出当电压为 $250V$, 功率有最大值为 $3KW$, 而由上图可得出当电压在 $250V$ 时, 电流大约为 $12A$, 因此也符合前面参数以及最大功率的设置。

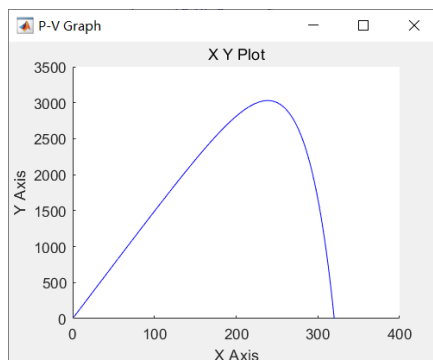


图 3.4 光伏 P-V 曲线

4 基于 Boost 电路的 MPPT 建模

4.1 MPPT 建模

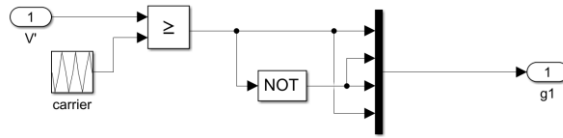


图 5. 2pwm 信号输出模块

逆变系统的控制部分采用经典的双闭环控制和 SPWM 调制产生 4 路 pwm 波信号，来驱动逆变器并网运行。其中的双闭环控制模块里，直流电压外环经过 PI 调节器来生产一个电流参考值， U_g 经过一个锁相环得到一个正弦 $\sin\omega t$ ，再与前面的电流参考值相乘得到正弦波电流，再与内环电流相减后通过 PI 调节器后，再加上一个电压前馈即可得到一个调制波，接着与载波信号进行比较，就可以输出 4 路 pwm 信号。

6 并网后波形分析

6.1 并网电压电流曲线

图 6.1 是额定温度 25°C 和额定光照 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 下最终并网的电压和电流，其电压幅值为 310V 左右，即有效值为 220V，并且电压和电流同频同相：

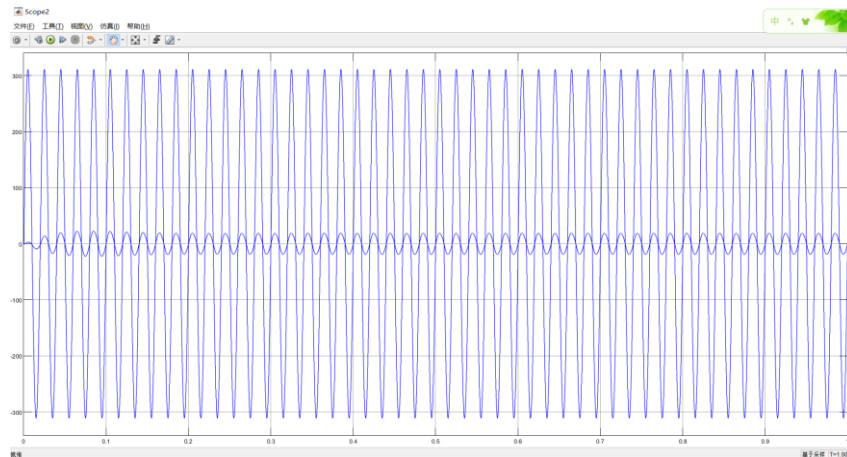


图 6.1 并网电压电流同频同相曲线 1

图 6.2 是改变光照强度，从 600 到 800 再到 $1000\text{W}/\text{m}^2$ （时间间隔为 0.4s），所输出的最终并网的电压和电流，在 0.4s 和 0.8s 这 2 个时刻，随着光强突然增大，电压基本保持不变，其电压幅值都为 310V 左右，即有效值为 220V；而交流电流的幅值增大了，所以可得出交流电流与光强的变化成正相关，而交流电压基本上不随光强变化而变化，并且电压和电流始终同频同相：

