



光伏发电系统 最大功率点跟踪及 电流控制技术

吴小进 著



化学工业出版社



光伏发电系统 最大功率点跟踪及 电流控制技术

吴小进 著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书在总结光伏阵列及并网逆变器相关研究的基础上,重点针对复杂光照环境下光伏发电系统最大功率点跟踪及并网逆变器电流控制方面展开探讨。对不同拓扑结构的光伏阵列输出特性进行了理论推导,采用模块化编程的方法构建了光伏阵列的仿真模型,阐述了光伏阵列优化配置的基本原则,提出了基于多重区间的最大功率点跟踪方法,并对并网逆变器的预测电流控制方法进行了详细的阐述。

本书适用于高等院校从事电力电子、光伏发电等研究方向的教师、研究生和高年级本科生,亦可为从事光伏发电工程应用的科技人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

光伏发电系统最大功率点跟踪及电流控制技术/吴小进著. —北京:化学工业出版社,2018.7
ISBN 978-7-122-32400-9

I. ①光… II. ①吴… III. ①太阳能光伏发电—研究
IV. ①TM615

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第130719号

责任编辑:李军亮 万忻欣
责任校对:宋 夏

装帧设计:张 辉

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印 装:北京虎彩文化传播有限公司
850mm×1168mm 1/32 印张5¼ 字数12
2018年10月北京第1版第1次印刷



购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:48.00元

版权所有 违者必究

前 言

随着世界人口的持续增长以及经济的不断发展，世界范围内的能源危机和环境污染已成为制约社会可持续发展的两大重要因素。近年来，可再生能源的发展和应用为解决上述问题提供了有效的途径，光伏发电作为能源转换的一种重要形式，以其发电过程中无污染、维护简单等优点成为国内外高度关注的发展方向。

本文以光伏发电系统作为研究对象，重点对光伏阵列最大功率点跟踪及并网逆变器电流控制两个方面展开探讨。光伏阵列作为光伏发电系统的能量提供单元，其功率输出具有复杂的非线性特性，受到温度、光照强度等外部环境的影响而发生变化，特别是在局部阴影、部分遮挡等复杂光照环境下，工程应用中需要对光伏阵列的输出功率进行跟踪控制，最大限度地提高光伏阵列的转换效率。本

文在总结光伏组件及光伏阵列相关研究的基础上，重点针对复杂光照环境下光伏阵列输出特性的理论推导和仿真建模展开探讨，研究了基于多重区间的最大功率点跟踪方法。并网逆变器电流控制是光伏发电系统并网的关键技术之一，本文总结了预测电流控制算法的构建原则，通过改进目标电流误差方程和目标输出电压方程，研究了单相并网逆变器预测电流控制方法，分析了影响控制系统稳定性的关键因素，总结了控制系统对电感参数不匹配的容忍度与各模型参数之间的关系，为工程应用中器件参数的选取提供依据。

全书共分6章。第1章综述了光伏组件、光伏阵列以及并网逆变器等方面研究的国内外现状；第2章阐述了光伏组件仿真模型的构建方法及其输出特性，介绍了几种常用的光伏组件最大功率点跟踪方法，并对最优梯度法进行了仿真验证；第3章针对不同拓扑结构的光伏阵列在复杂光照环境下的输出特性进行了理论推导；第4章采用模块化编程的方法构建了光伏阵列的仿真模型，并对不同拓扑结构的光伏阵列输出特性进行仿真分析，提出了光伏阵列优化配置的基本原则；第5章探讨了斐波那契数列和变步长扰动观测法在光伏阵列最大功率点跟踪中的应用，并以此为基础提出了一种复杂光照环境下基于多重区间的最大功率点跟踪方法；第6章针对并网逆变器的预测电流控制算法进行阐述，构建了一种基于预测电流的控制模型，并分析了模型参数对控制系统的影响。

在本书稿编写整理过程中，北京交通大学魏学业教授给出了宝贵的修改意见，在此深表感谢。由于笔者的水平有限，加之时间仓促，书中不妥之处在所难免，诚恳欢迎广大读者和各位同仁批评指正。

吴小进

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	2
1.2 光伏组件相关研究现状	3
1.2.1 光伏组件的仿真建模研究	4
1.2.2 光伏组件的 MPPT 算法研究	5
1.3 光伏阵列相关研究现状	7
1.3.1 光伏阵列的输出特性研究	7
1.3.2 光伏阵列的仿真建模研究	8
1.3.3 光伏阵列的优化配置研究	9
1.3.4 光伏阵列的 MPPT 算法研究	11
1.4 并网逆变器相关研究现状	12
1.4.1 并网逆变器的拓扑结构及分类	12
1.4.2 并网逆变器电流控制	14

