

研究生教材

WEIDIANWANG YU DIANLI DIANZI
YINGYONG JISHU

微电网与电力电子 应用技术

张占松 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

张占松

研究生教材

WEIDIANWANG YU DIANLI DIANZI
YINGYONG JISHU

微电网与电力电子 应用技术

主编 张占松
编写 何可人 孙铁成 陈慕平
汤 雨 张 义 李璟东



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书由电力电子技术与可再生能源应用发展到可以并上市电网的大背景下产生,首先定义了电子电力电源名词,对微电网模型进行深入的数学理论分析,介绍其全面特质功能及框图、主要组建设备、特性等。介绍光伏、风能、海浪能可再生能源发电和最大功率跟踪控制方法。其次介绍各种新型双向能流的变流器,深入分析大磁路设计方法,将变流器中的功率开关分为硬开关、软开关两类,介绍其计算及设计方法。再次介绍 LED 及 PWM 拓扑各种实用化、大型化、积木化和双向化。最后介绍微电网中功率因数校正法。

本书可供电气工程及其自动化、自动化等专业本科生、研究生使用,也可供电子电力电源设计制造者参考。

图书在版编目(CIP)数据

微电网与电力电子应用技术 / 张占松主编. —北京: 中国电力出版社, 2017. 8

研究生教材

ISBN 978-7-5198-0631-6

I. ①微… II. ①张… III. ①电网—电力工程—研究生—教材②电力电子技术—研究生—教材 IV. ① TM727 ② TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 070367 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 牛梦洁 (010-63412528)

责任校对: 常燕昆

装帧设计: 张 娟

责任印制: 吴 迪

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

版 次: 2017 年 8 月第一版

印 次: 2017 年 8 月北京第一次印刷

开 本: 787 毫米 × 1092 毫米 16 开本

印 张: 21.5

字 数: 523 千字

定 价: 56.00 元

版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

编写组成员名单（排名不分先后）

- 陈慕平 台湾工业技术研究院资深研究员、台湾《电力电子》前秘书长、福肯达科技公司执行长，中华工业合作促进协会理事、工学博士
- 孙铁成 哈尔滨工业大学教授
- 何可人 原天津大学教师，曾任珠海西门子-松下（S+M）电子有限公司研发部经理，现任香港 EMIF 科技有限公司顾问
- 张 义 上海占空比半导体有限公司研发工程师
- 汤 雨 南京航空航天大学博士、研究生导师
- 李璟东
黄永清 台湾工研院、绿源研究所研究员
- 张占松 原中国电源学会副理事长，国际交流工作部主任，现中国电源学会荣誉理事，广东省电源学会、协会发起、组建人，学会（第1~3届）理事长，广东省科协全省委员会常委，广东工业大学教授

序 言

为应对气候变化,发展新能源成为我国能源发展的必然选择。近年来,我国可再生能源发电的装机容量快速增长。截至2013年并网风电累计装机达到7548万kW,并网光伏发电累计装机达到1942万kW。预计到2040年,风电、太阳能发电和其他非水可再生能源发电装机容量将占电力总装机容量的17%。

如何将具有波动性、间隙性、不确定性的可再生能源加以有效利用,将更高比例的可再生能源导入电力系统,建设以绿色能源为主导的可持续能源格局,仍面临很大的挑战。微电网技术通过局部源、网、储、荷的优化配置和调控,实现再生能源的就地吸纳和平衡,并将再生能源改造成高品质的能源。微电网既解决了可再生能源波动性、间隙性等问题,同时减少长距离输电投资和输电损耗。

微电网技术涉及新能源变流器、储能装置、微电网控制及保护装置、其他电力电子变换器等。本书重点介绍:第一章微电网架构、原理与控制;第二章可再生能源的发电变换器;第三章变流器;第四章软磁铁氧体磁心开关电源变压器的设计;第五章各种形式硬开关变换器设计;第六章软开关变换器原理与设计;第七章LED灯驱动技术与PWM驱动芯片和单片集成电源芯片;第八章PWM基本拓扑的实用性与可拓性;第九章用无源、有源滤波器对系统功率因数校正。

张占松老师长期从事电力电子技术的研究和教育工作,积累了丰富的经验。近年来,将电力电子技术与微电网技术相结合,撰写了本书。相信该书的出版对于微电网技术的普及和推广具有积极的作用。本书可作为从事新能源变流器、微电网、电力系统自动化等的工程技术人员的参考书。本书的出版能对国内从事电气工程、新能源发电的科研人员了解微电网技术和相关电力电子系统设计有所帮助,促进我国新能源和电力电子产品技术水平的提高。

