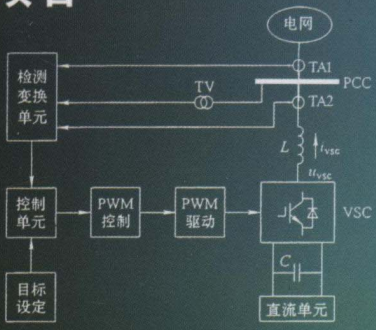
“十二五”国家重点图书出版规划项目

电力电子
新技术系列图书
New Technology Series in Power Electronics



同向前 伍文俊 任碧莹 等编著

电压源换流器在电力系统中的应用

DIANYAYUAN HUANLIUQI ZAI
DIANLI XITONGZHONG DE YINGYONG

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“十二五”国家重点图书出版规划项目
电力电子新技术系列图书

电压源换流器在电力系统中的应用

同向前　伍文俊　任碧莹　等编著

机械工业出版社

基于全控型器件的电压源换流器是现代电力电子电路的典型代表，在工业和电力系统两大领域应用广泛，本书主要阐述电压源换流器在电力系统控制中的应用。

本书讲述了电力电子技术对电力系统发展的促进作用，阐述了电压源换流器的常用电路拓扑和 PWM 控制原理，结合电路仿真，全面论述了基于电压源换流器的静止同步补偿器、柔性直流输电、有源电力滤波器和分布式电源并网换流器的电路拓扑、工作原理、数学模型、控制策略和参数设计。

本书可供从事电能质量研究、电力电子装置的设计开发与应用、电力系统的设计分析与运行的工程技术人员阅读，也可作为高等院校电气工程及其自动化专业研究生的教学参考书。

图书在版编目（CIP）数据

电压源换流器在电力系统中的应用/同向前等编著. —北京：机械工业出版社，2012
（电力电子新技术系列图书）
“十二五”国家重点图书出版规划项目
ISBN 978-7-111-37849-5

Ⅰ.①电… Ⅱ.①同… Ⅲ.①换流器-应用-电力系统 Ⅳ.①TM46②TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 054223 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）
策划编辑：罗 莉 责任编辑：江婧婧 版式设计：霍永明
责任校对：陈延翔 封面设计：马精明 责任印制：杨 曦
北京市中兴印刷有限公司印刷
2012 年 6 月第 1 版第 1 次印刷
169mm × 239mm · 17.5 印张 · 360 千字
0001— 3 000 册
标准书号：ISBN 978-7-111-37849-5
定价：49.80 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
电话服务 网络服务
社 服 务 中 心：（010）88361066 门户网：http://www.cmpbook.com
销 售 一 部：（010）68326294 教材网：http://www.cmpedu.com
销 售 二 部：（010）88379649
读者购书热线：（010）88379203 **封面无防伪标均为盗版**

电力电子新技术系列图书
编 辑 委 员 会

主　任：王兆安

副主任：白继彬　牛新国　徐德鸿　杨　耕

委　员：（按姓名拼音字母排序）

白继彬　陈伯时　陈道炼　陈　坚　陈守良
陈治明　高艳霞　郭世明　黄耀先　康　勇
李崇坚　李永东　刘进军　吕征宇　牛新国
钱照明　阮新波　孙流芳　童宗鉴　王鸿麟
王旭东　王兆安　邬伟扬　肖湘宁　徐德鸿
徐殿国　杨　耕　杨　旭　余岳辉　张　波
张承慧　张为佐　张卫平　张　兴　赵善麒
赵争鸣　钟彦儒　周　波　周雒维　查晓明

秘书组：陈守良　刘进军　孙流芳　罗　莉

电力电子新技术系列图书
序　　言

电力电子技术诞生近半个世纪以来，使电气工程、电子技术、自动化技术等领域发生了深刻的变化，同时也给人们的生活带来了巨大的影响。

目前，电力电子技术仍以迅猛的速度发展着，新的电力电子器件层出不穷，新的技术不断涌现，其应用范围也不断扩展。不论在全世界还是在我国，电力电子技术都已造就了一个很大的产业群，如果再考虑到与电力电子技术相关的上游产业和下游产业，这个产业群就更加庞大了。与之相应，在电力电子技术领域工作的工程技术和科研人员的数量也相当庞大，且与日俱增。因此，组织出版有关电力电子新技术及其应用的系列书籍，以供广大从事电力电子技术的工程师和高等学校教师和研究生在工程实践中使用和参考，成为眼下的迫切需要。