第2章 光伏组件输出特性及其最大功率点跟踪 17

2.1 光伏组件输出特性分析	18
2.1.1 光伏组件的数学模型	18
2.1.2 光伏组件的仿真建模	20
2.1.3 光伏组件模型参数对输出特性的影响	23
2.2 光伏组件最大功率点跟踪控制	29
2.2.1 光伏组件最大功率点跟踪的意义	29
2.2.2 几种常用的最大功率点跟踪算法	31
2.3 基于最优梯度法的最大功率点跟踪	36
2.3.1 最优梯度法的基本原理	36
2.3.2 改进型最优梯度法 MPPT	38
2.3.3 仿真验证	40

第3章 复杂光照环境下光伏阵列的输出特性 43

3.1 光伏阵列的分类及分析思路	44
3.1.1 光伏阵列的分类	44
3.1.2 分析思路	45
3.2 串联式光伏阵列输出特性推导	45
3.2.1 由两个组件构成的串联式光伏阵列	46
3.2.2 由 N 个组件构成的串联式光伏阵列	51
3.3 并联式光伏阵列输出特性推导	55
3.3.1 由两个组件构成的并联式光伏阵列	56
3.3.2 由 N 个组件构成的并联式光伏阵列	60
3.4 集中式光伏阵列输出特性推导	65
3.4.1 3×3 集中式光伏阵列	66

3.4.2	$M \times N$ 集中式光伏阵列	71
-------	----------------------------	----

第4章 光伏阵列仿真模型及优化配置 74

4.1	基于模块化编程的光伏阵列建模	75
4.1.1	光伏阵列建模的基本思路	75
4.1.2	光伏阵列建模的基本流程	77
4.2	光伏阵列输出特性仿真	79
4.2.1	串联式光伏阵列的仿真分析	79
4.2.2	并联式光伏阵列的仿真分析	82
4.2.3	集中式光伏阵列的仿真及实验	85
4.3	光伏阵列的优化配置	91
4.3.1	仿真分析	91
4.3.2	理论分析	97
4.3.3	优化配置原则	99

第5章 复杂光照环境下光伏阵列最大功率点跟踪 101

5.1	改进型 Fibonacci 搜索法在 MPPT 中的应用	102
5.1.1	Fibonacci 搜索法的基本原理	102
5.1.2	改进型 Fibonacci 搜索法	104
5.2	改进型变步长扰动观测法在 MPPT 中的应用	106
5.2.1	扰动观测法的工作原理	106
5.2.2	改进型变步长扰动观测法	107
5.3	基于多重区间的最大功率点跟踪算法	109
5.3.1	控制流程	109

5.3.2 仿真验证	111
------------------	-----

第6章 并网逆变器预测电流控制策略 115

6.1 预测电流控制算法对比分析	116
-------------------------------	------------

6.1.1 预测电流控制的基本原理	116
-------------------------	-----

6.1.2 预测电流控制算法的构成	117
-------------------------	-----

6.1.3 预测电流控制算法稳定性分析	119
---------------------------	-----

6.2 改进型预测电流控制算法	122
------------------------------	------------

6.2.1 改进型算法的构成	122
----------------------	-----

6.2.2 改进型算法的稳定性分析	123
-------------------------	-----

6.2.3 仿真与实验	126
-------------------	-----

6.3 预测电流控制模型	130
---------------------------	------------

6.3.1 预测电流控制模型的构建	130
-------------------------	-----

6.3.2 预测电流控制模型的稳定性分析	132
----------------------------	-----

6.3.3 仿真验证	136
------------------	-----

参考文献	140
-------------------	------------

第1章 绪论

1.1 引言

光伏发电系统按照不同的工作模式可以分为离网式和并网式两大类。离网式光伏发电系统的拓扑结构如图 1-1 所示，由光伏阵列、最大功率点跟踪（Maximum Power Point Tracking, MPPT）控制器、充放电控制器、光伏逆变器、蓄电池以及交、直流负载等构成。光伏阵列作为能量提供单元，一方面，将输出的直流电经 MPPT 控制器和充放电控制器后为蓄电池充电，而蓄电池则作为电源向直流负载供电；另一方面，输出的直流电经过逆变器变换之后，将直流电转换为交流电，为交流负载提供电源。离网式光伏发电系统的结构简单，易于控制，可充当便携式电源，适用于无电网地区用电设备的供电，如海岛路灯、山区通讯基站等。