在本书即将出版之际邀我作序,略览章节,知张先生组合四方学者共同执笔,质量不负众望。

徐德鸿教授,浙江大学求是园

徐德鸿教授现任中国电源学会理事长、浙江大学工学部副主任

2015年8月6日

前言

由于石化资源日减,碳排放使地球温升,人口增加,经济总量日升,电网必须扩容、保量和保质。为此新电厂建设、新设备的投入已成必然。因此电业与民争地事端,时有发生。

基于现代技术发展,电力电子变换能使任何(如电感性、电容性)负载变成电阻性,并且还能收集光、风等形式的能源,进一步变换成市电。如果把用煤发电,说成是“有米之炊”,现代人们等于碰到个“无米能炊”的巧媳妇了。所以,可再生能源的应用有着美好的前景。使大电网与微电网相向而行,走出智能电网的路子,电力、电子人员责无旁贷。

国家现已批准分布式电源可并电网,本书在此背景下应运而生。

本书编写分工如下:第一章一~六节,第二章,第三章一~九节,第五章,第六章一~六节,第七章第五、六节,第八章,第九章为张占松编写。第一章第七节为李璟东、黄永清编写。第三章第十节为汤雨编写、第四章为何可人编写、第六章第七节为孙铁成编写、第八节为陈慕平编写。第七章一~四节为张义编写。全书由张占松任主编,也作了规划、整合和统稿工作。

1998年吾人与蔡宣三教授编有《开关电源的原理与设计》一书,发行后颇受欢迎。在十几年后,正想修改时,蔡老年高而辞世,蔡老是清华大学教授,为人清正、学识渊博,为我国电力电子发展作了很大贡献,值此表示吾等怀念之情。

考虑当今微电网技术是热词,所以本书以《微电网与电力电子技术》为名。在阅读大量书、刊和会议论文,走访一些厂、企、院、所,学习、交流之后,又串联四方专家、学者组成编写组,遂编写成本书。原约到台湾《电力电子》首席编委、清云大学资信学院院长吴英泰教授参加编写组。几年来,他一直热情参加,相商多次,还拟好了第一章纲目,后因事烦忙、力不从心,实为憾事。

本书内容新颖,深入浅出,与电工、电子、数控衔接(为适合外专业学士学历改入本专业的研究生,各行业电气工程师),有实验平台、参数、软件平台、实测数据等内容。内容布局合理,把微电网的内容放在第一~三章,磁路、硬软

开关控制内容摆在后，其他电力电子技术应用，如 LED、拓扑发展和实用性、功率因数等内容摆在后，各内容涉及的设计方法，为软件编程提供了足量、到位的数学公式来定义和分析系统。

值得指出：本书一直得到中国电源学会理事长，浙江大学徐德鸿教授的关心，并在百忙中抽时写了序言，在此深表谢忱。本书编写过程中有众多厂企提供资信和参观机会，在此表示感谢。还要感谢广东工业大学发电教研室的周永旺老师，广州大学杨汝老师阅审了不少章节内容，并提了宝贵意见。还要感谢杨钧和家人邬国璇、张文斐、张秀容、徐需婷女士等协同整理，还要感谢友人如中国国电龙源风力发电有限公司陈浩然、广东电网杨忠亮、珠海金电电源工业有限公司张腾禄、李旭辉等。其他编者亲友的帮助，在此恕不一一列出，一并表示感谢。

