



“十二五”国家重点图书出版规划项目
新能源电能变换与控制技术丛书

分布式逆变电源的 模块化及并联技术

Parallel Operation Control Technology
for Distributed Modular Inverters

◆ 主编 段善旭 林新春



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

内容简介

“十二五”国家重点图书出版规划项目

新能源电能变换与控制技术丛书

分布式逆变电源的模块化及并联技术

主编 段善旭 林新春

参编 张宇 刘邦银 蔡涛

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书以分布式新能源发电独立运行或并网运行系统、模块化 UPS 并联冗余等供电系统为主题，系统而全面地论述了分布式逆变电源的模块化及并联技术的基础理论和工程设计方法。

本书主要内容包括模块化 DC/AC 变换器的分类与并联冗余结构（含模块电源的可靠性简要分析）、逆变器并联系统的数学模型及并联基础理论（包括三相逆变器磁路耦合对环流的影响）、并联系统动态均流特性及控制技术、SPWM 逆变电源数字化同步控制技术、同步锁相的重新调制控制技术、并联系统失真功率均分控制技术、基于分散逻辑的逆变器并联均流控制技术、基于解耦控制的逆变器无互连线并联控制策略、基于电力线载波通信及基于下垂特性的无互连线并联控制策略、逆变器并联系统的监控与管理技术、逆变器模块并联系统设计方法及典型应用（含逆变电源并联系统的测试方法、提高逆变电源模块冗余度的热插拔结构及模块的热插拔设计方法、逆变电源并联运行系统在 UPS 中的应用、逆变电源模块化并联技术在光伏发电系统中的应用等）。

本书适合于分布式新能源发电、微电网运行、UPS 系统、通信电源等领域的科研工作者阅读，也可作为大专院校相关专业的教师、研究生和高年级本科生的教学参考书。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

分布式逆变电源的模块化及并联技术 / 段善旭，林新春主编. —北京：电子工业出版社，2013.9

（新能源电能变换与控制技术丛书）

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-121-21451-6

I. ①分… II. ①段… ②林… III. ①变换器 IV. ①TN624

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 213730 号

责任编辑：苏颖杰

印 刷：北京天宇星印刷厂

装 订：三河市皇庄路通装订厂

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×1092 1/16 印张：21.75 字数：557 千字

印 次：2013 年 9 月第 1 次印刷

印 数：3 500 册 定价：59.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：（010）88258888。

丛 书 序

自工业革命以来，人类活动对传统能源的大规模利用已造成严重环境问题，在能源问题上必须寻找新的出路，需要开发多种可持续的清洁环保的能源加以利用，并建立相应的新能源供应体系，以减少污染排放，实现社会的可持续发展。因此，绿色环保、节能减排已成为全社会各行各业的发展方向。

电力电子技术的精髓是能源的高效率利用和提升生产效率，它在工业、能源、交通、信息、国防、教育等重要领域有着举足轻重的作用。如果把计算机比作人的大脑，电力电子就可以看作是肌肉，它是连接信息与制造业的纽带，是实现信息化制造的支撑科技。同时，电力电子技术也是发展智能电网、新能源和节能减排的核心技术，已被列入国家科技发展计划。

在此背景下，由中国电源学会、电子工业出版社共同发起，组织成立了“新能源电能变换与控制技术丛书”编委会，旨在建立一个相关领域专家学者交流学习的平台，及时将适合的理论、技术、科研成果等著为图书并出版。丛书的定位为具有一定广度和研究深度的科技专著，主题围绕新能源应用与电能变换及相关控制技术的结合，介绍具体设计或应用，内容以研究过程、结果和应用实例为主；读者对象为相关专业工程技术人员、科研人员及高等院校师生。

丛书内容目前包括风力发电、光伏发电、燃料电池、半导体照明、分布式逆变电源系统、微电网等多个方向，并将根据相关技术的发展不断推陈出新；丛书主要作者均为长期从事相关领域高校教学及科研工作、在业内颇具影响力的学者。相信这套丛书的出版，将对新能源电能变换与控制技术的发展和传播起到促进作用，为我国新能源产业的发展贡献一份力量。

浙江大学



前 言

逆变电源的模块化及其最优化并联控制运行，是交流电源系统从传统的集中式供电向分布式供电乃至全功能电源系统供电模式发展过程中必须解决的关键技术问题。该技术的运用可大大提高逆变电源系统的灵活性，打破逆变电源在功率等级上的局限，用户可根据需要任意组合系统的功率，同时可方便的采用冗余设计，因而具有可靠性高、易大功率化的优点。电源模块产品标准化和规范化，可降低不同容量电源的设计成本和重复投资，并减少生产和维护费用。

