

电气工程
新技术丛书



电力电子技术在 光伏发电系统和LED中的应用

DIANLI DIANZI JISHU ZAI
GUANGFU FADIAN XITONG HE
LED ZHONG DE YINGYONG

曹太强 王 军 徐顺刚 孙 章 / 著



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

电气工程
新技术丛书

电力电子技术在 光伏发电系统和LED中的应用

DIANLI DIANZI JISHU ZAI
GUANGFU FADIAN XITONG HE
LED ZHONG DE YINGYONG

曹太强 王 军 徐顺刚 孙 章 / 著

西南交通大学出版社

内 容 简 介

本书涉及光伏发电系统及LED中电力电子拓扑电路及其控制技术的综合性理论和应用研究, 具体内容包 括: 光伏发电系统概述、独立光伏发电系统分析、并联逆变器控制及实现方法、光伏发电并网控制、并网逆变器电磁辐射及谐波的抑制、光伏发电系统蓄电池充放电及其管理技术、LED技术概述、无桥功率因素校正综述、无桥 Dual-Sepic PFC 变换器分析与设计、有源箝位正激副边谐振 PWM Buck-Boost 型变换器研究。

本书是作者长期研究结果的总结和提炼, 可作为高等院校电气工程专业以及相关专业的本科生、研究生的教材, 也可作为电力电子领域, 特别是新能源领域的科研人员和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术在光伏发电系统和LED中的应用/曹太强等著. —成都: 西南交通大学出版社, 2014.4
(电气工程新技术丛书)
ISBN 978-7-5643-3004-0

I. ①电… II. ①曹… III. ①电力电子学—应用—太阳能发电②电力电子学—应用—发光二极管 IV. ①TM615②TN383

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第063236号



电力电子技术在光伏发电系统和LED中的应用

曹太强 王军 徐顺刚 孙章 著

责任编辑 李芳芳

特邀编辑 张娟

封面设计 墨创文化

西南交通大学出版社出版发行

四川省成都市金牛区交大路146号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564

<http://press.swjtu.edu.cn>

成都蜀通印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 185 mm × 260 mm 印张: 11.75

字数: 294 千字

2014年4月第1版 2014年4月第1次印刷

ISBN 978-7-5643-3004-0

定价: 48.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

近十年来,光伏发电新能源及 LED 的应用与日俱增,相关关键技术已逐步得到解决,并为光伏发电系统并网技术及 LED 的推广应用奠定了理论基础。由于光照的间歇性和不可控性,光伏发电并网系统给电网稳定、电能质量以及最大电能传输等带来了重大挑战,成为世界研究的热点。由于 LED 控制的特殊性,实现具有高效率、长寿命、低成本和 PWM 调光特性的 LED 照明驱动已成为国内外科技工作者的研究目标。虽然相关文献和书籍都从不同的角度分析和研究了光伏发电和 LED 控制技术,然而随着光伏发电和 LED 的广泛应用,需要解决的关键技术问题逐步呈现出来,本书正是解决这些关键技术的补充。

本书是作者近十年来在光伏发电系统和 LED 研究中取得的科研成果。全书共分两篇,分别介绍了光伏发电系统和 LED 中的电力电子技术。第一篇分别介绍了独立光伏发电系统中高频谐振电路在荧光灯中的应用,以及并网发电系统中三相逆变器在不平衡负载时的控制方法;在并网发电系统中分析了并网发电系统的逆变器并联技术、并网的最大功率跟踪控制、系统的稳定性和可靠性等关键问题,深入研究了光伏逆变器并联控制方法、并网最大功率跟踪控制技术、光伏发电系统中的电磁干扰和谐波抑制,提出了相应的解决方案。第二篇主要从 LED 的功率因素校正、电路拓扑结构、控制策略进行了深入研究和分析。

全书共包括以下 10 章内容:

第 1 章简要介绍了电力电子技术在光伏发电系统中的应用、国内外研究动向、需要解决的关键技术问题以及目前研究中存在的难点。

第 2 章分析了在光伏发电系统中的高频单相正弦波半桥逆变器,以高频荧光灯在光伏发电系统中的应用作为研究对象,分析其开关管在谐振电路死区内的续流值,提出了用高次谐波的感性抵消基波的容性以降低续流的方法。该方法减少了开关管的损耗以及系统的谐波成分,从而为系统提供稳定、高效的单相光伏照明系统。此外,在独立光伏系统中分析了一种三相不平衡负载的逆变器,由于传统的对称分量法是根据叠加原理对三相逆变器输出电压的正、负、零序分量分别进行补偿,以维持三相电压的平衡,它存在运算量大、实时性差、控制困难、效果不理想等缺点,针对此,本章提出了输出电压分相控制方法,通过分别对三相逆变器输出线电压的控制,实现三相电压的平衡。

第 3 章分析了一种高性能逆变器并联控制方法:以现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)产生各并联逆变器的正弦脉冲宽度调制(Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM)波频率和相位,以确保输出电压同步,用单相交流电压、电流构造三相交流电压、电流。根据瞬时无功理论计算方法把逆变器输出交流电流转换成两相瞬时电流分量,再经同步 d-q 变换得到有功电流和无功电流,最后用数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)控制两台逆变器并联的瞬时有功、无功功率相等,从而使两台逆变器输出的电流均流。实验结果表明,该控制方法能达到各逆变器功率均分、逆变电源之间无环流的目的。

第 4 章分析了一种光伏并网系统的最大功率传输方法,其控制思想是:在 DC/DC 变换器中用增量电导法的单周期功率扰动控制策略实现光伏电池最大功率跟踪;在 DC/AC 并网逆变器中用光伏电池最大功率输出时的最大直流电流作为并网逆变器输出交流电流反馈控制的瞬时参考电流的峰值,以电网电压的相位和频率作为瞬时交流参考电流的相位和频率,对该瞬时交流电流与并网交流电流的差进行 PI 控制;为确保并网逆变器的稳定性和可靠性,同时还引入了电网电压前馈和滤波器电容电流反馈控制;详细分析了并网控制系统的工作原理和控制策略,并用 Matlab/Simulink 对光伏系统进行仿真验证,验证了以上控制策略的可行性。

第 5 章分析了单相 SPWM 逆变电源输出电压中存在的大量高次谐波引起的电磁干扰问题,提出了一种采用跳频调制技术对逆变电源的输出频谱进行调制的方法,该方法可以降低逆变电源输出谐波的幅度,从而达到抑制其电磁辐射的目的。此外针对三相逆变器产生大量的谐波,设计了一种新型无源三相 Δ -带通滤波器,该滤波器能有效抑制光伏发电系统的 3~19 次等谐波,保证了光伏发电系统稳定可靠运行,提高了光伏发电系统供电的电能质量。

第 6 章分析了光伏储能系统中的开关电阻型均衡电路和反激升压变换器型均衡电路,研究了电池组均衡充电控制系统电路模型,并提出了相应的均衡充电控制策略。该控制策略不但能够实现电池组快速充电,而且能够减小甚至消除单体电池不一致对电池组循环寿命的影响。

第 7 章简要介绍了电力电子技术在 LED 中的应用,分析 LED 当前亟待解决的关键技术问题以及目前研究中存在的难点,并作出了展望。

第 8 章针对 LED 在工作电压范围(85~265 V)的 PFC 变换器在低压输入时效率较低的现状,分析了无桥 PFC 变换器拓扑电路结构,介绍了无桥 PFC 变换器的发展现状,并对 Boost、Sepic、Cuk 无桥 PFC 变换器拓扑的发展历程进行了全面综述,并将无桥 PFC 变换器拓扑合成方案分为三大类,分别进行了详细介绍。最后,给出了无桥变换器拓扑的发展方向。

第 9 章分析了一种新型无桥 Dual-Sepic 功率因数校正(Power Factor Correction, PFC)变换器,该变换器具有升降压功能,而且完全消除了传统桥式 PFC 变换器中的二极管整流桥,减少了电流通路径中功率器件的数量,提高了变换器的效率。对 DCM 模式无桥 Dual-Sepic PFC 变换器进行了详细的分析和电路参数设计。