在20世纪80年代，电力电子学会曾和机械工业出版社合作，出版过一套电力电子技术丛书，那套丛书对推动电力电子技术的发展起过积极的作用。最近，电力电子学会经过认真考虑，认为有必要以“电力电子新技术系列图书”的名义出版一系列著作。为此，成立了专门的编辑委员会，负责确定书目、组稿和审稿工作，向机械工业出版社推荐，仍由机械工业出版社出版。

本系列图书有如下特色：

1. 本系列图书属专题论著性质，选题新颖，力求反映电力电子技术的新成就和新经验，以适应我国经济迅速发展的需要。

2. 理论联系实际，以应用技术为主。

3. 本系列图书组稿和评审过程严格，作者都是在电力电子技术第一线工作的专家，且有丰富的写作经验。内容力求深入浅出，条理清晰，语言通俗，文笔流畅，便于阅读学习。

本系列图书编委会中，既有一大批国内资深的电力电子专家，也有不少已崭露头角的青年学者，其组成人员在国内具有较强的代表性。

希望广大读者对本系列图书的编辑、出版和发行给予支持和帮助，并欢迎对其中的问题和错误给予批评指正。

电力电子新技术系列图书
编辑委员会

前　言

电力作为能源的一种利用形式，具有控制灵活、调节准确、输配方便、使用洁净等优点，使得以电力生产和输配为目的的电力系统成为国民经济和人民生活的命脉。保障电力供应的稳定可靠、促进电网的节能降耗、提高电网的电能质量和保持电力的可持续发展是电力系统进步的永恒课题。电力电子技术是推动这种进步的有生力量。

电力晶闸管的诞生开创了电力电子技术，同时也开启了电力电子技术在电力系统的应用，早期的同步发电机励磁、静止无功补偿技术和高压直流输电技术就是这种应用的典型代表。随着新型全控型高频电力电子器件的出现，以电压源换流器电路及其 PWM 控制技术为主流的新型电力电子技术迅速应用到电力系统的各个方面，为电力系统的全面进步提供了技术支撑。本书将根据电力电子技术在电力系统控制中的最新应用和作者的相关研究成果，重点介绍电压源换流器在配电系统中的主要应用技术。

全书共分 6 章。前两章为综述和基础部分，介绍了电力电子技术在电力系统控制中的应用概况和电压源换流器的电路拓扑、数学模型和 PWM 控制策略；后 4 章为应用部分，分别阐述了电压源换流器在静止无功补偿、柔性直流输电、电力谐波抑制和分布式电源方面的具体应用。

本书第 1、3、4、5 章由西安理工大学同向前教授编著，第 2 章由伍文俊副教授编著，第 6 章由任碧莹副教授编著，申明讲师、博士生宁大龙、孙晓云、邓亚平、张新闻等参与了本课题的研究和部分内容的撰写。全书由同向前教授协调统一。

西安理工大学钟彦儒教授始终关心本书的编写，提出了许多宝贵意见，在此深表感谢。本书的有关研究工作得到陕西省工业攻关计划（2010K09-09）、西安市科技创新支撑计划（CXY09014）、陕西省教育厅专项（09JK647，09JK666）和西安理工大学特色研究计划等基金的资助，在此一并致谢。