目前，使用特种电源供电的装备日趋增多，其中逆变电源为这些装备提供了特种动力，并对于改善供电质量、提高供电效率、防止供电污染和提高供电的可靠性等方面都有十分重要的意义。当今供电系统的主要要求为高可靠性和大功率化，两者都与逆变电源的并联（逆变电源之间或逆变电源与公共电网之间）运行控制密切相关。

与此同时，采用多种能源并联组成的分布式发电系统，是大力发展可再生能源，提高供电电源可靠性，扩大供电系统容量的重要途径。分布式能源系统的供电可以由多种能源经电力变换（主要以逆变电源为主的电能变换）组网形成，其各供电单元具有分散性，且多并接于交流电网母线上。对于小型的分布式发电系统，其供电单元一般为并联型逆变电源。因此，分布式供电模式主要分为两种，一种是独立的分布供电（Stand-alone），主要应用在公用电网难以覆盖的地区或微型电网中；另一种是电网交互式分布并网供电（Utility-interactive），目前得到了较为广泛的应用，如以光伏电池（PV）所构成的分布式供电系统中，独立发电系统和并网发电（Grid-connected）系统已成为光伏发电应用的主流。多台分布式电源连接在一起即可构成相应的分布式供电系统或分布式供电网络。一般而言，分布式供电是利用相对较小的电源功率模块来组合成积木式、智能化的大功率电源供电系统设计方式。由于分布式电源供电系统具有供电质量高、系统灵活性好，可减少产品种类和便于规范化、标准化生产，可靠性高，使用维护方便等优点，得到了广泛的应用。

理想的分布式发电系统包括并联或并网的逆变电源模块、输出线路阻抗、交流总线以及接在交流总线上的负载，其中逆变电源是整个分布式发电系统运行的核心，它负责将分布式能源通过逆变变换、均流控制等技术变换为电能并实现系统的并联组网运行。逆变电源的并联控制方式一般分为集中控制、主从控制、分散逻辑控制和无互连线独立控制等多种，其中分散逻辑控制及无互连线独立控制适合于并网逆变电源分散的分布式发电系统。目前，世界上许多国家的电源公司在逆变器的并联冗余控制技术方面已经做了大量的工作，并有一系列的产品投入了使用，特别是在 UPS 系统、新能源发电系统、蓄电池储能充放电系统、航空航天供电系统、大型计算机供电系统、通信电源系统等多种应用领域。逆变电源多采用模块化组合和并联控制运行方式。

分布式电源系统采用模块化技术并加上冗余不间断供电功能，则构成了新型的全功能电



源系统供电模式。这种全功能电源系统能克服其他各种供电模式的缺陷，又能实现电力的冗余，是几乎具备所有电源功能优点的电源系统，同时它还具有容错功能和网络监控功能，因而使电源系统的可靠性大为提高。

近十年来国内在逆变电源模块化并联控制技术的研究也已取得了长足的进步。迄今为止，部分电源生产企业与一些高等院校或相关研究机构合作攻关，已形成了国产化的系列产品。华中科技大学电力电子研究中心从 20 世纪 90 年代初开始，和国内有关单位一起从事逆变电源模块化及并联控制技术的研究，取得了一些有价值的研究成果，推广了一批较成熟的技术，引起了国内有关部门和应用单位的重视。本书作者由十多年来潜心研究逆变电源模块化及并联控制技术的相关研究人员组成，该方向的研究课题组已承担了多项国家级和省部级科研攻关课题，积累了较为系统的设计理论与丰富的实践经验，所培养的该研究方向毕业生已输送到国内多家高新企业，研究成果已在多种实际产品和系统中得到应用。

近十多年来，国内外关于逆变电源模块化及并联控制技术的研究很多，积累了大量的文献，成果也极为丰硕。因此，本书期望，一方面在全面总结国内外相关研究成果的基础上，对逆变器模块化和并联技术进行归纳和总结，为模块化逆变电源系统的研究及设计提供基础理论依据和分析方法；另一方面，较为全面地介绍这类系统的控制方法和应用领域，将逆变电源模块化及并联控制技术进行理论的系统化和工程的可实现化，将研究成果与国内外同行共享，并便于读者在解决实际问题的过程中加以利用。此外，对目前国际上较新的研究课题，如采用无互连线独立控制的并联系统运行方式，尽管由于现有市场需求动力不足，尚未得到大规模的应用，但其应用潜力不可忽视；逆变器模块化及并联技术在新能源发电、储能、微网及智能电网中的应用也越来越广泛。对于这些内容，本书也给予了充分的重视，希望读者给予关注，从而推动逆变器模块化及并联技术的进一步发展。