本书中使用的资信，大都列在书末参考文献中。对这些科技探路开发人，在此深表敬意及谢意。其中如出错或遗漏，望指出，在其再次印刷时改过。

由于编者水平所限，存在的疏漏和差错还请包容和指正。

张占松教授，南沙凤凰大道

2016.09.30

目 录

序言
前言

第一章 微电网架构、原理与控制..... 1

 第一节 概述..... 1

 第二节 微电网架构、设备与雏形..... 3

 第三节 微电网的变流器及功率..... 6

 第四节 微电网的功率流控制 16

 第五节 微电网的孤岛运行 18

 第六节 孤岛中电力品质的提高 24

 第七节 微电网电能管理与控制 27

第二章 可再生能源的发电变换器 37

 第一节 概述 37

 第二节 太阳能发电变换器 38

 第三节 波浪能发电变换器 44

 第四节 风力发电系统及能量的存储与补充 47

第三章 变流器 51

 第一节 微电网架构中的变流技术 51

 第二节 中功率三相三电平变流器典型应用电路 55

 第三节 半桥磁集成三电平功率开关典型应用拓扑 59

 第四节 无桥单级可调功率因数、可调电压的变流器 61

 第五节 用于驱动电动机的五电平 H 桥变流器 68

 第六节 微电网中蓄电池充/放电的双向功率控制..... 71

 第七节 变流器与多个储能器的并联运行 74

 第八节 微电网中的储能设备与地域相关性 78

 第九节 新型 UPS 五电平变流器..... 80

第十节 Z 源逆变器	84
第四章 软磁铁氧体磁心开关电源变压器的设计	120
第一节 软磁铁氧体磁心材料基本参量的定义	120
第二节 变压器的基本原理	125
第三节 正激、推挽和桥式拓扑开关电源变压器的设计	132
第四节 反激拓扑开关电源变压器的设计	140
第五节 连续电感电流模式功率因数校正电感器的设计	147
第六节 差模—共模复合电感器	151
第五章 各种形式硬开关变换器设计	156
第一节 双驱动变压器、推挽式变换器	156
第二节 单管反激变换器	161
第三节 双管反激变换器	169
第四节 正激变压器	171
第五节 双管正激变换器	177
第六节 半桥式变换器	179
第七节 桥式变换器	183
第六章 软开关变换器原理与设计	187
第一节 概述	187
第二节 准谐振软开关控制芯片及其应用	191
第三节 准谐振开关与脉宽调制相结合的拓扑	197
第四节 ZTS-PWM 变换器	200
第五节 带隔离变压器的 ZVT-PWM 有源钳位正激电源变换器	202
第六节 ZVT-PWM 有源钳位正激—反激变换器	206
第七节 无损耗缓冲电路 ZVS——全桥移相的变换器	207
第八节 高频 IGFET 驱动技术	216
第七章 LED 灯驱动技术与 PWM 驱动芯片和单片集成电源芯片	224
第一节 LED 灯的特性、类型与驱动要求	224
第二节 AC-DC LED 非隔离驱动技术	226
第三节 AC-DC FLYBACK LED 隔离驱动技术	234

第四节	AC-DC LED 调光驱动技术	242
第五节	PWM 控制芯片	247
第六节	单片集成开关电源芯片	254
第八章	PWM 基本拓扑的实用性与可拓性	260
第一节	BUCK 降压变换器在大、小功率上的应用	260
第二节	双 BUCK 变换器组建单相交流逆变器	263
第三节	带电容电流反馈的 BUCK 变换器	266
第四节	BOOST 变换器 M 值提高的硬开关线路及控制	270
第五节	提高 BOOST M 值的软开关线路及其控制	279
第六节	CuK 变换器纹波处理理论与方法	282
第七节	单级直流变换为五电平双半正弦波及可以增添电平数的方法	286
第九章	用无源、有源滤波器对系统功率因数校正	290
第一节	概念	290
第二节	中小型功率的无源滤波器的应用	293
第三节	有源滤波器	300
第四节	混合无源、有源的电力滤波器	322
参考文献		328

微电网架构、原理与控制

第一节 概 述

一、新能源开发和使用

由于新能源开发的重要性,各国在 20 世纪末开始新能源开发的实践研发。1990 年,瑞典在离岸几百米、水深 6m 处,装了 0.22MW 风力发电机,算是世界上第一台离岸可再生能源发电机。1991 年,丹麦在离岸 1.5km 以上海,建起有 11 台风机的 4.98MW 风电场,以年发电 11GMW 营运至今。此后以英国为首欧洲多国,探索太阳能等可再生能源,作为岛屿等处负荷的电力。接着,全世界多个国家,有计划地竞相投入大量资金,执行低碳减排,开发能源。多国试行或实现了规模不小(几十兆瓦,甚至上百兆瓦)的供电能源系统及管理案例。

我国虽起步稍晚,但经努力,现是世界最大太阳能接收使用和制造设备的国家,有些地域太阳能热电并供,普及率高达 60%。2006 年 1 月 1 日《可再生能源法》开始实施。资料显示,在辽东湾装机容量为 1500kW 风力发电装置,年发电量 4.4GMW;江苏海上龙源风力发电公司海滩内装设了三百台风机,容量约达 50MW。近年,相关局全面提出和部署了强化型智能电网计划。此计划提及在发电、输电、变电、配电、用电和调度六个领域提升技术和经济的目标。在深度、广度上要深化改革,要推行先进技术,见到成果。在上海世博会,我国太阳能示范工程项目容量规模达 10MW 之多,起到宣传普及和示范的作用。

