



国家电网公司
电力科技著作出版项目

Integration of Green and Renewable Energy
in Electric Power Systems

绿色可再生能源 电力系统接入

[美]阿里·可哈尼 (Ali Keyhani)

[印尼]穆罕默德 N. 马瓦里 (Mohammad N. Marwali) 著

戴民

王志新 王承民 李旭光 史伟伟 译



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家电网公司
电力科技著作出版项目

Integration of Green and Renewable Energy
in Electric Power Systems

绿色可再生能源 电力系统接入

[美]阿里·可哈尼 (Ali Keyhani)

[印尼]穆罕默德 N. 马瓦里 (Mohammad N. Marwali) 著

戴民

王志新 王承民 李旭光 史伟伟 译



NLIC2970887723



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内容提要

《绿色可再生能源电力系统接入》一书包括智能电网分布式发电系统、分布式发电系统中逆变器的电压和电流控制、分布式发电系统中逆变器的并联运行、分布式发电系统的功率变换器拓扑、孤岛运行模式下三相四线制分布式发电逆变器的电压与电流控制、单个分布式发电单元的潮流控制、分布式发电系统电压与电流控制的鲁棒稳定性分析、三相分布式发电系统 PWM 整流器控制等,共 9 章,内容丰富、技术先进,是国内外可再生能源发电技术领域关注的热点,代表该领域国际先进水平,值得引进作为我国高等学校可再生能源发电及相关专业研究生的教材,也可供从事可再生能源发电的技术人员、管理干部参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

绿色可再生能源电力系统接入/(美)可哈尼(Keyhani, A.), (印尼)马瓦里(Marwali, M. N.), 戴民著;王志新等译. —北京:中国电力出版社, 2012.10

书名原文: Integration of Green and Renewable Energy in Electric Power Systems

ISBN 978-7-5123-3623-0

I. ①绿… II. ①可… ②马… ③戴… ④王… III. ①再生能源—发电—高等学校—教材 IV. ①TM619

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 245407 号

北京市版权局著作权合同登记 图字: 01-2010-2641 号

Copyright © 2010 by John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

Authorized translation from the English language edition, entitled *Integration of Green Renewable Energy in Electric Power Systems*, ISBN 978-0-470-18776-0, by Ali Keyhani, Mohammad N. Marwali, Min Dai, published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 2 月第一版 2013 年 2 月北京第一次印刷

700 毫米×1000 毫米 16 开本 19.5 印张 321 千字

定价 68.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

译 序

风能及太阳能等可再生能源发电技术日趋成熟，其应用量不断增大，分为离网与并网发电两种方式。其中，并网发电要求解决电力系统接入相关技术难题，这些难题目前已成为制约我国乃至全球可再生能源发电规模化应用的主要因素之一。2011 年底，我国风电装机已超过 6400 万 kW，光伏电站新增装机 289 万 kW，累计总装机 374 万 kW。随着我国风电和光伏电站装机规模的持续增长，风电和光伏发电接入电力系统的技术瓶颈显得更加突出，迫切需要解决并网发电与电力系统接入等关键技术；但至今国内未见有类似综合介绍相关技术的书籍（教材）出版，国内高等学校纷纷开设可再生能源发电专业，也急需相关教材作为教学参考书籍。

由美国 John Wiley & Sons, Inc 公司 2010 年出版发行的 *Integration of Green and Renewable Energy in Electric Power Systems*（《绿色可再生能源电力系统接入》，ALI KEYHANI, MOHAMMAD N.MARWALI, MIN DAI 著）一书，包括智能电网分布式发电系统、分布式发电系统中逆变器的电压与电流控制、分布式发电系统中逆变器的并联运行、分布式发电系统的功率变换器拓扑、孤岛运行模式下三相四线制分布式发电逆变器的电压与电流控制、单个分布式发电单元的潮流控制、分布式发电系统电压与电流控制的鲁棒稳定性分析、三相分布式发电系统 PWM 整流器控制等国内外可再生能源发电技术领域关注的热点，共九章，内容丰富、技术先进，代表该领域国际先进水平，值得引进作为我国高等学校可再生能源发电及相关专业研究生的教材，也可供从事可再生能源发电技术人员、管理干部参考。