本书共分九章，第 1 章简述了模块化 DC/AC 变换器的发展背景、分类与特点，以及逆变电源并联冗余结构及运行控制的基本方法、应用领域和发展趋势；第 2 章介绍了逆变器并联系统的数学模型及并联基础理论，重点分析逆变电源系统的并联运行结构和工作原理、模块电源并联系统可靠性特性，阐明了并联系统环流运行特性（包括三相逆变器磁路耦合对环流的影响）的分析方法；第 3 章主要介绍了并联同步的 SPWM 调制基本原理及数字化同步锁相控制技术、同步锁相的重新调制控制技术、逆变电源并联运行数字化同步控制技术对并联均流特性的影响；第 4 章介绍了逆变电源并联系统运行中谐波环流形成的原因，以及基于瞬时功率理论的谐波环流检测提取方法，分析了并联系统动态均流特性以及谐波环流抑制技术；第 5 章重点介绍了分散逻辑控制的概念和基本控制原理，分析了全数字化逆变电源的分散逻辑并联控制的系统结构、内外同步锁相算法以及模块间信息交换实现方法及基本的均流控制策略；第 6 章介绍了逆变电源并联系统中无互连线控制的基本技术需求，分析了逆变电源无互连线并联中下垂特性的含义、所隐含的通信机制及下垂特性系数的选取方法，同时提出了一种利用电力线载波通信实现逆变器无互连线并联的控制策略；第 7 章分析了基于下垂特性控制的局限性，分析了基于解耦控制的无互连线并联控制策略，重点阐述了负载、线路阻抗等参数变化对解耦控制效果的影响，并进行了多台逆变器并联时解耦控制的局限性分析；第 8 章介绍了分布式逆变电源的系统监控应用以及数据通信技术，阐述了逆变电源并联系统的故障保护策略与投入/退出切换逻辑，简要介绍了分布式发电系统中逆变电源并联系统



的能量管理技术；第 9 章侧重于介绍逆变器模块并联系统设计方法及典型应用，包括含逆变电源并联系统的测试方法、提高逆变电源模块冗余度的热插拔结构及模块的热插拔设计方法、逆变电源并联运行系统在 UPS 中的应用、逆变电源模块化并联技术在光伏发电系统中的应用等。

在本书的选题和出版过程中，得到了丛书编辑委员会、电子工业出版社及国家重点基础研究发展计划（973 计划—“高渗透率下微网与大电网相互作用机理研究”，项目批准号：2009CB219701；以及“基于液流电池储能的多体系系统耦合及综合能量管理控制策略研究”，项目批准号：2010CB227206）的大力支持，作者在此深表谢意。本书的基本研究内容已历经十多年的变化，特别是近几年相关研究工作和相关技术飞速发展，模块化逆变电源和并联运行控制技术的应用领域也越来越广泛，因而在写作的过程中只能不断进行基本内容的调整。在本书的撰写过程中，得到了陈坚教授、程时杰院士、杨荫福教授、段献忠教授、徐德鸿教授、康勇教授及阮新波教授的不断鼓励，在此表示衷心感谢！

在本书的编写过程中，我的同事和研究生也参与了部分章节的整理和编写工作，他们是刘邦银博士，完成了第 1 章和第 9 章的大部分编写工作；张宇博士，完成了第 2 章的部分编写工作；林新春博士，完成了第 6 章和第 7 章的编写工作；蔡涛博士，完成了第 8 章的编写工作。本书的其他章节及全书的统稿工作由段善旭完成。对曾在实验室从事相关研究工作，现已毕业的硕士生和博士生，作者也要表示深深的谢意，他们是孟宇、陈息坤、郭卫农、李剑、孔雪娟、余蜜、曾建友、冯锋、陈君杰、白丹、刘永桥、毛谷雨、张昌盛、舒为亮、夏斌、陈国英、吴阐、殷民等。

向参与本书制图、书稿整理付出辛勤劳动的张睿和博士后陈昌松，研究生芦铭辉、金莉、邱纯、周元峰、蔡久青、黄羚、江玲、马梦隐、赵锦波、史尤杰、仰冬冬、石林、任成达、范军等同学表示感谢。本书的编写工作得到了华中科技大学电气与电子工程学院应用电子工程系同事和研究生的支持和帮助，在此一并表示衷心的感谢。

