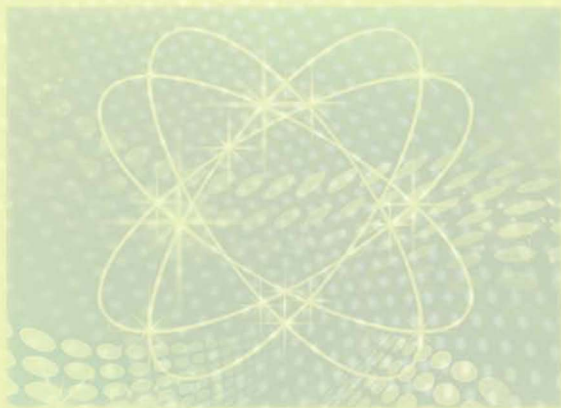


光伏并网逆变器输出 控制策略的仿真和研究

张 娜 著



内蒙古科学技术出版社

光伏并网逆变器 输出控制策略的仿真和研究

张 娜 著

内 蒙 古 出 版 集 团
内 蒙 古 科 学 技 术 出 版 社

图书在版编目 (CIP) 数据

光伏并网逆变器输出控制策略的仿真和研究 / 张娜
著. —赤峰: 内蒙古科学技术出版社, 2014. 8

ISBN 978-7-5380-2432-6

I. ①光… II. ①张… III. ①逆变器—研究 IV.
①TM464

中国版本图书馆CIP数据核字 (2014) 第196136号

出版发行: 内蒙古出版集团 内蒙古科学技术出版社

地 址: 赤峰市红山区哈达街南一段4号

邮 编: 024000

电 话: (0476) 8225264 8224848

邮购电话: (0476) 8224547

网 址: www.nm-kj.com

责任编辑: 季文波

封面设计: 永 胜

印 刷: 赤峰金源彩色印刷有限责任公司

字 数: 80千

开 本: 880 × 1230 1/32

印 张: 3.625

版 次: 2014年8月第1版

印 次: 2014年8月第1次印刷

定 价: 38.00元

前 言

随着科学技术和工业化程度的进一步发展,能源短缺、环境污染已经成为当今社会研究的主要课题。资源丰富、洁净无污染的太阳能作为一种新能源,其应用越来越广泛,尤其是光伏并网发电技术发展非常迅速。

先进的控制技术是改进光伏并网系统性能必不可少的关键技术之一。电力电子器件的高频化和微处理器运算速度的提高,特别是高性能数字信号处理器(DSP)的出现,使得一些先进的控制策略应用于光伏并网控制成为可能。通过深入学习各种逆变输出控制技术理论,最终确定采用以重复控制为基础的复合式控制策略对逆变输出电流进行控制,以达到系统输出与电网电压同频同相、谐波分量少、波形质量较好的并网电流要求。

在本书的编写过程中,要特别感谢我的导师天津大学电气与自动化工程学院石季英教授。石教授在本书内容的撰写、修改和最终修订的每一步都给了我很多的支持和指导,最终才使本书顺利完成。另外,还要感谢师姐李春玲博士,同窗好友张恩领、彭筱筱、马熊仓,师弟孙文山、王怀令、牛培涛,是他们从侧面激励我认真从事科研,给我的科研工作和书籍的撰写提出了很多的宝贵

意见,在此向他们表达我的感激之情。

限于水平有限加之时间仓促,书中不妥和错误之处恐不在少数,希望读者予以批评指正。

编者

2014年6月5日

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 课题研究背景	1
1.2 世界太阳能光伏发电产业概述	2
1.2.1 世界太阳能光伏发电现状与展望	2
1.2.2 国内光伏发电发展现状和展望	4
1.3 光伏并网发电系统	6
1.3.1 概 述	6
1.3.2 光伏并网系统的控制系统	9
1.4 本书的主要研究内容	11
第2章 光伏并网逆变器的拓扑及输出电流控制策略	13
2.1 三相光伏并网逆变器的拓扑结构	13
2.1.1 三相光伏并网逆变器常见拓扑	13
2.1.2 本书中选择的拓扑结构及建模	18
2.2 光伏并网逆变器输出电流跟踪控制策略	30
2.2.1 滞环比较法	31
2.2.2 定时比较控制方法	33
2.2.3 三角波比较法	36
2.2.4 本书所采用的跟踪控制方法	38
2.3 影响波形畸变的原因	39