上海交通大学王志新教授、王承民副教授、李旭光副教授、史伟伟博士承担了该书的翻译工作。其中，王志新翻译前言、致谢、第 1 章、第 8 章、第 9 章及附录的相关部分、参考文献、索引，并负责全书统稿和最后整理、校对及定稿工作；王承民翻译第 6 章、第 7 章、第 9 章及附录的相关部分；李旭光翻译第 4 章、第 5 章、第 9 章及附录的相关部分；史伟伟翻译第 2 章、第 3 章、第 9 章及附录的相关部分。硕士研究生邓玲慧协助全书统稿和最后整理、校对及定稿工作。本书的译者近年来一直从事风力发电、光伏发电并网，以及智能电网用户端配电技术的科研和教学工作，

主讲可再生能源发电系统 (Renewable Energy System for Electric Power Generation) 等课程, 所负责的科研项目得到国家自然科学基金重点项目、国家 863 智能电网关键技术研发重大项目、中国博士后基金、上海市科技成果转化重大项目、上海市科技发展基金、上海市教育发展基金、上海市白玉兰科技人才基金、江苏省六大人才高峰行动计划、江苏省创新基金项目等的资助, 在风电机组变桨控制、风电场远程监控、海上风电柔性直流输电变流器技术 VSC-HVDC, 以及光伏移动应急电源、风光互补发电、智能电网用户端配电技术等方面取得了丰硕成果, 获授权发明专利 13 项, 在国内外发表 SCI (如 *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *IEEE Transactions*, *Wind Engineering*)、EI 检索论文 (如 *电工技术学报*、*太阳能学报*、*中国电机工程学报*) 80 余篇; 编著《现代风力发电技术及工程应用》、《火电厂监控信息系统 SIS 及应用》、《电机控制技术》著作及教材 5 部。

上海交通大学陈陈教授担任本书主审, 提出了许多建设性的修改意见; 中国电力科学研究院新能源研究所所长王伟胜教授、上海交通大学王杰教授为本书的完成给予了大力支持和帮助, 在此译者一并表示感谢。本书还得到了国家电网公司电力科技著作出版项目暨电力科技专著出版资金 (编号: 2010043) 资助。

译 者

2011 年 9 月 于上海

简介

本书是一部实用性很强的教材，侧重于介绍绿色可再生能源接入电力系统采用的功率变换器的建模和控制的分析结果。

随着功率半导体器件和微处理器性能的改进，功率半导体开关器件、脉宽调制算法和控制理论等综合技术取得了长足发展，使得未来十年可以获得更加高效、可靠和价廉的电能量变换技术。《绿色可再生能源电力系统接入》一书涵盖了适用于分布式发电系统和不间断电源应用的电力电子系统 PWM 变换器闭环控制的基本原理、分析方法与综合技术。

作者提供了两个版本的基于 MATLAB Simulink 的带注释的仿真实验平台，可用于完成课后作业课题和项目试验，有助于读者通过仿真试验理解所学内容。第一个版本包含许多问题及项目，利于课堂教学。第二个版本取自工程师和工业界研究人员取得的功率变换器控制的最新研究成果。该仿真实验平台具有以下特点：

- (1) 侧重于涉及 PWM 算法和数字控制技术最新进展的综合应用；
- (2) 针对相关问题及项目详细地进行数学建模和设计控制算法，并给出了解决步骤和结果；
- (3) 使用了很多表格、电路和模块图、精心设计的波形图，以及测试问题、解决方法和项目，以利于获得最好的教学互动效果；
- (4) 针对具体实例提供了计算机仿真程序以便于理解，同时，还有与该项目有关的仿真平台。

《绿色可再生能源电力系统接入》包涵了大量功率变换应用实例，适用于工业界专业人员参考，也是一部面向应用的系统分析与综合的教材，对于应用电气工程师、研究人员以及研究生和大学生具有指导意义。

Ali Keyhani, 博士, IEEE FELLOW, 1989 年、1999 年、2003 年俄亥俄州立大学工程院研究奖获得者，电气与计算机工程教授，俄亥俄州立大学电气与计算机工程系机电一体化——绿色能源系统实验室主任。