第 10 章分析了传统有源箝位正激(Active-Clamp Forward, ACF)变换器存在输出二极管反向恢复损耗以及轻载时不能实现软开关的问题,提出了 ACF 副边谐振(Secondary Side Resonant, SSR) PWM (ACF-SSR-PWM) Buck-Boost 型变换器,分析了 ACF-SSR-PWM Buck-Boost 型变换器的工作模式及其稳态特性。ACF-SSR-PWM Buck-Boost 型变换器可以在全负载范围内实现主开关管、辅助开关管的零电压开通(Zero Voltage Switching, ZVS)和输出二极管的零电流关断(Zero Current Switching, ZCS),其电压传输比与负载、开关频率和占空比无关,呈现出 DC-DC 变压器(DC-DC Transformer, DCX)的工作特性。与副边谐振 ACF 变换器相比,ACF-SSR-PWM Buck-Boost 型变换器减小了辅助开关管的电流应力和主开关管的关断电流。

本书各章由西华大学博士、高级工程师曹太强撰写;全书由王军教授统稿,并负责本书的主审工作,对本书提出了宝贵的意见;徐顺刚博士提供其部分科研成果;孙章老师负责制作图表及文字整理。

本书的研究有幸得到以下基金的资助:

科技部中欧中小企业节能减排科研合作基金项目(NO.SQ2011ZOF000004 分布式电源和储能装置接入——分布式电源和储能装置运行控制与能量优化管理技术);

四川省科技厅应用基础研究项目(NO.12209596 光伏发电系统中三相逆变器并联控制方法的研究);

四川省科技厅支撑项目(NO.2013GZ0130 分布式光伏发电系统串联型微型变换器研制);

四川省重大技术装备创新研制项目(川财建〔2013〕153 号新一代节能助航灯光系统的研制);

四川省教育厅重点项目(NO.11209435 光伏发电系统中单相并网控制的研究);

四川省重点学科(电力电子与电力传动)(NO.SZD0503-09-0 智能电网电能质量及电器设备平台建设与关键技术研究);

四川省高校重点实验室项目(太阳能技术集成及应用推广);

四川省教育厅成果培育项目基金资助(NO.12ZZ007 永磁直驱风光互补微网系统运行控制与能量优化管理关键技术研究及应用);

西华大学重点科研基金(NO.Z1120940 光伏发电系统中三相逆变器不平衡负载控制的研究)。

在本书的撰写过程中, 作者参考和引用了国内外同行专家和学者的相关研究成果, 在此向他们表示由衷的感谢!

由于作者水平有限, 加之编写时间仓促, 书中不妥之处在所难免, 同时书中的一些观点、控制方法难免存在争议, 理论介绍有失完整, 恳请读者和相关科技人员不吝赐教!

作 者
2014 年 1 月

目 录

第一篇 光伏发电系统

| | |
|------------------------|----|
| 第 1 章 光伏发电系统概述 | 3 |
| 1.1 光伏发电系统中的电力电子技术 | 3 |
| 1.2 光伏发电系统的发展 | 3 |
| 1.3 光伏发电系统研究现状 | 4 |
| 1.4 光伏发电系统拓扑结构 | 6 |
| 第 2 章 独立光伏发电系统分析 | 9 |
| 2.1 引 言 | 9 |
| 2.2 单相逆变电路分析 | 9 |
| 2.3 抑制逆变串并联谐振电路续流的方法 | 10 |
| 2.4 三相逆变器不平衡负载分相电压控制方法 | 17 |
| 2.5 三相不平衡负载旋转同步坐标变换控制 | 19 |
| 2.6 三相不平衡负载分相控制 | 26 |
| 2.7 实验结果 | 31 |
| 2.8 本章小结 | 36 |
| 第 3 章 并联逆变器控制及实现方法 | 38 |
| 3.1 引 言 | 38 |
| 3.2 并联逆变器系统等效输出阻抗分析 | 38 |
| 3.3 逆变器控制分析 | 40 |
| 3.4 环流分析及抑制 | 42 |
| 3.5 共享同步信号的瞬时无功理论均流控制 | 46 |
| 3.6 实验验证 | 49 |
| 3.7 本章小结 | 52 |
| 第 4 章 光伏发电并网控制 | 54 |
| 4.1 引 言 | 54 |
| 4.2 单相并网控制研究 | 54 |
| 4.3 三相并网逆变器的研究 | 67 |
| 4.4 本章小结 | 76 |
| 第 5 章 并网逆变器电磁辐射及谐波的抑制 | 79 |
| 5.1 引 言 | 79 |
| 5.2 单相 SPWM 逆变电源数学模型 | 79 |