2.3.1	死区时间对波形的影响	40
2.3.2	开关管固有特性对波形的影响	43
2.4	本章小结	46
第3章	重复控制理论的研究	48
3.1	内模原理	48
3.2	重复控制的基本思想	50
3.3	重复控制系统的基本结构	54
3.3.1	重复控制器内模	55
3.3.2	补偿器	56
3.4	重复控制器性能的分析	59
3.4.1	稳定性分析	59
3.4.2	扰动抑制特性分析	61
3.4.3	误差收敛速度分析	62
3.4.4	稳态误差特性分析	63
3.5	本章小结	64
第4章	基于重复控制理论的复合式控制策略	65
4.1	电压的前馈控制	65
4.1.1	电网电压对并网电流的影响	65
4.1.2	电网电压的前馈控制	66
4.2	重复控制与极点配置相结合的复合控制方案	69
4.2.1	复合控制的基本结构	69
4.2.2	极点配置设计	70
4.2.3	重复控制器的设计	76
4.2.4	电网电压对并网电流的影响	79

4.3	PI控制与重复控制相结合	81
4.3.1	复合控制的结构框图	81
4.3.2	PI控制器	82
4.3.3	重复控制器的设计	83
4.4	本章小结	88
第5章	仿真实验与结果	90
5.1	极点配置与重复控制仿真与结果	90
5.1.1	电压前馈与极点配置仿真图	90
5.1.2	复合控制仿真图	93
5.2	PI控制与重复控制仿真与结果	95
5.2.1	电压前馈与PI控制作用时仿真及结果	95
5.2.2	复合式控制仿真及结果	97
5.3	两种复合方法的比较	98
5.4	本章小结	99
第6章	总结与展望	100
6.1	总 结	100
6.2	展 望	101
	参考文献	102

第1章 绪论

1.1 课题研究背景

随着科学技术和工业化程度的进一步发展,能源短缺、环境污染等社会问题已经成为当今社会研究的主要课题。世界各国主要利用的能源为煤炭、石油、天然气、核能等。目前这些能源都面临着枯竭。据统计储量丰富的煤炭最多能够开采二百年^[1],已探明的石油储量仅能支持短短的几十年,就连这个世纪才发展起来的核能发电原材料铀的储量也是有限的。另一方面因利用这些能源而产生的环境污染问题,也应受到人们的重视,全世界每天产生约一亿吨的废气,加剧了“温室效应”,大气环境严重受到污染,如果仍不采取积极措施保护人类赖以生存的环境,那么人类的生活空间将会受到严重的威胁。

新能源的出现为解决这些社会危机带来了曙光,给人类可持续发展开辟了道路。20世纪以来,像太阳能、风能、生物质能、水能等能源形式迅速发展起来。太阳能是一种理想的可再生能源,也是我国新能源利用的一个新的起点,它具有其他能源无法比拟的优点。

光伏并网逆变器是光伏并网发电系统中的核心部件。其主要作用就是将光伏电池所发出的直流电转换成交流电，给负载供电或把电能馈入公用电网。作为光伏电池阵列和交流公用电网系统间进行能量变换的逆变器，其安全性、稳定性、逆变效率、生产成本等因素对发电系统的整体投资和收益具有举足轻重的地位。选择适合的逆变器，采用恰当的控制方法是光伏并网发电系统的关键技术之一。光伏并网系统目前在硬件上，特别是在光伏电池和逆变器的生产上已经集成化、规模化，但是控制策略上还稍显不足，还需要进一步进行研究，使之能够与先进的智能电网体系结合，构建未来的坚强电网。

1.2 世界太阳能光伏发电产业概述

1.2.1 世界太阳能光伏发电现状与展望

光伏产业是世界发展速度最快的行业之一。为实现能源和环境的可持续发展，世界各国均将太阳能光伏发电作为新能源发展的重点^[2]。

首先，世界太阳能光伏电池产量及装机容量快速增长。统计数据显示，最近5年，世界光伏电池及组件的年均增长率达到了43%。2008年，世界光伏电池年产量达6400MW，较2007年的3733MW增长2667MW，增幅高达70%多。截至2008年年底，世界

光伏电池累计安装容量已达18700MW。2009年产量受金融危机的影响先抑后扬,但发展势头仍然迅猛。美国、日本和欧盟的一项光伏发展路线图提出的世界光伏发电装机预测目标是:2010年,世界光伏装机总量达到14GW,其中日本4.8GW,欧洲3.0GW,美国3.0GW,中国0.25GW,其他2.95GW;2020年装机总量达到200GW,其中日本30GW,欧洲41GW,美国36GW,中国1.6GW,其他91.4GW。

其次,光伏并网发电所占比例飞速上升,已成为光伏技术的主流应用。并网光伏发电市场份额逐年增长的情况如下:1996年仅占7.9%,1997年为21.3%,1998年为29.9%,2000年为41.7%,2001年为50.1%,2002年为51.4%,2003年为55.5%,2004年为65.9%,2005年约为70%,2006年约为75%,2007年约为80%,2008年高达85%以上。