2014 年 8 月,又公布了微电网接入配电网时“关于测试、调试、验收和运行控制等的三个试行标准”,接着各省、市出台具体方案,拟定了申报、登记、工作程序,明确了电网企业需要设置窗口以接待申报风能、光能发电的个人和单位,需要指定人员接待咨询,并提供相关技术及电网的配电系统数据和资料,以期达到推动实施目的和计划。

十多年来,我国在风电方面持续推进,并快速地取得相当规模的实用和发展。例如,计划在某市示范工程二期风光互补,风力机 40 万 kW,光伏 6 万 kW,储能装置 5 万 kW,总投资 60 亿,2014 年建成后年产值 7 亿,节省标煤 42 万 t,减排 CO₂ 计有 290 万 t。

上海生产厂企还出版了中小型风能设备与应用刊物。据中国可再生能源学会风能专业委员会 2013 年《2012 年中国风电装机容量统计》一文指出,在 2012 年度中国新增安装风电机组 7872 台,装机容量 12960MW;到 2012 年年底,安装风电机组 53764 台,装机容量 75624.2MW,成为全球第一大风电应用国家。但中国也有些地域,因具体的局部原因,限制风电发电量,甚至停机运行。

二、微电网的含义及其特征和建议

1. 微电网

微电网是由风能、光能等的发电装置，加上开关电源变流器，并由 PC 等控制器进行管理，与市电网并联后形成双电源、双向能流和能完善（多数要有蓄电池）运行、保护的小型电网。

如果定义 $\times\times$ 代表发电装置的种类（如风能、太阳能和电池等），那么由 $\times\times$ 转换成电子电流，利用后续电力电子变流器，把电子电流的电参数变换成能够符合并入市电网的电参数，在 PC 机和（或）软件平台的快速控制下，可使两种网（市电网、微电网）电能分开或联合在一起，供电给负载。

2. 微电源、电子电力电源和微电网定义

为了讨论方便，依据 CERTS (Consortium for Electric Reliability Technology Solutions) 机构来定义，利用多变的自然能作为动力来发电的装置称“微电源”(microsource)。发电装置可分为风光、光伏、海浪能、热力发电材料、生物质能、水能发电装置等。这些装置，由其输出电流，可分为直流和交流两种。如果用风光发电装置来发电，可称为风光微电源，余类推。此微电源加上固态开关 (static switch) 的可调整变流器，构成组合式电器，称为“电子电力电源”。

电子电力电源与市电网并联，并上的部分称为“微电网”。

换句话说，微电网主体是微电源和变流器组合成的电子电力电源。但是，作为物理实体，电子电力电源也适用于微电网之外的独立运行设备，如太阳能汽车动力及其他车载、卫星和军工等移动单体或联体等各种场合。可见电子电力电源与微电网相关，但并不等同。从更广的视角分析微电网（包括分类）可参阅本章的最后一节。

过去，DC/DC 称为电子变压器，Switching power supply 称为开关电源也叫电子电源，Power electronics 称为电力电子，现在把可再生能源的电子流整合起来，功率大了，应用广了，尤其在微电网上，还可供热，还将使用变流器中储能器、不停电装置，成为组合式电力小系统，故用“电子电力电源”称之，以利描述简明，适合科学、经贸大平台上使用，适合在极大的市电网内和市电网外发展时，对它的描述。

3. 微电网应具有的特征

(1) 微电网应能自治。强调自治是强调电网的苛刻要求。一切微电网中的控制参数要符合准确度要求、运行要可靠。微电网独立运行，能自我控制，自我解决输入功率、输出功率问题。

(2) 微电网与市电网相连时，即指定了在市电网某地和具体的运行方式、方法。电子电力电源可通过双向电能表和连接线，连接至配电变压器的相电压 (220V) 或线电压 (380V) 等处，甚至在需要和发展上，可连接至上一级高压变压器的输出端 (10000V) (或输入端 100000V)。电子电力电源经新型双向计量电能表与市电网的配电变压器相连接，连接点也称耦合点 (PCC)。运行方式已受主观条件（直接供电负荷范围）的限定，也受客观条件（市电网）的限定，微电网在市电网中主要起协从效能。

(3) 微电网与市电网相连，则市电网应允可供给微电网一定的有功功率。这样能使电子电力电源有效运行时间增加，使微电网的励磁功率的用电更可靠；有了有功功率的保障，可使微电网能量更多、更完全、更长时间转化成有功功率或无功功率供给自用负荷，甚至倒供电给市电网。这样，市电网和微电网相得益彰，有利于可再生能源的最佳利用，有利于市电