| | |
|---------------------------------------|------------|
| 5.3 单相逆变电源输出谐波分析 | 85 |
| 5.4 基于跳频调制的逆变电源电磁辐射抑制 | 91 |
| 5.5 光伏发电系统中谐波的抑制 | 96 |
| 5.6 一种新型无源滤波器装置 | 98 |
| 5.7 本章小结 | 103 |
| 第 6 章 光伏发电系统蓄电池充放电及其管理技术 | 105 |
| 6.1 引言 | 105 |
| 6.2 BMS 充电控制方法 | 105 |
| 6.3 电池均衡管理系统结构 | 109 |
| 6.4 开关电阻型均衡电路 | 116 |
| 6.5 反激升压变换器型均衡电路 | 120 |
| 6.6 本章小结 | 126 |

第二篇 LED 技术

| | |
|--|------------|
| 第 7 章 LED 技术概述 | 131 |
| 7.1 引言 | 131 |
| 7.2 LED 驱动电源研究现状 | 131 |
| 7.3 LED 照明驱动面临的问题与挑战 | 140 |
| 第 8 章 无桥功率因数校正综述 | 143 |
| 8.1 无桥 PFC 变换器的发展现状 | 143 |
| 8.2 无桥 PFC 变换器拓扑结构 | 143 |
| 8.3 本章小结 | 154 |
| 第 9 章 无桥 Dual-Sepic PFC 变换器分析与设计 | 158 |
| 9.1 引言 | 158 |
| 9.2 Dual-Sepic PFC 变换器及其工作原理 | 159 |
| 9.3 工作特性分析 | 161 |
| 9.4 变换器参数设计 | 163 |
| 9.5 仿真与实验验证 | 164 |
| 9.6 本章小结 | 166 |
| 第 10 章 有源箝位正激副边谐振 PWM Buck-Boost 型变换器研究 | 168 |
| 10.1 引言 | 168 |
| 10.2 工作模式分析 | 169 |
| 10.3 稳态特性分析 | 173 |
| 10.4 软开关工作条件分析 | 175 |
| 10.5 实验验证 | 177 |
| 10.6 本章小结 | 179 |

第一篇

光伏发电系统

第 1 章 光伏发电系统概述

1.1 光伏发电系统中的电力电子技术

电能是现代社会的能源。目前，电能主要有三种：火力发电、水力发电和核发电。而太阳能以其清洁、无污染，取之不尽、用之不竭等优点得到人们越来越多的关注^[1-7]。光伏发电的工作原理是：光伏阵列将接收来的太阳辐射能量经过高频直流变换后转换成稳定的直流电压，然后经过逆变器逆变向电网输送与电网电压同频同相的正弦交流电流，此时负载为电网，逆变器工作于有源逆变状态，为电流控制型电压源逆变器，相当于一个受控电流源。因此，太阳能发电系统实际上就是能量转换系统，其核心技术就是电力电子技术的应用。包括电力电子的拓扑电路结构和其对应的控制技术，随着电力电子技术的快速发展，近十年来新能源得到各国的关注，并从小功率发电系统发展到大功率发电系统，从离网（独立光伏）系统发展到并网发电系统，从单一的新能源发展到分布式微网发电，总之得到广泛的应用。由于光伏电池的自身非线性特性以及电力电子技术丰富的内容，现有太阳能光伏发电理论和技术仍然存在诸多问题^[7-9]。比如^[10]：

- (1) 光伏系统中逆变器并联控制方法；
- (2) 并网最大功率跟踪控制；
- (3) 光伏系统谐波的抑制方法；
- (4) 三相逆变器由于不平衡负载所产生的三相输出电压不对称度，以及这种不对称度对光伏发电系统带来危害的程度；
- (5) 光伏发电系统中谐波和电磁干扰产生机理，以及谐波和电磁干扰对整个光伏控制系统的影响分析，等等。

解决光伏发电系统的理论和技术上的诸多问题，充分提高太阳能发电系统的效率、降低光伏发电系统的成本、增大光伏发电系统的容量、实时向电网输送电能、保证系统的稳定性和可靠性等研究对光伏产业的发展有重要的理论和工程实用价值。

1.2 光伏发电系统的发展

世界各国特别是发达国家十分重视光伏发电技术。20 世纪 90 年代后期，光伏产业发展迅速，成为全球增长速度最快的产业之一，各国一直在通过改进工艺、开拓市场、提高技术来降低光伏发电系统的制造成本、提高光伏发电效率及其稳定性和可靠性。