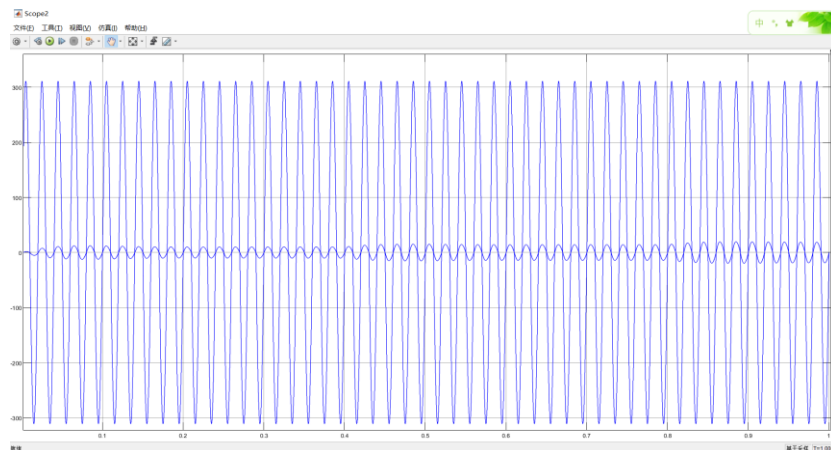


图 6.2 并网电压电流同频同相曲线 2

图 6.3 改变温度，从 25 到 50 再到 75℃，所输出的最终并网的电压和电流，在 0.4s 和 0.8s 这 2 个时刻，随着温度突然增大，电压基本保持不变，其电压幅值都为 310V 左右，即有效值为 220V，交流电流幅值也没有变化，并且电压和电流始终同频同相：

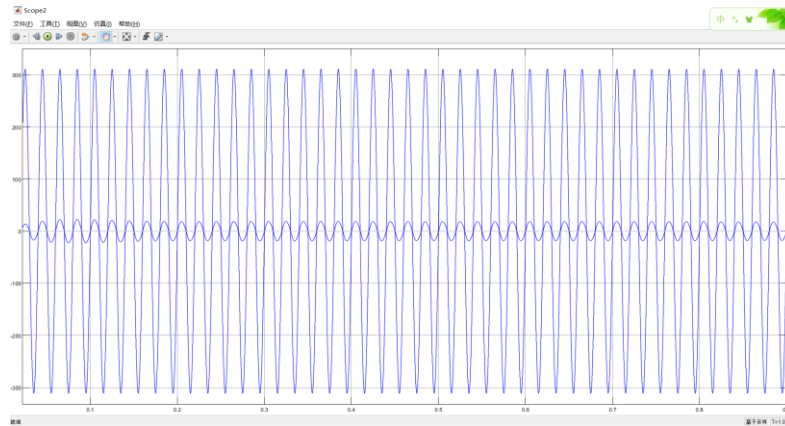


图 6.3 并网电压电流同频同相曲线 3

6.2 电网侧有功无功曲线

图 6.4 为额定温度 25℃和额定光照 1000 W/m²下电网侧的有功功率和无功功率，除最开始有功功率有点波动外，后面都趋于 3KW，相比于光伏电池的输出有功功率略微减小，这是因为从光伏到并网有一定的损耗，但是损耗极小，无功功率基本上为 0，也正是所设计的功率值：

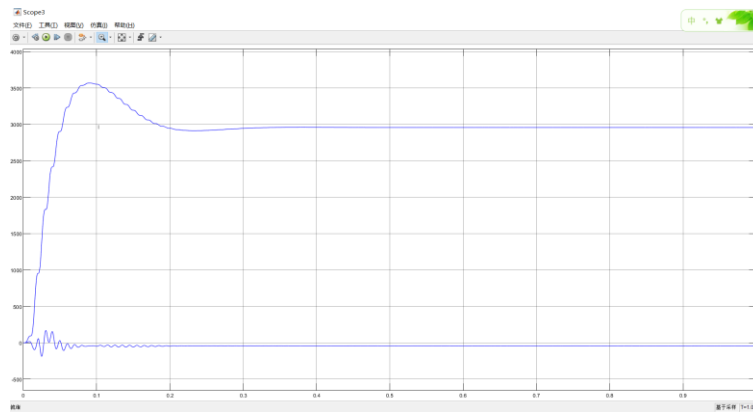


图 6.4 电网侧有功和无功曲线 1

图 6.5 是改变光照强度，从 600 到 800 再到 1000 W/m²（时间间隔为 0.4s），所输出的电网侧的有功功率和无功功率，在 0.4s 和 0.8s 这 2 个时刻，随着光强突然增大，有功功率也都明显增大，呈现阶梯状，无功功率会在光强突变点有很小的波动，总体基本上仍然为 0：