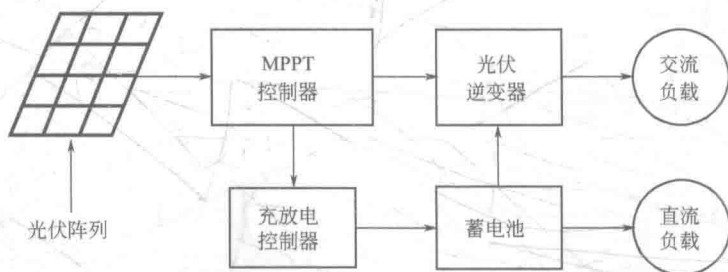


图 1-1 离网式光伏发电系统拓扑结构

并网式光伏发电系统的拓扑结构如图 1-2 所示，由光伏阵列、直流变换电路、逆变器、断路器、控制单元和交

流负载等构成。由光伏阵列输出的直流电经直流变换电路和逆变器变换后，输出与电网同频同相的交流电，一方面向本地交流负载供电，另一方面将多余的电能补给电网，如果电网发生故障时，控制单元将控制断路器动作，以保障本地交流负载可靠运行，防止电网事故的发生。并网式光伏发电系统结构复杂，控制难度较大，适用于区域大功率发电。

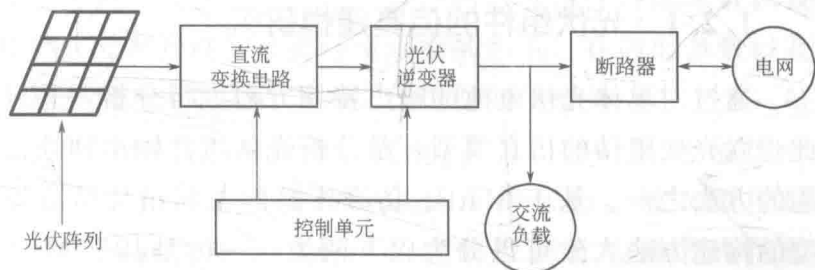


图 1-2 并网式光伏发电系统拓扑结构

目前，针对光伏发电系统的研究主要集中在以下几个方面：

- ① 光伏发电系统仿真平台设计；
- ② 最大功率点跟踪控制；
- ③ 并网逆变器控制策略；
- ④ 孤岛效应检测。

1.2 光伏组件相关研究现状

光伏电池（Photovoltaic Cell, PV Cell）是利用光生

伏特效应把光能转化为电能的器件，是用于光电转换的最小单元，一个光伏电池单体产生的电压仅为 0.5V 左右，工作电流为 $20\sim 25\text{mA}/\text{cm}^2$ ，无法直接应用于光伏发电系统。工程应用中，通常将几十个或几百个单体光伏电池按负载需要，以串联方式组合并封装起来，构成光伏组件 (PV Module)，以满足负载的用电需求，光伏组件实际上是光伏发电系统中最基本的供电单元。

1.2.1 光伏组件的仿真建模研究

通过对单体光伏电池的输出特性方程进行分析，并以此建立光伏组件的仿真模型，是分析光伏组件输出特性常用的方法之一。基于 Matlab 仿真工具的光伏组件仿真模型的构建方法大致可以分为以下两类：一类是基于 M 文件，结合组件的特性方程编写程序构建仿真模型^[1~4]；另一类是基于 Simulink 仿真模块，结合组件的等效电路搭建仿真模型^[5~8]。

早在 1999 年，国外学者 J. A. Gow 等，提出了含有双二极管的单体光伏电池建模方法，使光伏组件的仿真结果更接近实际的输出特性^[1]；学者 Walker 根据单体光伏电池的电流特性方程，提出了基于 M 文件的光伏组件建模方法，通过改变模型中温度和光照强度等变量的输入，仿真不同环境下光伏组件的输出特性曲线^[2]；国内学者崔岩等，基于 M 文件建立了带有 MPPT 功能的光伏组件仿真模型，并在此模型的基础上进行了 MPPT 仿真^[3,4]；国外学者 Aleksandar Stjepanović 等，基于 Simulink 对光伏组

件进行了模块化仿真,适用于光伏发电系统中逆变器的仿真^[6];国内学者邱纯等,在 Simulink 环境中建立了等效电路的仿真模型,适用于光伏发电系统的 MPPT 特性及策略研究^[7]。