Mohammad N. Marwali, 博士, 艾默生网络电源部高级开发科学家。

Min Dai, 博士, 艾默生网络电源部项目工程师。

前言

在过去的 20 年中, 作者 Ali Keyhani 的研究工作得到国家科学基金* 资助。本书取自这些资助计划取得的研究成果。作者意识到需要编写一本涉及电气工程领域的电力系统工程、控制系统工程和电力电子三个方向的教材, 关注绿色可再生能源接入电力系统技术, 将这三个方向融合的方法有别于传统方法。由于要实现该目标很复杂, 作者决定仅提出基本概念和提供 MATLAB 仿真实验平台, 并采用针对具体题目的形式应用这些概念, 解决绿色能源接入电力系统的基本问题。因此, 书中每一章包括三个部分: 首先, 叙述了接入电力系统存在的问题及其重要性; 其次, 建立了相应的数学模型, 给出了解决该问题的步骤, 每个解决步骤还附加了针对同一问题开发的 MATLAB 仿真实验平台; 最后, 给出了每个题目的结果, 以及适用场合和试验结果。本书可以用作教材或供研究人员参考。由于每一章均给出了一个题目, 教师可以通过改变参数或控制对象的方式应用这些题目, 供学生学习和练习。建议本书用作研究生和大学生的教材, 要求学生具备电力系统、电力电子和控制工程的基础知识。然而, 由于本书选用的题目针对性强, 因此, 如果该书仅用于补充学生需要的一些基本概念, 教师还可以将该书作为培养电气和机械工程师的交叉学科的研究生教材。

本书侧重于功率变换器的控制技术, 作者提出如何通过控制逆变器, 使其起动力单元的作用, 并能提供有功和无功功率。书中还给出了设计智能电网分布式发电系统的基本架构。第 1 章给出了分别称作直流母线架构和交流母线架构的两个智能电网分布式发电集成系统, 第 2 章给出了分布式发电系统中逆变器的电压与电流控制, 第 3 章给出了分布式发电系统中逆变器的并联运行, 第 4 章给出了分布式发电系统的功率变换器拓扑, 第 5 章给出了孤岛运行模式下三相四线制分布式发电逆变器的电压与电流控制, 第 6 章给出了单个分布式发电单元潮流控制, 第 7 章给出了分布式发电系统电压与电流控制的鲁棒稳定性分析, 第 8 章给出了三相分布式发电系统 PWM 整流器控制, 第 9 章给出了 MATLAB Simulink 仿真实验平台。书中的这些协调控制方法以 MATLAB Simulink

仿真实验平台的形式给出，在第 9 章给出了适用于全书每一章的仿真实验平台。教师可以结合每一章的辅助 MATLAB 仿真实验平台指导学生学习数学建模，和完成控制的课题。

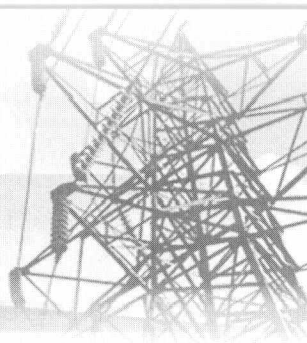
ALI KEYHANI
MOHAMMAD N. MARWALI
MIN DAI

* 本书取自第一作者获得的国家自然科学基金资助计划（基金编号：ECCS 0501349、ECCS 0105320、ECCS 0118080）取得的研究成果，书中表达的任何观点、科学发现、结论或评论属于 Ali Keyhani 个人，并不代表国家自然科学基金的观点。

致 谢

在过去的 20 年中, Ali Keyhani 的研究工作得到国家科学基金资助。本书取材于这些资助计划项目取得的研究成果。本书是 Davison 和 Ferguson 关于多变量鲁棒伺服系统问题 (RSP) 理论, Francis 和 Wonham 关于线性多变量调节器内模原理, 以及 Utkin 的滑模控制技术成果的综合应用。多年来, 俄亥俄州立大学的许多研究生和大学生为该书作出了贡献。Ali Keyhani 尤其要感谢 Charles A. Klein 教授, 以及俄亥俄州立大学电气与计算机工程学科前主席、副系主任 H.C.Ko 教授给予的支持和指导。感谢利伯特交流电源和艾默生网络电源公司副总裁、总经理 Peter Panfil 先生所作的贡献, 多年来共同提出问题, 确定功率变换器控制的研究方向, 以及对俄亥俄州立大学机电一体化—绿色能源实验室给予的支持; 同时, 感谢爱迪生材料技术中心新产品开发部副经理 Jon L.VanDonkelaar 先生对书中许多主题所开展的合作。最后, 作者还要感谢家庭所给予的支持。