柔性化。微电网的此种灵活特长,正符合市电网的要求。

(4) 自我控制,即有很完善的管理小系统的能力。在软件控制、信息畅通、保护可靠方面,均应有优良性能和表现。接受市电网控制,尤其及时供给无功功率的指令,电子电力电源要及时动作。动作是用于稳定市电电压,还是稳定市电频率,均要按照预设指令完成。控制也包括微电网内部软件控制,软件可对各电子电力电源控制,对配电站内多个电子电力电源控制,甚至对上一级变电站提出要求。这种大功率变电区间内,可能有比配电网区间内的电子电力电源数量多几倍到几百倍的电子电力电源数目,进行“多站”联络控制。可见,微电网的发展基石是电子电力电源。微电网发展是多控制平台的必然,必会引发总的极大平台控制的智能电网的到来。

(5) 要顾及对电子电力电源的选用。对浪涌电压、瞬态突波尖峰、接地、短路、电容切换、励磁电流空置、非线性负载接入、三相负载不平衡,还有孤岛现象、全黑启动路径等工况,都要顾及对电子电力电源的选用,并有对应策略。在保护原则上,保护市电为先;如市电已有问题,则使用、保护电子电力电源为先。

(6) 支持向智能电网发展:

1) 微电网的电子电力电源应向大功率高电压方向发展,还应增加通用性、可叠加性、可升降压和拓流环节等单元的研发,也可结合场合,用 $\times\times$ 电力电源称之($\times\times$ 是光伏、风光、海浪、热电等称谓)。

2) 这种微电网控制软件随可再生能源发电装置不同、变流器的不同而异。这时软件也随着控制点“站”数目、分布不同而异,与并网点的高/低电压不同而不同。在建站开始时就要有一定的规划,并在建设初期确定的规划中尽量顾及长远需求,以支持智能电网的到来。

3) 微电网计量和保护需配套研发,使仪表现代化是非常迫切任务。

4) 微电网管理需及时总结,由点到面铺开,有个过程。过程就是规范,即与智能电网发展相关、相连。

第二节 微电网架构、设备与雏形

一、微电网主要设备

1. 发电装置

发电装置完成把可再生能源变换成稳定电子流的功能。

(1) 一般有光伏、风光、海浪、热材质、生物发电设备等。

(2) 配有蓄电池、不停电装置、超大型固化断路器、超导储能、气涡轮机、燃料电池、蓄水储能库等。一般结合实情挑选其中几种。过分小型实用的发电装置也可不用蓄电池,以降低造价。

(3) 必要的保护装置(如防雷、防过电压、防过电流、电磁兼容抑制等),裕量比一般要求稍大,并与今后智能电网应用蜂窝式组态相兼容。

2. 变流器完成电压种类、数值、频率、转换、控制和稳定作用的电子电力电源

变流器是复杂的多闭环调节装置,随着发电装置不同、电力容量不同、配置不同,变流器拓扑种类多,有较大的变化。但其功能是作电力的变换。如果从直流变换为交流,简称“反流器”或“逆变器”。如果从交流变换为直流,简称“整流器”。

微电网中变流器一般均是双向能流，即插即用，通用性强，可接在同类的母线系统中，更换快捷容易，控制软件兼容性强。

以上两部分，统称为微电网主体设备，即电子电力电源。

3. 微电网控制器、管理平台（PC 机加专用设计软件）

为了把它并入市电网，尚需要附加设施，可列出如下几项：

为使微电网与市电网并网主体设备，应有“微电网管理中心”。该中心的功能与微电网型控制器、微电网管理平台相比应大幅提高，才能起到两网之通信协调控制作用，并起到管理多个、多种可再生能源、多类电子电力电源的控制作用。

微电网与市电网计量、耦合控制装置，如双向计量电能表、自动开关、隔离开关、大功率高电压无触点固态开关及合适的声光显示、报警装置等结合完善，离智慧控制电网不远。

微电网如何在用电端快速提供负载所需能量，涉及提升能源使用问题。需要能源管理技术的提高并发挥作用。

二、微电网并入市电网架构

微电网并入市电网示意图，如图 1-1 所示。发电厂高电压直流、交流电能经长线输送到区域变电站后，经巨型变压器降成为 35kV 或 10kV 电压，再输出给配电网变压器，变成三相线电压 380V（单相 220V）。如果各式可再生能源经变流器，输出电流或电压（恒流 i_{ac} ，要加装电流互感器，起耦合隔离作用）；恒压 V_r ，则经联络线和开关与配电网变压器二次侧（或一次侧）端子相并联，即经隔离开关和耦合点（POI/PCC）市电网与微电网相连。POI/PCC 是测定电力潮流与电压变化的标志点或关键点，也是微电网与市电网产权的分界点。为了明确微电网发电数量，或者从市电网供给微电网及其负载的电量，必须在 POI/PCC 装上双向计量电能表。