作者还要对书末所列参考文献的所有作者表示衷心感谢。

由于作者的学识有限且时间紧迫，在逆变电源的模块化及并联运行控制技术领域还有很多内容没能在本书中得到反映，恳请读者谅解。书中内容、结构也难免有疏漏、不当和错误之处，敬请有关专家和各位读者对本书给予批评和指正。

编著者

2012 年 9 月

“新能源电能变换与控制技术丛书”编委会

主 任：徐德鸿

顾 问：王兆安

委 员：（以姓氏笔画为序）

孔 力 王凤翔 阮新波

肖湘宁 张 兴 张 波

张纯江 杨震宇 周锥维

段善旭 姜建国 赵争鸣

赵丽松 黄念慈

秘 书：苏颖杰 谌平平

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 模块化逆变电源系统的发展	1
1.1.1 电源系统供电方式的发展	1
1.1.2 逆变电源系统串并联冗余技术及系统基本结构	3
1.1.3 模块化逆变电源电路拓扑	7
1.1.4 模块化电源系统的设计策略	15
1.2 逆变电源并联及均流控制技术综述	17
1.2.1 逆变电源模块并联运行的特点	17
1.2.2 逆变电源并联运行基本原理	18
1.2.3 逆变电源并联运行的应用领域	19
1.3 逆变电源并联运行时的几种控制方式	20
1.3.1 集中控制方式	20
1.3.2 主从控制方式	22
1.3.3 分散逻辑控制方式	23
1.3.4 无互连线独立控制方式	23
1.4 模块化逆变电源并联技术应用现状与展望	24
参考文献	26
第 2 章 逆变电源系统的并联冗余运行基础理论	29
2.1 逆变电源系统的并联冗余结构	29
2.1.1 简单并联冗余系统结构	29
2.1.2 双模并联冗余系统结构	29
2.1.3 混合并联冗余系统结构	30
2.1.4 热/冷备用冗余系统结构	30
2.1.5 $N+X$ 并联冗余系统结构	30
2.2 逆变电源并联系统的可靠性分析	31
2.2.1 逆变电源并联系统的可靠性模型	31
2.2.2 $N+X$ 并联冗余系统的可靠性分析	32
2.3 逆变器并联系统的数学模型	34
2.3.1 逆变器的状态空间模型	34
2.3.2 三相逆变电源的磁路耦合	37
2.3.3 电压型逆变器的等效输出阻抗模型	48
2.3.4 单相逆变电源并联系统的稳态数学模型	55



2.3.5	单相逆变电源并联系统的动态数学模型	57
2.3.6	三相逆变电源并联系统的数学模型	59
2.4	逆变电源并联系统的环流特性	61
2.4.1	并联系统环流的稳态特性分析	61
2.4.2	并联系统环流的动态特性分析	63
2.4.3	电压闭环并联系统环流特性分析	65
2.5	三相逆变器磁路耦合对并联系统环流的影响	65
2.5.1	磁路耦合对环流动态特性的影响	65
2.5.2	三相逆变器并联系统中的零序环流	66
	参考文献	70
第3章	逆变电源并联运行数字化同步控制技术及其影响	72
3.1	并联系统中双极性 SPWM 调制方式比较	73
3.1.1	SPWM 的同步调制和异步调制	73
3.1.2	并联同步的 SPWM 调制方式	79
3.2	数字化同步锁相控制技术	83
3.2.1	锁相环的基本原理	83
3.2.2	数字锁相环 (DPLL) 的模型分析	84
3.2.3	DPLL 的基本设计与实现	86
3.2.4	基于离散傅里叶变换鉴相的数字化锁相建模及参数设计	88
3.3	数字化控制的并联系统中相位同步误差的补偿技术	94
3.3.1	数字化同步控制中的频率调节分辨率分析	94
3.3.2	同步控制的频率补偿技术——SPWM 重新调制基本原理	95
3.3.3	SPWM 重新调制特性分析	97
3.3.4	逆变电源并联系统重新调制控制数字化的实现	102
3.3.5	实验研究	105
3.4	数字化同步控制对并联均流特性的影响	108
3.4.1	数字化量化误差对并联系统的影响	108
3.4.2	数字化 SPWM 调制的控制特性分析	112
3.4.3	数字化同步控制方式下并联系统均流特性分析	118
	参考文献	124
第4章	逆变电源并联系统谐波环流抑制技术	128
4.1	逆变电流并联系统谐波环流抑制的必要性分析	129
4.1.1	并联系统谐波环流的形成	129
4.1.2	谐波环流对并联系统的影响	136
4.2	瞬时功率理论及谐波电流检测	144
4.2.1	瞬时功率理论简介	144
4.2.2	单相输出功率及谐波电流检测	146
4.3	逆变电源并联系统谐波环流抑制技术	150