John Wiley & Sons, Inc 公司参与本书出版的人员包括 Paul Petralia 高级编辑、Michael Christian 助理编辑和 George Telecki 副社长。



目 录

译序
简介
前言
致谢

第1章 智能电网分布式发电系统	1
1.1 引言	1
1.2 2MVA 光伏电站直流母线结构设计	5
1.3 光伏电池组件	6
1.4 2MVA 光伏电站结构设计	7
1.5 分布式发电系统作为公用电网电力系统的一部分	11
1.6 电力系统无功控制	14
1.7 逆变器也是一个三端装置	15
1.8 智能电网光伏发电—不间断电源(PV-UPS)分布式发电系统	16
1.9 智能电网离网型直流母线不间断电源—光伏发电分布式发电系统	18
1.10 孤岛运行模式	19
1.11 逆变器并联运行	19
1.12 逆变器按照蒸汽机组方式运行	21
1.13 电能质量问题	22
第2章 分布式发电系统中逆变器的电压和电流控制	24
2.1 功率变换器系统	24
2.2 控制理论	28

2.3	控制系统开发	31
2.4	控制流程分步说明	37
2.5	用 MATLAB 程序计算控制增益	43
2.6	MATLAB Simulink 仿真	46
2.7	Simulink 仿真过程的分步详解	53
2.8	仿真与实验结果	55

第3章 分布式发电系统中逆变器的并联运行 ▶ 64

3.1	引言	64
3.2	分布式发电系统介绍	65
3.3	分布式发电系统 (DGS) 控制要求	67
3.4	分布式发电系统建模	69
3.5	控制系统设计	73
3.6	负荷分配控制算法	78
3.7	仿真结果	82
3.8	结论	90

第4章 分布式发电系统的功率变换器拓扑 ▶ 92

4.1	引言	92
4.2	分布式发电系统	92
4.3	孤岛运行模式下单个逆变器的电压与电流控制	94
4.4	系统拓扑结构	96
4.5	牛顿—拉夫逊方法	99

第5章 孤岛运行模式下三相四线制分布式发电逆变器的电压与电流控制 ▶ 103

5.1	电厂主电路模型	103
5.2	基本数学模型	104
5.3	将模型变换到静止坐标系	104
5.4	将模型变换到标幺值系统	106

5.5	建立控制系统	108
5.6	离散滑模控制器设计	108
5.7	鲁棒伺服电压控制器设计	110
5.8	限流保护	117
5.9	传统空间矢量 PWM	118
5.10	频域分析	126
5.11	实验结果与实验装置	136
5.12	鲁棒稳定性分析与 μ -分析	144
第 6 章	单个分布式发电单元的潮流控制 ▶	156
6.1	引言	156
6.2	控制系统	157
6.3	电压与电流控制	158
6.4	有功与无功控制问题	160
6.5	常规积分控制	161
6.6	稳定问题	163
6.7	牛顿—拉夫逊参数的估算与前馈控制参数的确定	164
6.8	谐波功率控制	167
6.9	仿真结果	169
6.10	实验结果	173
第 7 章	分布式发电系统电压与电流控制的鲁棒稳定性分析 ▶	177
7.1	引言	177
7.2	稳定性问题	178
7.3	采用结构奇异值 μ 的鲁棒稳定性分析	184
7.4	控制器性能调节	190
第 8 章	三相分布式发电系统 PWM 整流器控制 ▶	197
8.1	引言	197
8.2	系统分析	199

8.3 控制策略.....	201
8.4 仿真结果.....	202
8.5 实验结果.....	203
8.6 小结	205
第9章 MATLAB Simulink 仿真实验平台 ▶	206
9.1 第2章 MATLAB 仿真实验平台	206
9.2 程序 SFUNFFT.M.....	213
附录 A SIMULINK 模型 <i>DSIMSERVO.MDL</i>	227
附录 B 程序清单 SSMODE.M	246
参考文献.....	275