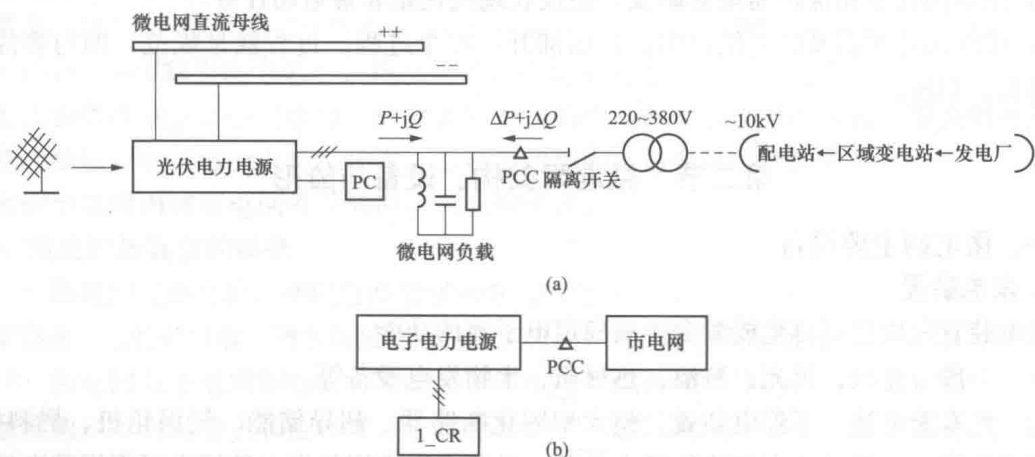


图 1-1 微电网并入市电网示意图

(a) 接线示意图；(b) 框图

三、微电网控制

现代发电装置（如风光发电装置）均使用最大功率跟踪控制方法等。该方法在外界条件变化时，以求得到输出功率的稳定、平衡和较大值，求得装置的高效率。当微电网运作时，电压—电流幅值稳定平衡、相角与市电网一致。除此之外，该方法还要考虑电力与价格关系，最大电压、电流界限设定，电力有功与无功的调节，无功减少的电压调节，有功减少的惯