我国的光伏产业虽然在近年取得了一定的发展，但相比于蓬勃发展的世界光伏工业，我国光伏工业的开发和应用还相对比较落后。由于政策、资金等因素的制约，总体上我国的光

伏技术仍处于初级阶段，规模小、技术落后、应用面窄、产品单一，一些关键技术和材料仍不能实现自主研制。比如：目前我国在小功率逆变器上与国外处于同一水平，但在大功率逆变器和一些关键技术上差距很大。光伏发电系统的开发应用以及并网运行在近十年来才开始取得一定的经验，光伏发电在 1971 年首次成功应用于东方红二号卫星上。但是在逆变器并联控制策略、并网的有功和无功控制、系统的稳定性和可靠性、三相不平衡负载对输出三相电压的对称度的影响等诸多问题所涉及的技术和应用还需要解决。光伏电池发出的只能是直流电，而包括并网在内的许多用电场合需要交流电，因此，具有直流/交流转换的逆变器是光伏发电系统的关键部件，其重要指标是可靠性和转换效率^[10]。

1.3 光伏发电系统研究现状

光伏发电系统的结构如图 1.1 所示。太阳能电池产生的直流电给蓄电池充电，蓄电池完成稳压和储能的功能；然后通过 DC/DC 升压/降压电路直接给直流负载供电或作为逆变器的直流电源，在 DC/DC 转换过程中实现最大功率点跟踪；最后将经过 DC/AC 逆变的交流电送给交流负载或市电网。

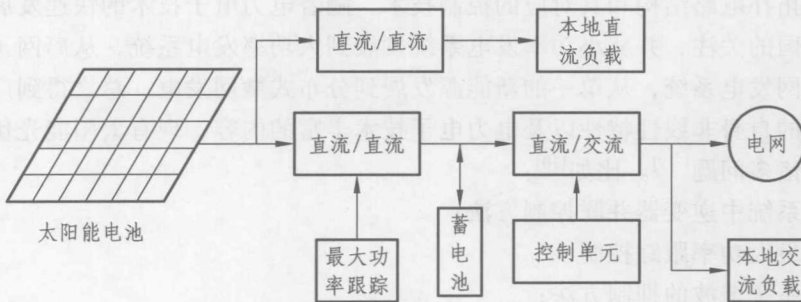


图 1.1 光伏发电系统结构

下面介绍光伏发电各个控制部分、研究现状以及存在的问题。

1. 直流变换技术 (DC/DC)

直流/直流变换技术主要用来实现蓄电池充电、为本地用户和逆变器提供所需的直流电压，其主要功能是提供负载所需要的稳定的直流电压以及实现最大功率跟踪。

2. 逆变器并联技术

在大容量光伏发电系统中，由于单一的开关器件不能承受大电流通过，同时考虑到系统的可靠性、稳定性及可扩展性，光伏发电系统需要多个逆变器并联运行以满足发电系统的需求。

20 世纪 80 年代国外开始研究 DC/DC 变换器并联技术，已取得实用性成果。逆变器的并联运行技术借鉴了 DC/DC 并联技术，为了使各并联模块可靠运行，要求每个并联模块的负载电流必须达到均流。逆变器输出为交流电，在一个工频周期内输出电压波形随时间变化，因此，逆变电源并联的实现难度比直流电源并联大，它必须保证各逆变电源的输出电压幅值、

频率、相位和相序在每一个周期内保持一致，否则频率的微弱差异的积累将造成并联系统输出幅度的周期性变化和波形畸变，逆变器的并联技术也远比发电厂同步发电机组的并联要复杂得多。

虽然单个单相或三相逆变器在理论和应用上都比较成熟，但逆变器并联技术在理论和应用上还有很多关键技术需要解决。一般而言，逆变电源通常采用全控功率开关器件构成单元模块，由于受功率开关器件容量的限制，往往通过模块并联达到冗余，在充分利用新型开关器件的优势、减小系统的体积、降低噪声的同时，也提高了系统的动态响应速度和逆变电源变换器的通用性。多台逆变器模块并联供电，其优越性主要体现在以下几个方面：