4.3.1	非线性负载下并联系统谐波电流分析	150
4.3.2	并联系统谐波环流抑制策略	153
	参考文献	158
第5章	全数字化逆变电源的分散逻辑并联控制技术	161
5.1	分散逻辑并联控制的基本概念	161
5.2	逆变电源分散逻辑并联控制的原理	162
5.2.1	基于分散逻辑控制的并联系统控制结构与算法	163
5.2.2	基于分散逻辑并联控制系统的内外同步锁相控制	165
5.2.3	基于相量的均流控制技术	171
5.2.4	瞬时均流控制技术	172
5.3	基于分散逻辑控制的全数字化并联系统设计	179
5.3.1	数字化功率检测技术	179
5.3.2	模块间信息交换的实现方法	182
5.3.3	基于双环控制的并联控制策略	182
5.3.4	有功和无功电流的调节	190
5.3.5	分散逻辑控制并联逆变电源设计实例	192
5.3.6	分散逻辑并联控制系统的仿真与实验	196
	参考文献	201
第6章	逆变电源无互连线并联控制技术	203
6.1	基于下垂特性的无互连线并联控制技术	203
6.1.1	逆变电源无互连线并联中下垂特性的含义	203
6.1.2	下垂特性隐含的通信机制	204
6.1.3	下垂特性系数的选取	204
6.1.4	下垂特性控制下逆变电源并机动态过程分析	206
6.1.5	实验结果	207
6.2	基于电力线载波通信的无互连线并联控制技术	209
6.2.1	电力线载波通信及其在逆变电源无互连线并联中的应用	209
6.2.2	利用电力线载波通信实现逆变电源无互连线并联系统设计	212
6.2.3	利用电力线载波通信实现逆变电源无互连线并联的控制策略	216
6.2.4	仿真分析与实验结果	217
	参考文献	219
第7章	基于解耦控制的逆变电源无互连线并联控制策略	222
7.1	逆变电源无互连线并联系统的数学模型	222
7.1.1	单相逆变电源数学模型	222
7.1.2	逆变电源并联系统数学模型及环流分析	223
7.2	下垂特性的局限性	227
7.3	逆变电源无互连线并联中的解耦控制	230
7.3.1	一般的解耦控制策略	230



7.3.2	新型解耦控制策略	231
7.3.3	新型解耦控制策略对稳态功率均分的影响	233
7.4	参数变化对解耦控制的影响	234
7.4.1	负载变化时解耦控制效果	234
7.4.2	逆变电源输出基波等效阻抗变化时的解耦控制效果	235
7.5	多台逆变电源并联时的解耦控制	236
7.5.1	三台逆变电源并联时的解耦控制	236
7.5.2	三台逆变电源并联时解耦控制的局限性分析	239
7.5.3	多台逆变电源并联时的解耦控制	240
7.6	仿真分析与实验结果	241
7.6.1	仿真分析	241
7.6.2	实验结果	243
	参考文献	245
第8章	分布式逆变电源的系统监控与管理技术	247
8.1	逆变电源并联系统监控技术的发展	247
8.1.1	逆变电源监控系统概述	247
8.1.2	电源监控系统的体系结构	249
8.1.3	电源监控通信技术研究现状	250
8.1.4	逆变电源监控系统典型实例	252
8.2	逆变电源并联系统中的数据通信技术	256
8.2.1	设备层的数字通信技术	256
8.2.2	现场总线通信技术	258
8.2.3	逆变电源中其他通信方式	262
8.2.4	电源监控系统的抗干扰措施与通信差错检测	264
8.2.5	数字通信技术在模块化电源中的应用	267
8.3	逆变电源并联系统故障分析与保护	275
8.3.1	并联系统故障及其处理策略	275
8.3.2	并联系统故障检测	279
8.3.3	故障处理	281
8.3.4	并联系统的投入与退出	281
8.4	逆变电源并联并网系统的能量管理技术	286
8.4.1	分布式逆变电源系统的新应用形式——微网系统	286
8.4.2	分布式发电微网系统的能量管理技术	289
8.4.3	可再生能源发电微网系统的能量管理技术	290
	参考文献	295
第9章	逆变器模块并联系统设计方法及典型应用	297
9.1	逆变器模块并联系统设计方法	297
9.1.1	系统设计指标及要求	297