性调节，频率下降有功调节，无功减少的电器辅助控制和调节器初始状态控制，孤岛运行等。

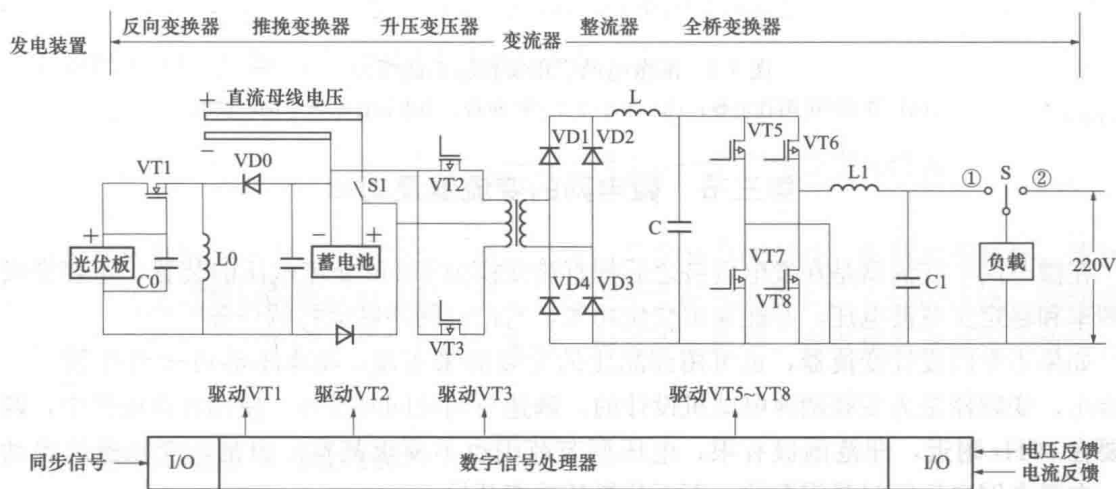
对于发电装置控制，必须强调发电均衡、瞬时值可控性能良好两个基本要求。

微电网是自治系统，在市电网故障出现后，自动与市电网解联分离，可独立续转。这就达到优化微电网用户用电的可靠度。微电网在市电网故障停电后，如果不与市电网解联，称为“非法孤岛运行”。这时会引发市电网维检人员出现安全问题。现对孤岛运行状态已有一定方法测知，也能及时处理，但对孤岛的判断存在盲区，有快速性的要求，目前仍在研发中。本章稍后介绍无功电流-频率正反馈法，理论完善^[91]。将介绍投运时，缓启动微电网的控制原理框图^[14]，并分析其工作过程。

加强数位控制，要有最具智能的电力管理软件，进行预见性潮流计算，以免并网时出现参数振荡过冲。因此，要重视和加强二次侧的测定及软件设计，要重视放大器 PID 参数值的确定和稳定。

四、家用准微电网（初级阶段）的雏形

现介绍小型家用的光伏电力电源（光伏发电装置变换器）与市电网并联，自发电 100W。据称小型家用的光伏电力电源所投入成本比独立型系统要低一些^[57]。由于是早期方案，对孤岛效应监测与防止还未有较好方法。当时用开关操作，在太阳能发电装置、市电装置两种供电方式中选一种，因此，称为准微电网应用雏形，接线如图 1-2 所示。



图中①为太阳能发电装置，②为市电网。

图 1-2 初级阶段的准微电网应用接线

由光伏发电装置和变流器组成光伏电力电源，经开关 S 供给 220V 交流负载时，负载上端经 S 联至市电网 220V，因此，负载上端也就是关键点 PCC，应接双向计量电能表（图中未示出）。

工作原理：光伏发电装置输出电压最低 16~43.8V，接至 VT1、VD0、L0 和 C0 组成的反向变换器，调节占空比能使电压升高、降低，以确保蓄电池和 VT2、VT3 组成的推挽变换器工作在额定电压。升压变压器二次绕组得到正、负方波脉冲，经开关整流二极管 VD1~VD4 全桥整流成直流电压，再经 L、C 输出滤波器，得到较平滑的直流电压，并作为 VT5~VT8 开关组成的全桥变换器工作电压。经全桥变换器后，把直流输入电压变成交流输出电压，经 L1、C1 滤波后，再经开关 S①位输送到负载。

如果开关 S 闭合在②位,则负载直接由市电网供给交流电压。此种情况下,如果开关 S1 打开蓄电池不能充电、直流母线电压也为零。

以上两种电源供电方式,选择任何一种,各自独立供电工作是非常可靠的,这时已不是微电网,也没有相互并联。

微电网工作状态是两个开关均合闸,即①②短路,受控于数字信号处理器,并在 I/O 口输入同步信号、电压反馈、电流反馈构成闭环控制,能使光伏电力电源与市电网同时供电给直流和交流负载。

如果光伏发电装置可长期稳定工作,符合电力国标 GE 和/或国际 CE、TUV、IEC 认证,则可并网运行了。这台装置带负载 200W 和带小于 100W、市电网停电微电网续供电时,实拍输出曲线如图 1-3 所示。

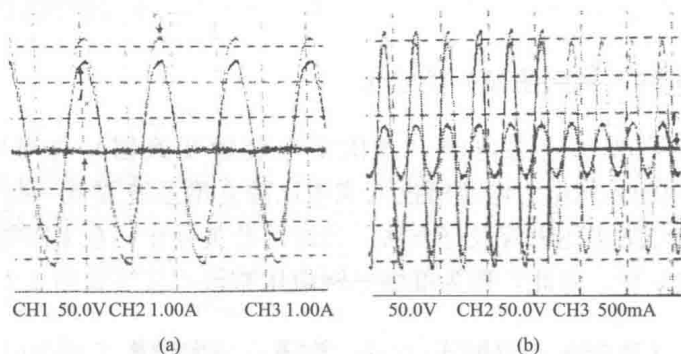


图 1-3 准微电网应用实拍输出曲线图

(a) 带 200W 阻性负载; (b) 带小于 100W 负载、市电网停电微电网续供电

第三节 微电网的变流器及功率

在微电网中变流器是在发电设备之后把直流变换为 50Hz 交流电压的装置,主要完成稳定频率和稳定正弦波电压,并能输出交流功率,与市电网并联运行的任务。

如果不专门设计变流器,也可用商品化的变频器来实现,功率不够可多台并联^[14]。值得指出,变频器是为变频调速电动机设计的,调速与调频同时进行,使用在微电网中,调频主要在 50Hz 附近,即范围极有限,电压调节范围也不要求甚宽。但是,变频器的启动功能,在微电网自运行时是需要的。下面分析从功率开始。