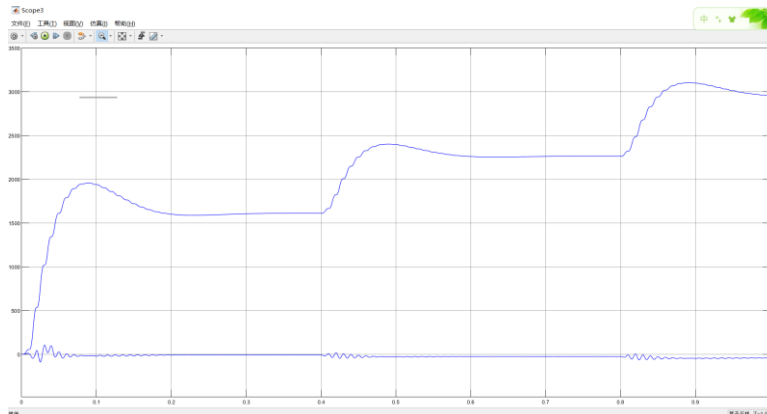


图 6.5 电网侧有功和无功曲线 2

图 6.6 是改变温度，从 25 到 50 再到 75℃，所输出的电网侧的有功和无功功率，在 0.4s 和 0.8s 这 2 个时刻，随着温度突然增大，有功功率变化不明显，有略微的下降，无功功率会在温度突变点有极小的波动，总体基本上仍然为 0：

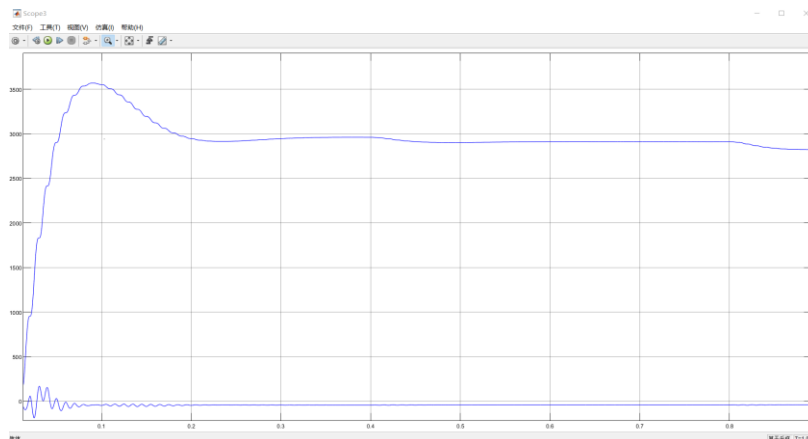


图 6.6 电网侧有功和无功曲线 3

7 结论

本文设计了单相光伏并网发电系统的主电路拓扑结构。DC/DC 变换环节调整光伏阵列的工作点使其跟踪最大功率点；DC/AC 逆变环节使输出电流与电网电压同频率，采用调制法得到逆变电路的 pwm 驱动信号能使逆变电路开关易于控制。这种两级式电路克服了单级式结构需要变压器、电压波动大的缺陷，最后在 Matlab/Simulink 软件环境下搭建了光伏逆变系统的整体模型，完成系统性的实验验证。

8 参考文献

- [1] 傅望. 光伏电池工程用数学模型研究[J]. 电工技术学报, 2011: 26-10.
- [2] 王志兵. 单相光伏并网逆变器的研究[D]. 江苏科技大学硕士学位论文, 2012.
- [3] 崔容强, 喜文华, 魏一康, 等. 太阳能光伏发电[J]. 太阳能学报, 2004(4): 72-76.
- [4] 洪乃刚. 电力电子和电力拖动控制系统的 MATLAB 仿真[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 129-133.
- [5] 王岩. 光伏发电系统 MPPT 控制方法的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2007.
- [6] 周阳. 光伏发电系统中双模式逆变器控制策略研究[D]. 华北电力大学硕士学位论文, 2013.
- [7] 刘俊杰. 浅议太阳能光伏发电系统[J]. 科技资讯, 2009 (32): 75.
- [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(4): 64-66.
- [9] 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, 2009: 48-52.
- [10] 苏海滨, 王光政, 王继东. 基于模糊逻辑双环控制的光伏发电系统最大功率跟踪算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010(22): 215-218.
- [11] 白春艳, 王飞, 宋博. 基于电导增量法与模糊控制组合的 MPPT 技术研究[J]. 江苏师范大学学报(自然科学版), 2013 (1): 48-52.
- [12] 张超. 光伏并网发电系统 MPPT 及孤岛检测新技术的研究[D]. 浙江大学博士学位论文, 2006.
- [13] 黄寻. 光伏并网逆变器发展情况概述[J]. 新材料产业, 2011(11): 72-75.
- [14] 刘军明. 单相光伏并网逆变器的研究[D]. 山东大学硕士学位论文, 2012.
- [16] 杜毅. 户用型光伏网发电控制技术研究[D]. 西南交通大学硕士学位论文, 2012.