再次,晶体硅光伏电池技术持续进步,薄膜电池技术加快了研发的步伐。这就促使晶体硅光伏电池效率不断提高,光伏电池和组件生产成本和销售价格大幅降低。从20世纪60年代第一个地面用光伏电池组件售价1500美元/W_p,下降到300美元/W_p,到本世纪初已下降为3美元/W_p,下降了2个数量级。到2008年11月底,世界光伏电池组件售价约比2008年上半年下降了10%~15%;到2009年1月底,已比2008年上半年下降了30%左右。截至2009年4月底,晶体硅光伏电池组件的国内市场售价已降到20元/W_p以下的水平。针对晶体硅光伏电池组件和并网光伏发电系统的降低趋势,

国内外许多机构普遍认为,光伏发电的电价在2015年左右完全有可能达到与火力发电电价相当的水平。

根据欧洲联合研究中心(JRC)的预测,光伏发电在世界电力供应总量上将逐年递增,到2030年,占到10%以上;到2040年,占到20%以上;到21世纪末,太阳能发电(包括光伏和光热发电)将有可能在世界电力供应总量中占到60%以上。

1.2.2 国内光伏发电发展现状和展望

我国光伏发电产业发展迅速,科学技术提高更新速度加快^[2]。太阳能电池产量飞速增长。2007年达到821MW,比2006年的369.5MW增长451.5MW,增幅高达122%,占世界总产量的21.99%,居世界第二位。到2007年底,中国太阳能电池的生产能力已发展到3000MW以上,众多企业的生产规模已提升为100~500MW/a。2007年中国太阳能光伏发电新增装机容量约为15MW,累计装机容量约达100MW。中国光伏发电应用市场逐步发展,目前已有近20个兆瓦级的并网光伏电站投入运行或开工建设,例如2009年于柴达木盆地始建的吉瓦级国内最大并网太阳能电站。

2007年8月31日,国家发改委印发了经国务院审议通过的《可再生能源中长期规划》。对于太阳能光伏发电方面,规划提出:①采用户用光伏发电系统或建设小型光伏电站,解决偏远地区无电村和无电户的供电问题,重点地区是西藏、青海、内蒙古、新疆、宁夏、甘肃、云南等省、区。建设发电约10万kW,解决约100万户偏远

地区农牧民生活用电问题。2010年偏远农村地区光伏发电总容量达到15万kW,到2020年达到30万kW。②在经济发达、现代化水平较高的大中城市,建设与建筑物一体化的屋顶并网光伏发电设施,首先在公益性建筑物上应用,然后推广到其他建筑,同时在道路、公园、车站等公共设施照明中推广使用光伏电源。“十一五”时期,重点在北京、上海、江苏、广东、山东等地区开展城市建筑屋顶光伏发电的试点。2010年,全国建成1000个屋顶光伏发电项目,总容量5万kW;到2020年,全国建成2万个屋顶光伏发电项目,总容量100万kW。③在西部荒漠、戈壁、荒滩等空闲地建设较大规模的太阳能光伏电站。2010年,建成大型并网光伏电站总容量2万kW;到2020年,全国光伏电站总容量达到20万kW。④2010年,在通信、气象、长距离管线、铁路、公路等领域的商业化光伏应用累计达到3万kW;到2020年,累计达到10万kW^[3]。

太阳能光伏发电是一种新能源的利用形式,它的发展既面临机遇又面临挑战。现在光伏发电产业也面临着一些问题,首先,晶体硅光伏电池生产能力建设投资不断增长升温,大型新建、扩建项目接连启动。据简单推测,2010年左右,全国晶体硅光伏电池的生产能力已达到5000MW以上,如此巨大的产能,寻找市场是个很重要的问题。其次,国内应用市场提高缓慢,生产的光伏组件主要出口国际市场。95%以上的产品销往国际市场,特别是欧盟各国,长此以往,潜在的危险不可低估。再次,中国光伏产业的制造能力发展飞速,但科技水平提高不够快,与国际先进水平有一定的差

距。此外,我国在光伏并网系统,包括与建筑相结合的并网系统和荒漠地大型并网系统等方面的标准、规范,既少又缺。在产品检测体系、质量保证体系建设力度上较弱,需要大力加强和完善^[4]。