9.1.2	硬件电路系统设计	300
9.1.3	旁路控制策略及过载保护综合切换逻辑电路设计	302
9.1.4	冲击和短路保护电路设计及其实验研究	305
9.1.5	软件系统设计	309
9.1.6	工程化技术研究	310
9.2	逆变电源模块化并联系统的典型应用	311
9.2.1	逆变电源模块化并联系统在 UPS 中的应用	311
9.2.2	逆变电源模块化并联技术在光伏发电系统中的应用	314
9.2.3	逆变电源模块化并联技术在储能系统中的应用	322
9.2.4	逆变电源模块化并联系统在微网中的应用	326
	参考文献	329

第1章 绪论



基于新能源分布式发电独立或并网运行的发展以及 UPS 等供电系统的高可靠性、系统扩容可实现性和维护的便捷性等性能要求, 逆变电源的模块化及其串并联组合的电源系统在分布式供电系统中得到了广泛应用。而分布式供电的兴起, 主要有以下三个方面的推动力。

① 分布式供电可以弥补大电网安全和稳定性方面的不足。随着电网的进一步膨胀, 其安全性和稳定性受到越来越大的威胁, 而直接安置在用户附近的分布式发电装置与电网配合, 可以大大提高供电系统的可靠性, 在电网崩溃和意外灾害情况下可维持重要用户的供电。

② 分布式供电为能源的综合利用提供了可能。在常规的集中供电方式中, 能量形式相对单一, 当用户不仅仅需要电力, 还需要其他能量形式, 如热能或冷能时, 仅通过电力来满足以上需求时难以实现能量的综合利用, 成本较高; 而分布式供电方式以其规模小、灵活性强等特点, 可以通过不同循环的有机整合在满足用户需求的同时实现能量的综合利用, 而且还克服了冷能和热能无法远距离传输的困难。

③ 分布式供电为可再生能源的利用开辟了新的方向。相对于化石能源而言, 可再生能源的能流密度较低, 分散性强, 而且目前的可再生能源利用系统规模小、能源利用率较低, 作为集中供电手段不太现实, 分布式供电方式为可再生能源利用的发展提供了新的动力。

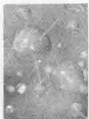
基于逆变电源并联的分布式供电系统具有规范化、模块化设计、便于扩容、工作频率可以做得较高、功率密度可以做得较大等特点, 在新能源发电系统、航空航天供电系统、大型计算机供电系统、通信电源系统、银行电源系统、仪器仪表和家用电器等多种应用领域已逐步得到了广泛应用。

分布式电源系统采用模块化技术并加上冗余不间断供电功能, 则构成了新型的全功能电源系统供电模式。这种全功能电源系统能克服其他各种供电模式的缺陷, 又能实现电力的冗余, 是几乎具备所有电源功能优点的电源系统, 同时它还具有容错功能和网络监控功能, 因而使电源系统的可靠性大为提高。

1.1 模块化逆变电源系统的发展

1.1.1 电源系统供电方式的发展

科学技术的突飞猛进, 促进了电源技术的迅速发展。一般来说, 电源的任务是安全、可靠、不间断地供给计算机、通信等电子设备所需的电能。因此, 对于电子设备而言, 电源是



其心脏，它必须自成一个完整的功能体系，即所谓的电源系统。随着电力电子技术的发展，电源系统的研究和应用领域也逐步从电子设备供电的常规电源系统延伸和扩展到现代电力系统的各个方面，包括新能源并网发电系统和储能系统等。下面以电子设备供电系统为例，介绍电源系统供电技术的发展。

由于电源系统的应用领域日益扩大，人们对其基本性能也相应地提出了更高的要求，即希望任何一类电源系统可实现：

- ① 能全面贯彻电磁兼容各项标准；
- ② 可以大规模稳定生产或快捷单件特殊生产；
- ③ 能组建大容量供电系统；
- ④ 电气额定值能更高（如功率因数）或更低（如输出电压）；
- ⑤ 可使外形小型化，总体结构和外形能适应各种场合的要求。

这些要求是电源装置在更广泛领域应用的关键，而实际上，这些要求都与电源系统的设计方案密不可分。电源系统方案的确定，即供电方式的选取在很大程度上决定了其性能和可靠性水平。随着新的电子元器件、新的变换控制技术和新的控制理论在电源系统中的应用，