智能电网分布式发电系统

1.1 引言

能源技术对社会和经济的发展起着重要的作用，影响范围涉及家庭、社区、地区、国家和全世界。与其有益作用对应，能源与环境污染和恶化、经济发展、社会生活质量密切相关。今天，我们更加依赖不可再生的化石燃料，而这些化石燃料已经并将继续成为引起污染和气候变化的主要根源。由于这些问题的存在，再加上我们的石油供应逐渐减少，所以找到可持续的替代燃料就变得日益迫切。或许要实现可持续发展，最大的挑战就是开发智能电网分布式发电的可再生能源的并网与控制技术。

智能电网分布式能源系统将提供使用可再生能源的平台，并为大型城市的负荷中心提供足够的应急电源，保证避免出现由于人为事件和环境灾难引起的互联电力系统完全断电的情况，能够将互联电力系统分解成集中的较小的部分。

本书旨在介绍电力系统可再生能源的并网与控制。模型对于系统的控制十分重要，因为模型可以描述基本系统的动态过程。本书将提供绿色能源系统的模型，这些模型将用于开发控制方法以控制模型的动态过程，从而完成控制任务。

本书给出了分布式发电的架构和利用可再生能源变换器的控制方法，可再生能源包括风能、太阳能、燃料电池发电站、高速微型燃气轮发电机发电站，以及用作当地能源的储能装置。本书侧重于控制技术，如控制功率变换器给负荷供电，并调节电压、频率和功率波动。书中给出了鲁棒全稳定跟踪控制技术，以及适用于分布式能源系统的扰动量衰减算法。同时，作为该主题的一部分，书中给出了基于 MATLAB Simulink 的控制技术仿

真实验平台；通过引入组合模块并采用时序学习方法进行分析和建模，并给出了相应的控制；采用控制方法研究了低压分布式系统中多个分布式发电装置的并联运行，减少循环功率流，降低非线性负荷的影响，如功率预调节功率因数校正负荷、负荷突然跌落引起的电压和功率波动、本地设备的启动和停止等。此外，本书还有助于开拓一个新的领域进行仿真与实验研究，满足工业界的迫切需要，拓展绿色能源系统、电力电子和控制技术的知识基础。

图 1-1 和图 1-2 所示为绿色可再生能源电网分布式发电系统的直流架构和交流架构，该系统包含燃料电池发电站、风力发电机组、太阳能阵列、高速微型燃气轮发电机发电站和储能系统。燃料电池和太阳能电源的输出量是低压直流电，通过 DC/DC 变换器处理后变成电压等级更高的直流电。但是，风力发电机组电源的输出量是频率变化的交流电，微型燃气轮发电机的输出量是高频交流电。对于这两种电源，要用到 AC/DC 或 AC/AC 变换器。

在图 1-1 所示的架构中，分布式发电电源连接到同一个包含储能系统的直流母线上。通过储存直流电源，具有即插即用功能，并采用 DC/AC 变换器输出交流电。今天，商用储能装置，如流体电池和飞轮电池系统，能够释放从持续 700kW/5s 至持续 2MW/5min 的电，或释放最长持续 1MW/30min 的电，而 28 只超级电容可以释放持续几秒钟的 12.5kW 电能。图 1-3 所示低压配电系统中的分布式电源代表了一种发电站，该发电站可以包含图 1-1 和图 1-2 中的一种或所有分布式电源，这些分布式发电装置并联连接。分布式发电系统可以作为一个孤岛系统运行或与本地公用电网并联运行。在孤岛运行模式下，分布式发电系统使用本地公用电网作为后备电源。首先，根据实际应用，可再生能源常用于给所有或部分基础负荷供电，其余的分布式电源用来调节系统电压和功率。但是，要求设计的孤岛配电网络及其分布式电源不仅能够满足其自身日常负荷周期的需要，同时还要符合计算的可靠性指标要求，比如最大分布式电源切除的情况。也就是说，一旦出现大的扰动，与调节设备连接的储能装置就可以用来控制和稳定低电压与功率波动。在孤岛运行模式下，一旦扰动是可控的，则可以利用局部频率下垂，通过控制直流母线电压和电流，给储能装置充电（即电池、飞轮等），向直流母线提供直流电来稳定系统。为了更好地理解这个问题，必须研究孤岛网络中分布式电源的组合问题，研究有关最大分布式电源的切除及其影响。恰当的分布式电源调节装置组合，例如，微型燃气轮发电机组（大约为数秒的响应速度）、燃料电池发电站（大约为