- ① 提高光伏发电系统的可靠性和稳定性，真正实现了冗余并联运行；
- ② 逆变器并联易于灵活地增容和大批量标准化生产；
- ③ 具有良好的系统可维护性；
- ④ 逆变器功率单元模块化。

这些优点是采用单台逆变器进行供电很难得到的，但是逆变器并联同样也带来了技术上的困难，由于逆变器的输出电压是一个交变量，各单元输出电压的瞬时值很难保持一致，导致各逆变器之间产生“环流”。环流的存在，不仅浪费了电能，而且可能危及并联系统的可靠性，甚至造成系统无法正常工作。

3. 逆变技术 (DC/AC)

逆变器包括单相和三相逆变器，它是把光伏电池经过 DC/DC 变换后的直流电压或蓄电池的电压变换成交流电能的一种电力电子变换装置。传统单相或三相逆变器主电路拓扑结构和控制算法比较多，技术也相对比较成熟。随着电力电子技术的发展，单相高频谐振逆变器越来越得到人们的重视，并在工业和日常生活中得到了广泛的应用。在光伏发电系统中，单相高频谐振逆变器最主要的技术瓶颈是其产生的干扰会影响系统的正常工作。为了提高逆变器的效率、可靠性、功率密度和实现最大电能传输，需要对光伏发电系统逆变器的新型电路拓扑结构设计、高频开关技术、智能控制技术、软开关技术、智能检测和保护、模块化、电磁兼容等方面进行进一步的研究和优化。

4. 并网技术

光伏并网，第一步要求光伏发电系统输出的电压波形与电网电压波形一样，即频率的大小、相位、幅度都应该相等；第二步要求在并网成功后，需根据电网的需求向电网输送有功或无功功率或者向电网输送最大有功功率。因此，光伏并网的频率跟踪、并网逆变器的最大功率控制以及其并网输入电流的稳定性和可靠性都需要进一步的分析和研究。

5. 系统稳定性与可靠性的研究

光伏发电系统是一个开关电源系统，因此其系统的稳定性和可靠性非常重要。在电力电子设备中每一个新技术的突破，首先要分析其可靠性，如果系统既不稳定也不可靠，这样的系统是没有应用价值的。国内外都一直致力于这方面的研究，完善和改进系统的稳定性和可靠性是一个永无止境的技术，其中，谐波是影响光伏发电系统稳定性和可靠性的重要干扰源。

6. 三相逆变器不平衡负载

三相逆变电源的一个重要指标是三相电压的对称性，即相位差相等、幅度一样。三相输出电压不对称的表现可能是相电压的幅值大小不平衡，也有可能是相位偏移的不平衡，或者兼而有之。因此对于逆变器供电系统而言，逆变器应该具有在一定不平衡负载的情况下保证输出电压平衡的能力。

在光伏三相逆变系统中，由于负载有单相负载和三相负载，可能存在三相不平衡负载，因此，在光伏发电系统中需要解决三相不平衡给系统和负载带来的危害。传统的可带完全不平衡负载的主电路采用3个单相桥电路，输出通过3个单相变压器耦合成三相电路，由于其三相电路完全独立，可采用3套独立的控制电路。但此电路有以下缺点：

- ① 输出采用3个单相变压器耦合成三相，变压器的体积较大；
- ② 功率开关管多（12个），在中、大功率输出时，开关损耗较大；
- ③ 3个电路单独调节，一致性较难实现。

不平衡负载将导致零序（四线制）和负序分量在系统内流动，对输出阻抗为零的理想电源来说，问题不大，但是实际的系统都具有一定的输出阻抗，这就将会导致输出电压波形畸变。输出电压的不平衡可能导致电子设备的工作失常甚至损坏。例如不平衡的三相电压可以在电机绕组产生负序电流，从而增加电机的内部损耗和温升，如果电机工作在额定工作状态，有可能使电机过热甚至严重损坏。另外，三相系统中电压不平衡也可以引起与之相连接的电子设备的故障。对于现代三相逆变电源，尤其是大容量三相逆变电源，通常都带混合型负载。根据国标 GB 7260—87《不间断电源设备》，要求在规定的正常工作条件下（包括规定的不平衡负载），三相输出系统输出电压的不平衡度应不超过5%。信息产业部邮电工业产品质量监督检测中心在对《通信用不间断电源——UPS》的指标中，要求UPS三相输出中的任意一相接额定线性负载，其他两相均为空载时，输出电压的不平衡度应 $\leq 5\%$ 。