电源系统的供电方式经历了集中式供电方式、分布式供电方式和全功能电源供电方式三个阶段。

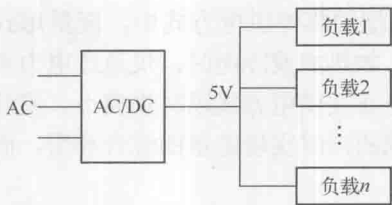


图 1.1 集中式 AC/DC 电源系统原理框图

传统的集中式 AC/DC 电源系统原理框图如图 1.1 所示。它的固有缺陷：供电系统各个输出电压之间的偏差及由于供电传输距离的不同而造成的压降降低了供电质量；而应用单台电源供电时，一旦发生故障则可能导致系统瘫痪，并导致不可估量的损失。例如，1996 年美国电源协会曾公布美国计算机系统中“45% 以上的数据丢失的起因是电源故障，这一故障发生率远远高于 2% 的硬件、软件错误和 3% 的人为错误；在一个典型的系统中每月大约出现 120 次电源问题”。

随着高频电源技术及新型功率器件的发展，分布式电源供电技术成为国际电力电子学的研究热点，研究内容包括高频化电源变换技术、高功率密度封装技术、电源单元并联技术、功率因数校正技术以及电源模块化和电源系统智能化技术等。

所谓分布式供电是相对于集中式供电而言的，它是利用最新电源理论和技术做成相对较小的电源功率模块来组合成积木式、智能化的大功率电源系统的供电系统设计方式，其系统原理框图如图 1.2 和图 1.3 所示。分布式电源供电系统具有以下主要优点：

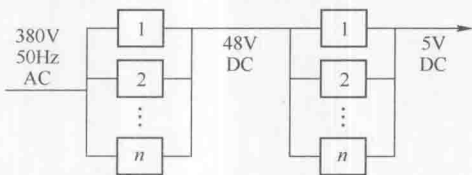


图 1.2 分布式 DC/DC 电源系统原理框图

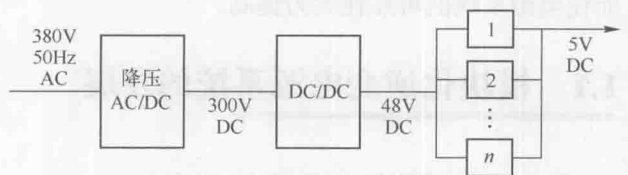


图 1.3 分布式 AC/DC 电源系统原理框图

- ① 供电质量高。因为各供电单元最接近负载，改善了负载静态和动态响应特性。



② 提高了系统的灵活性, 可将模块的开关频率提高到兆赫级, 从而提高了系统的功率密度, 使电源系统的体积、质量大为下降。

③ 减少了产品种类, 便于规范化和标准化。

④ 高效、节能。减小了传输损耗, 提高了系统效率, 节约了能源。

⑤ 可靠性高。各个模块的功率半导体器件的电应力减小, 而且容易组成 $N+1$ 冗余供电系统, 提高了系统可靠性。

⑥ 使用维护方便。积木式、智能化系统现场维护故障单元方便、快捷, 且容易扩展系统功能。

由于分布式供电系统具有规范化、模块化设计, 便于扩容, 工作频率可以做得较高, 功率密度可以做得较大等特点, 它得到了广泛的应用, 如在航空航天、大型计算机供电系统、通信电源系统、银行电源系统、仪器仪表和家用电器等多种应用领域。近几年来, 分布式电源系统采用模块化技术并加上冗余不间断供电功能, 构成了新型的全功能电源系统供电模式, 这种全功能电源系统能克服其他各种供电模式的缺陷, 又能实现电力的冗余, 是几乎具备所有电源功能优点的电源系统, 同时它还具有容错功能和网络监控功能, 因而使电源系统的可靠性大为提高。

电力电子技术正逐步渗透到电力系统发、输、配、用、储的各个环节, 推动了现代电力系统技术的发展, 形成了分布式发电系统、微网和智能电网等新兴领域。并网发电系统和储能系统等电源系统在这些新兴领域占据了重要地位, 成为其必不可少的组成部分。在这些新兴领域中应用的电源系统具有容量大、地域分布广等特点, 因此通常采用分布式网络将模块化电源并联构成各种适用于不同需求的并网发电和储能系统接入电网, 大大提高了系统的可扩展性和可靠性。

1.1.2 逆变电源系统串并联冗余技术及系统基本结构

采用模块化集成技术的逆变电源系统有很多种组合方式, 其中很重要的一种就是模块化逆变电源的串并联, 即将模块化逆变电源的输入端和输出端分别相互串联或并联。如图 1.4 所示, 根据不同连接方式, 多逆变电源模块串并联组合系统可分为四种基本类型: 输入并联输出并联 (Input-parallel output-parallel, IPOP)、输入并联输出串联 (Input-parallel output-series, IPOS)、输入串联输出并联 (Input-series output-parallel, ISOP)、输入串联输出串联 (Input-series output-series, ISOS)。将四种基本类型的串并联组合系统的输入和输出再加以组合, 可得到多个逆变电源模块的混合串并联组合系统。