一、功率的表示式及测量

1. 功率的表示式

常用电路均由电阻、电感和电容等组合而成。如果是理想线性元件,在串联时,其电流同相,电压用相量图表示。由此构成阻抗、电压、功率三角形。前两个三角形是由各量的相量构成,后一个三角形不是相量,也不是正弦量,频率也不同。因此,闭环控制时不能直接功率反馈,但可短暂控制,可用电压与电流取值。进一步分析,可参见第九章。

微电网中的有功、无功和总功率控制简单和柔性。在对称三相电路中,加上三相对称电压时,其总功率 W 表示为

$$W = 3U_P I_P \cos\varphi = \sqrt{3}U_L I_L \cos\varphi \quad (1-1)$$

式中：下标 P 表示相电压、相电流；下标 L 表示线电压、线电流； $\cos\varphi$ 为功率因数。
其无功功率为

$$Q = 3U_P I_P \sin\varphi \tag{1-2}$$

2. 功率测量

测定对称三相电路功率，可用两个功率表；如果测定无功功率，可只用一个功率表，如图 1-4 所示。

一个功率表的读数为

$$\begin{aligned} W &= V_{tr} I_s \cos \angle \dot{V}_{tr}, \dot{I}_s \\ &= V_{tr} I_s \cos(90^\circ - \varphi) = \frac{V_{tr} I_s}{\sqrt{3}} \sin\varphi \end{aligned} \tag{1-3}$$

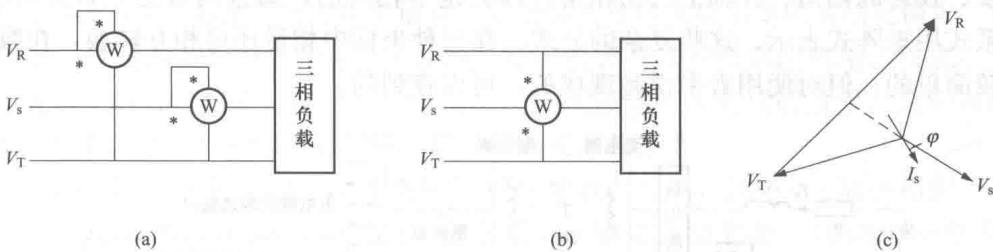


图 1-4 测功率接线及测无功的相量图
(a) 测有功；(b) 测无功；(c) 测无功的相量图

只需把式 (1-3) 乘上 $\sqrt{3}$ ，可得无功功率表示式为

$$\sqrt{3}W = Q \tag{1-4}$$

上述公式在三相不对称或不是理想元件时不成立，因此要用数字化仪表。

3. 计量电表

鉴于现在电网有不少非线性负载，电流、电压均含有高次谐波，负载也不对称。按此用仪表或互感器的感测值转换成数字量，并进行数字给定的闭环控制。设计的系统，硬件成本很高，而且实验证明，在用来控制瞬时变量时，难有满意效果，所以现在计量常用数字化仪表，例如双向电表。

二、功率的输送及相量的表示

为讲清坐标转换概念，先看同步发电机。其转子绕有励磁线圈，其定子按三相轴线铺设绕组。当转子励磁旋转后，按感应定律，定子绕组有电流输出。但定子或转子的电感、自感和互感相互影响变化是非常复杂的，要设计和得到输出电流为正弦波是非常困难的。经长期研究后，引入坐标系及其变换系数。美国工程师 Park^[101] 首先使用矩阵方法解决，在原来 ABC 三相坐标系上加上转子轴线为 d 轴，超前转子轴线 90° 的轴线为 q 轴，形成直轴和交轴旋转坐标系，如图 1-5 (b) 所示。

如图 1-5 (a) 所示，左边是传统的电力传输框图，发电厂电能用架空线路输送，必经过长线的电阻 R、集中或离散的电感 L、电容 C，因此当流过电流 I_R 时，形成了一定的电压降落，存在电压损失和功率损耗；右边是可再生能源发电，电子电力电源得到并联市网电动势 e_R 供电给微电网内的 R、L、C。电能一般输送到配电侧，这样形成双电源系统。在 PCC