1.4 光伏发电系统拓扑结构

并网光伏发电系统是与市电网连接在一起的光伏发电系统，与其他类型的发电厂一样可以向电网提供有功、无功电能。并网光伏系统由光伏电池所发出的直流电能经变换器转换成与电网相同频率的电能，以电压源或电流源的形式送入电网。

图1.2 光伏并网发电系统结构中，整个系统由光伏阵列、DC/DC变换器、逆变器(DC/AC)、并网和光伏系统监控部分等组成。在小型光伏并网系统中，其逆变器受不匹配阵列影响小，具有更好的安装灵活性，不需要高压直流母线电容，而且成本低，是一种较为理想的光伏并网方法。在大功率光伏并网系统中，最大功率跟踪、DC/DC的拓扑电路结构、单相逆变器并联、三相逆变器拓扑结构、针对各部分电路的控制技术以及整个系统的稳定性和可靠性都有其关键技术问题亟待解决。因此，研究高效可靠的并网拓扑结构是光伏并网系统重要的研究内容^[11-31]。在光伏系统中的DC/DC以及DC/AC拓扑电路结构层出不穷，其控制方法及监控系统也各异，因此，在光伏系统中需要解决的关键技术问题较多。

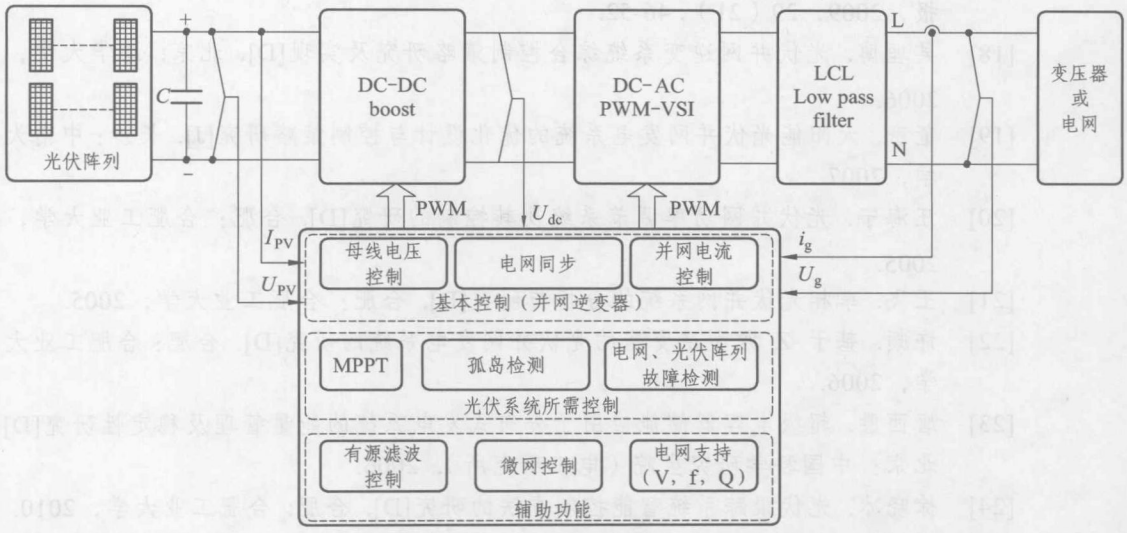


图 1.2 光伏并网系统结构

参考文献

[1] 江泽民. 对中国能源问题的思考[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(3):345-359.

[2] 刘飞. 单相光伏并网系统的分析与研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2005.

[3] 冯焱生. 太阳能发电原理与应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007.

[4] 赵为. 太阳能光伏并网发电系统的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2003.

[5] 赵玉文. 我国太阳能光伏产业发展形势和思考[J]. 世界科技研究与发展, 2003, 25(4):31-38.

[6] 赵争鸣, 刘建政, 孙晓瑛, 袁立强. 太阳能光伏发电及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

[7] 沈辉, 曾祖勤. 太阳能光伏发电技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.

[8] 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.

[9] 刘树民. 太阳能光伏发电实用技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006.

[10] 曹太强. 光伏发电系统及其控制技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005

[11] 胡义华. 小型光伏系统及其关键问题研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.