每类模块化逆变电源串并联组合系统都有其特定的应用场合, IPOP 系统适用于输出电流较大的场合; IPOS 系统适用于输入电压较低而输出电压较高的场合; ISOP 系统适用于输入电压较高而输出电流较大的场合; ISOS 系统适用于输入电压和输出电压均较高的场合。

逆变电源模块串并联组合系统具有以下优点:

① 由于采用了标准化模块, 有利于缩短系统的研发周期, 降低开发成本。

② 当系统由 n 个模块组成时, 每个模块的输出功率为系统输出功率的 $1/n$, 从而可以降低开发难度。

③ 由于采用多个变换器模块的串并联组合, 容易实现系统的冗余, 提高其可靠性。

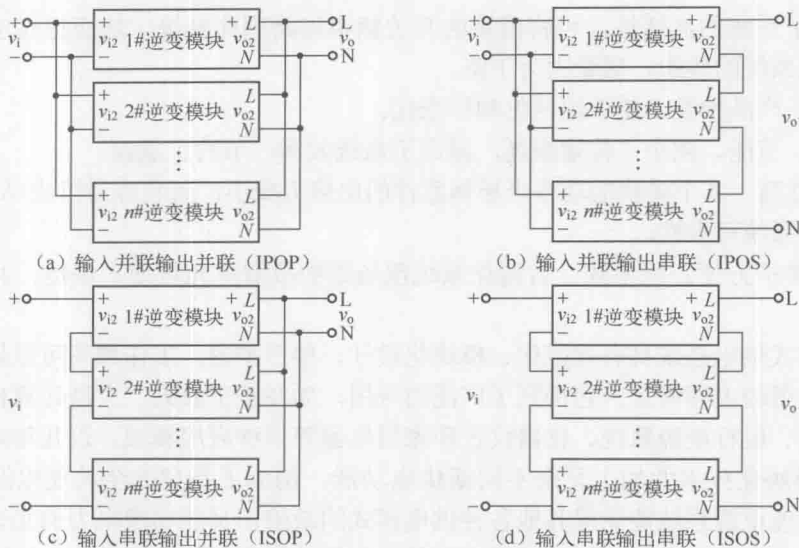


图 1.4 四类模块化逆变电源模块串并联组合系统

④ 若采用交错控制技术，可减小输入/输出电压/电流纹波，在相同的电压/电流纹波要求下，可减小滤波器，由此可以提高变换器的功率密度。

逆变电源并联系统的结构形式多种多样，从不同的角度有不同的划分方法，按照有无与公用电网进行能量交换，可分为独立并联系统和交互式的并联系统；按照是否有公用直流电源，可分为独立直流电源的并联系统和共用直流电源的并联系统；按照逆变器的输出特性划分，可分为电压源逆变器并联、电流源逆变器并联和两者的混合并联系统。不同并联方式组成的并联系统具有不同的系统性能和特点。

1. 独立并联系统和交互式的并联系统

独立并联系统中的逆变器不与公共电网进行能量交换，自成体系，其拓扑结构图如图 1.5 所示。这种拓扑结构一般应用于当前的 UPS 并联系统中，以提高供电系统的可靠性。独立并联系统中的逆变器可能是电压控制型或电流控制型的，也可能是电流控制型和电压控制型的混合并联。

电压控制型逆变器并联时，处于并联状态的每一台逆变器相当于一个电压源，具有相同的地位。这种并联系统拓扑结构的优点是便于实现模块化并联。由于并联系统中的每台逆变器都相当于一个电压源，多台逆变器并联之后其输出滤波器的谐振频率会发生改变，使得并联系统的波形控制难度加大，并联系统中的逆变器间的谐波环流较大。在电压控制型逆变器和电流控制型逆变器的混合并联系统中，电压控制型逆变器提供输出需要的电压，所有的电流控制型逆变器跟踪电压控制型逆变器的输出电压波形，且输出负载需要的交流电流。在这种并联控制方案中，只有一台逆变器相当于电压源，而其他都相当于电流源，此时逆变器并联在一起并不会改变整个并联系统的谐振频率，从而也不会影响输出电压的波形质量，谐波环流较小。这种方案中并联的各台逆变器不是均等的。