1.3 光伏并网发电系统

1.3.1 概 述

光伏并网发电系统可以按照系统功能分为两类^{[5][6]}:可调度式光伏并网发电系统和不可调度式光伏并网发电系统。两者之间的区别就是是否含有蓄电池。

在不可调度式光伏并网发电系统中,如图1-1所示,并网逆变器将光伏阵列产生的直流电转化为与电网电压同频、同相的交流电,受自然条件和系统的影响自动输送电能。当主电网断电时,系统自动停止向电网供电。当光伏系统产生的交流电能超过本地负载所需时,超过部分馈送给电网;当本地负载所需量大于光伏系统产生的交流电能时,电网自动向负载提供补充能量。结构相对简单,可靠性高,效率高,易于安装调试,所以应用广泛。可调度式光伏并网发电如图1-2所示,系统增加了储能环节,因为蓄电池的存在,该类并网系统可通过开关切换工作于多种模式,整个系统可起到能量调节器、有源功率滤波器和不间断电源(UPS)的作用^{[7][8]}。该类并网系统适合于家居使用,有着巨大的市场潜力,广泛地应用于独立光伏发电系统中^[9]。但是蓄电池的寿命不长、占用空间大,

此外,废旧电池还会造成环境污染,有一定的弊端。



图 1-1 不可调度式光伏并网发电系统



图 1-2 可调度式光伏并网发电系统

光伏并网发电系统一般由光伏阵列模块、逆变器和控制器三部分组成^[2]。光伏阵列模块用来产生直流电能。逆变器将光伏电池所产生的直流电能转换成符合市电网要求的交流电能,给负载提供电能或为电网传输电能。控制器控制光伏电池最大功率点跟踪(MPPT),控制逆变器并网的功率和电流的波形,从而使向电网转送的功率与光伏阵列模块所发的最大电能功率相平衡。

光伏并网发电系统按主电路结构可以分为单级变换系统和两级变换系统^[10],如图1-3,图1-4所示。

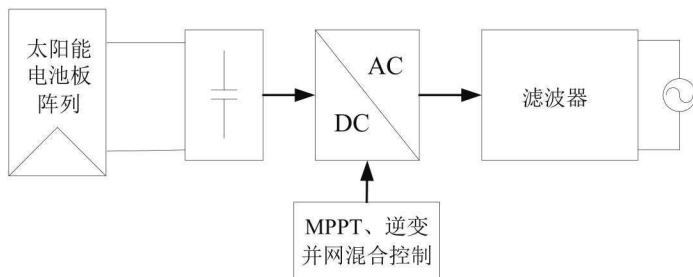


图 1-3 单级变换系统

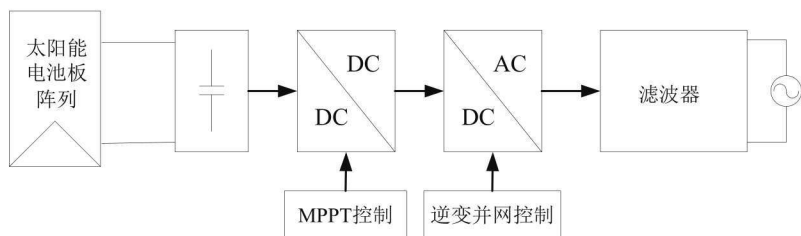


图 1-4 两级变换系统

在单级式光伏并网发电系统中,光伏阵列输出直接逆变并网,少了DC/DC环节,效率较高,系统结构相对简单,便于调试和维护^[1]。

两级变换系统直流侧有一个直流升压变换环节,用于在太阳能电池输出电压较低时做升压变换。多数两级式系统带有蓄电池。两级变换系统的逆变控制和最大功率点跟踪分成两个环节进行,控制复杂且动态响应慢。综合起来,两级式变换系统也存在效率相对较低、动态响应慢、控制复杂的缺点。

1.3.2 光伏并网系统的控制系统

先进的控制技术是改进光伏并网系统性能必不可少的关键技术之一。电力电子器件的高频化和微处理器运算速度的提高,特别是高性能数字信号处理器(DSP)的出现,使得一些先进的控制策略应用于光伏并网控制成为可能。

1.3.2.1 光伏并网系统最大功率点跟踪控制

最大功率点跟踪控制技术(MPPT)是通过跟踪阵列的最大功率点,从而实现系统的最大功率输出的应用技术。光伏并网发电系统MPPT的实现需要两个条件:一是要选择合理的DC/DC变换电路作为MPPT控制主电路;二是选择合适的MPPT控制算法来控制变换电路的占空比,使阵列工作在最大功率点上,实现最大功率点的跟踪控制。目前常用的MPPT控制算法主要有恒电压法(CVT)^[12],爬山法(又叫爬行法、扰动观察法等),电导增量法(又称导纳微增法、INC法),滞环比较法^[13]等。现在对MPPT的研究集中在简单、高稳定性的控制算法实现上,如神经网络控制法^[14]等,取得了较显著的跟踪控制效果。

1.3.2.2 光伏并网逆变器输出控制

光伏并网发电系统的核心为并网型逆变器,并网所要实现的目的就是产生一个与电网电压同频同相的正弦信号,且该信号的波形质量较好,含有谐波分量少。

为了获得较好的正弦输出信号,波形控制技术一直是PWM