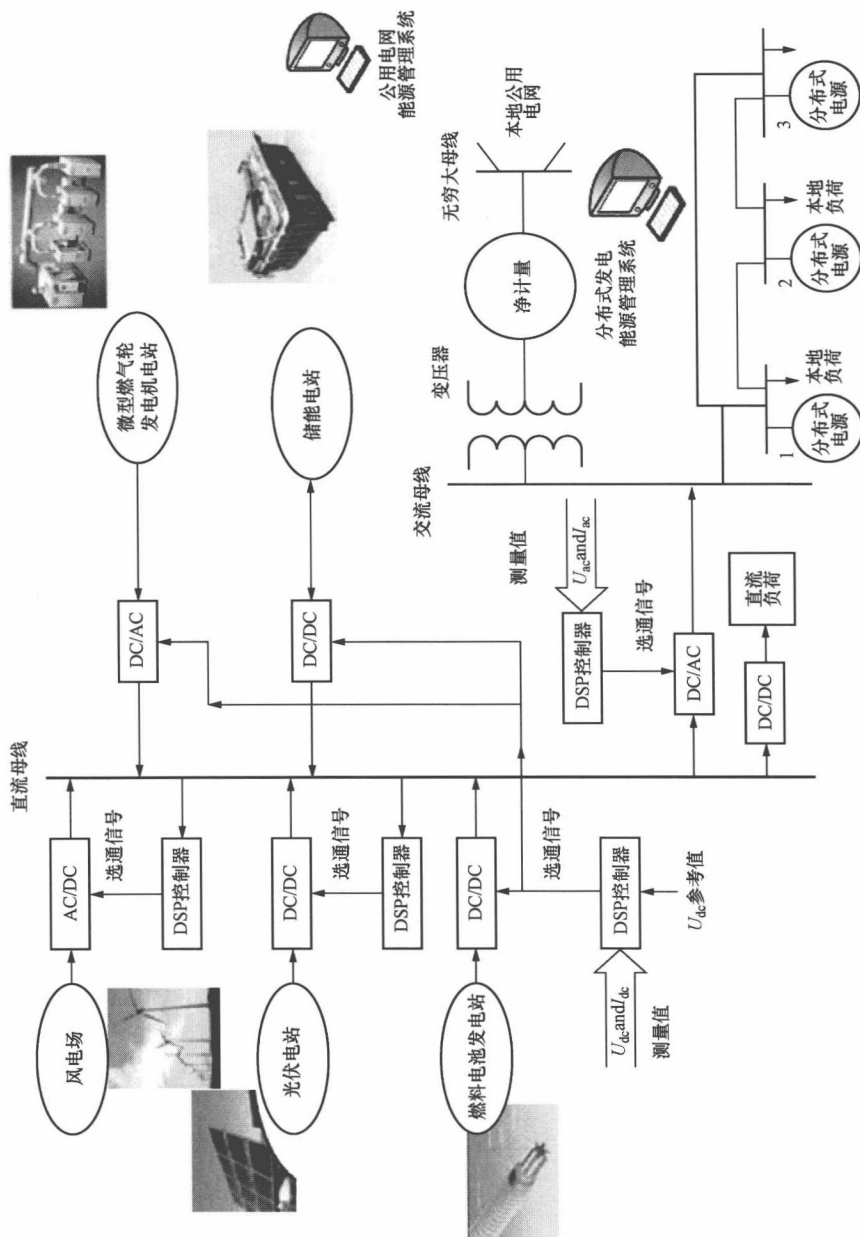


图 1-1 绿色可再生能源电网分布式发电系统直流母线结构



图 1-2 2MVA 光伏发电站直流母线结构