[12] 苏建徽. 光伏水泵系统及其控制的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2003

[13] 郑诗程. 光伏发电系统及其控制的研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2005

[14] 欧阳名三. 独立光伏系统中蓄电池管理的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2004

[15] 刘飞. 三相并网光伏发电系统的运行控制策略 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.

[16] 张超. 光伏并网发电系统 MPPT 及孤岛检测新技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.

- [17] 廖志凌. 阮新波. 独立光伏发电系统能量管理控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(21): 46-52.
- [18] 吴理博. 光伏并网逆变系统综合控制策略研究及实现[D]. 北京: 清华大学, 2006.
- [19] 董密. 太阳能光伏并网发电系统的优化设计与控制策略研究[J]. 长沙: 中南大学, 2007.
- [20] 汪海宁. 光伏并网功率调节系统及其控制的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2005.
- [21] 王飞. 单相光伏并网系统的分析与研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2005.
- [22] 许颇. 基于 Z 源型逆变器的光伏并网发电系统的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.
- [23] 唐西胜. 超级电容器储能应用于分布式发电系统的能量管理及稳定性研究[D]. 北京: 中国科学研究生院(电工研究所), 2006.
- [24] 徐晓冰. 光伏跟踪系统智能控制方法的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
- [25] 刘芙蓉. 并网型户用光伏系统的孤岛检测技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [26] 吴春华. 光伏发电系统逆变技术研究[D]. 上海: 上海大学, 2008.
- [27] 余蜜. 光伏发电并网与并联关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [28] 马琳. 无变压器结构光伏并网逆变器拓扑及控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- [29] 赵杰. 光伏发电并网系统的相关技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [30] 陈昌松. 光伏微网的发电预测与能量管理技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [31] 熊远生. 太阳能光伏发电系统的控制问题研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2009.

第2章 独立光伏发电系统分析

2.1 引言

对于独立光伏单相逆变部分，低频负载的独立光伏发电系统中，技术上相对比较简单，并且比较成熟，为此，本章对高频单相负载和三相不平衡负载进行分析和研究。具体分析高频单相正弦波半桥逆变器，以高频荧光灯在光伏发电系统中的应用作为分析，分析其开关管在谐振电路死区内的续流值，提出了用高次谐波的感性抵消基波的容性以降低续流的方法。该方法减少了开关管的损耗、系统的谐波成分，把输出的光伏电能的最大有功功率提供给负载，实现高功率因素，为照明系统提供稳定、高效的电光源。

在独立光伏发电系统和三相并网系统中，三相逆变器都是核心部分，其不仅承担恒频恒压的工频高质量电能的转化，而且要保证系统在各种负载情况下供电质量稳定。传统的三相逆变器由于结构缺陷，三相之间具有很严密的耦合关系，致使三相相互不独立。因而传统的三相逆变器带不平衡负载时各相输出电压幅值会有很大差异，带非线性负载时输出电压波形畸变严重，造成电源的输出电压质量明显下降、谐波成分增多。因此，本章对三相负载不平衡适时维持三相电压的对称输出，即相电压的大小相等、相位对称有重要的研究意义。

三相逆变器的一个重要性能是输出电压对称性。光伏发电系统中三相逆变器除了给三相负载提供电能外，还要给单相负载提供电能。不同的单相负载接入三相逆变电源，造成三相逆变电源的负载不平衡、三相逆变电源的输出电压不对称、波形畸变和谐波成分的增加，并可能导致负载和三相逆变电源不正常工作。重点分析三相逆变电源不平衡负载带来的输出电压不平衡，提出了三相逆变器不平衡负载的分相电压控制方法。采用电压分相控制方法能实时、稳定、可靠地实现三相逆变电源输出电压的平衡，有效地补偿了因不平衡负载引起的逆变电源输出电压畸变，从而保证其在任意不平衡负载条件下仍能维持三相输出电压的平衡（即幅度相等、频率相同、相位差 120° ）。

2.2 单相逆变电路分析

目前国内光伏发电系统主要以直流 DC 系统和独立（stand-alone）型 DC/AC 系统为主。光伏发电系统可分为独立供电系统和并网系统。独立供电系统不与市电网相连，白天给用户提供电能，同时将多余的能量储存在蓄电池中，夜间用蓄电池向用户提供电能。并网发电系