1.2.2 光伏组件的 MPPT 算法研究

光伏组件的输出特性具有复杂的非线性特性,并受到光生电流、反向饱和电流、串联内阻等组件内部参数以及温度、光照强度等外部环境因素的影响,在内部参数以及外部环境一定的条件下,光伏组件的功率-电压(P-V)特性曲线存在最大功率点。因此,对于光伏发电系统来说,应当寻求光伏组件的最优工作状态,最大限度地 将光能转换为电能。利用相应的控制方法调节光伏组件的工作点电压,使其工作在最大功率点处,保证光伏组件持续输出最大功率,这个调节的过程称为最大功率点跟踪。

目前,针对光伏组件的最大功率点跟踪问题,已有许多解决方案,根据不同的工作原理大致可分为以下几类:一类是基于输出特性曲线的开环 MPPT 方法,包括恒定电压法^[9,10],插值计算法^[11,12]等;另一类是自寻优类 MPPT 方法,包括扰动观测法^[13~16]、电导增量法^[17~22]、开路电压函数法^[23,24]、最优梯度法^[25~28]等;随着智能控制理论的发展,模糊逻辑控制、人工神经网络等理论渗入到电气工程的各个领域,并在光伏发电的 MPPT 控制中得以应用,主要包括模糊控制法^[29~36]和神经网络

法^[37~45]等。学者范钦民等，通过对不同光照环境下的最大功率点进行拟合，由光伏组件的输出功率和环境温度得到一个用于模糊控制器输入的电压值，在使用模糊控制使光伏组件的输出功率稳定在最大功率点附近后，再使用电导增量法追踪并稳定在最大功率点^[34]。学者韩丽等，提出可在线调整结构的快速资源优化网络，然后以温度、光伏阵列电压和功率为网络输入，以最大功率点电压为输出，建立 MPPT 神经网络模型^[44]。

工程应用中通常将 DC/DC 变换电路作为 MPPT 控制的调节装置，通过调节变换电路中功率开关管的占空比来控制光伏组件的工作点电压，从而实现最大功率点跟踪。图 1-3 所示为一种离网式光伏发电系统 MPPT 调节装置的电路结构框图，其中 DC/DC 变换电路选取 Boost 升压电路。MPPT 控制器通过采集回路中的电压、电流等信息，在控制器中实现各种 MPPT 算法，并输出 PWM 信号调节功率开关管 S 的占空比，达到最大功率点跟踪的目的。

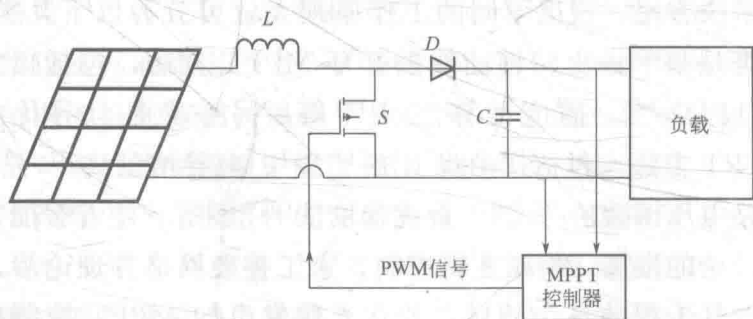


图 1-3 光伏发电系统 MPPT 调节电路

1.3 光伏阵列相关研究现状

光伏阵列是由若干个光伏组件按照不同的拓扑结构组合而成，除了具有光伏组件复杂的非线性输出特性以外，光照环境以及拓扑结构都是影响光伏阵列相关特性的重要因素。均匀光照环境下，构成光伏阵列的所有光伏组件具有相同的光照强度，光伏阵列的相关特性较光伏组件并未发生本质变化，针对均匀光照环境下光伏阵列的研究方法与光伏组件大致相同。如果光伏阵列被飞鸟、建筑物、乌云等物体遮挡，即光伏阵列处于复杂光照环境下，此时阵列中部分组件处于阴影状态，将导致光伏阵列的相关特性较均匀光照时发生本质变化。因此，关于光伏阵列的研究重点集中在复杂光照环境下光伏阵列的输出特性、仿真建模、优化配置以及最大功率点跟踪四个方面。

1.3.1 光伏阵列的输出特性研究

针对复杂光照环境下光伏阵列的输出特性已有学者展开研究，研究方法主要有以下两类：一类是通过建立光伏阵列在复杂光照环境下的仿真模型，在P-V特性曲线的基础上，对光伏阵列的输出特性展开研究^[46~52]；另一类是基于光伏组件的特性方程，结合光照分布对光伏阵列的输出特性进行理论推导^[53~60]。

国外学者 Hiren Patel 等，在 Matlab 仿真环境下建立了光伏阵列在复杂光照环境下的仿真模型，并结合光伏阵