本书是我们对电压源换流器及其在电力系统应用研究工作的总结。由于作者水平有限，不当之处还请读者不吝指正。

作　者

目　录

电力电子新技术系列图书序言

前言

第 1 章　电力系统及其电力电子控制 …… 1

1.1　电力系统的发展 …… 1

1.2　电力系统的结构与等效分析 …… 3

1.2.1　电力系统的结构 …… 3

1.2.2　电力系统的等效分析 …… 5

1.3　电力系统的运行特性 …… 6

1.3.1　有功功率-频率静态特性…… 6

1.3.2　无功功率-电压静态特性 …… 7

1.4　电能质量 …… 8

1.4.1　电压偏差 …… 8

1.4.2　电压波动与闪变 …… 9

1.4.3　电力谐波 …… 9

1.4.4　三相不平衡 …… 10

1.5　电力系统中的电力电子控制新技术 …… 12

1.6　坐标变换与方向定义 …… 15

参考文献 …… 17

第 2 章　电压源换流器及其 PWM 控制 …… 19

2.1　电压源换流器的电路拓扑 …… 19

2.1.1　两电平电压源换流器 …… 19

2.1.2　三电平电压源换流器 …… 19

2.1.3　级联多电平电压源换流器 … 21

2.2　电压源换流器的工作原理和数学模型 …… 23

2.2.1　两电平电压源换流器的工作原理与开关函数模型 …… 23

2.2.2　三电平电压源换流器的工作原理与开关函数模型 …… 25

2.2.3　电压源换流器的基频控制模型 …… 28

2.2.4　电压源换流器的运行状态 … 30

2.3　两电平电压源换流器的 PWM 控制策略 …… 31

2.3.1　滞环比较控制 PWM 策略 …… 31

2.3.2　定频控制 PWM 策略 …… 33

2.3.3　正弦波脉宽调制（SPWM）… 34

2.3.4　空间电压矢量脉宽调制（SVPWM） …… 36

2.4　三电平电压源换流器的 PWM 控制策略 …… 42

2.4.1　传统电压矢量脉宽调制 …… 42

2.4.2　弃用中矢量的电压矢量脉宽调制 …… 48

2.4.3　虚拟合成矢量的电压矢量脉宽调制 …… 53

2.5　级联电压源换流器的 PWM 控制策略 …… 57

2.5.1　优化阶梯波宽度调制法 …… 57

2.5.2　三角载波移相 SPWM 法 …… 58

2.5.3　载波层叠 PWM 法 …… 58

2.5.4　开关频率优化 SPWM 法 …… 59

2.5.5　混合 PWM 法 …… 60

2.6　电压源换流器的优化脉宽调制（OPWM） …… 63

2.6.1　优化 SPWM …… 63

2.6.2　空间电压矢量的最小损耗脉宽调制 …… 66

2.6.3　特定谐波消去 PWM（SHEPWM）法 …… 69

参考文献 …… 71

第 3 章　基于 VSC 的静止无功补偿技术…… 74

3.1　概述 …… 74

3.1.1 无功功率的测量计算 …… 74
3.1.2 无功补偿的效益 …… 76
3.1.3 无功补偿容量的估算 …… 77
3.1.4 无功补偿装置的分类与比较 …… 78
3.2 SVG 的结构与原理 …… 81
3.2.1 低压 SVG 的主电路结构 …… 81
3.2.2 高压 SVG 的主电路结构 …… 83
3.2.3 SVG 的工作原理 …… 85
3.3 SVG 的控制方式 …… 88
3.3.1 他励单变量控制 …… 88
3.3.2 他励双变量控制 …… 89
3.3.3 自励单变量控制 …… 89
3.3.4 自励双变量控制 …… 90
3.4 SVG 的通用数学模型 …… 91
3.4.1 基于串联电抗的稳态功率模型 …… 91
3.4.2 基于损耗等效电阻的稳态功率模型 …… 91
3.4.3 稳态标幺化模型与静态运行特性 …… 92
3.4.4 基频控制模型 …… 95
3.5 SVG 的控制与仿真 …… 97
3.5.1 自励单变量控制系统与参数设计 …… 98
3.5.2 基于 SVG 电路模型的 PSIM 仿真 …… 100
3.5.3 基于传递函数模型的 MATLAB 仿真 …… 102
3.6 电源电压扰动对 SVG 的影响与对策 …… 105
3.6.1 电源电压不平衡引起的直流侧电压波动和交流侧非基波正序电流 …… 105
3.6.2 电源电压谐波引起的直流侧电压波动和交流侧谐波电流 …… 108
3.6.3 电源电压质量影响的前馈解决方案 …… 111
3.7 SVG 串联电抗器的选择 …… 114
3.7.1 按照允许谐波电流选择电抗率 …… 114
3.7.2 按照电压应力选择电抗率 …… 115
3.7.3 按照抗干扰能力选择电抗率 …… 116
3.8 SVG 直流电容器的选择 …… 116
3.8.1 PWM 控制对直流电压波动的影响及电容器的选择 …… 117
3.8.2 无功变化对直流电压波动的影响及电容器的选择 …… 117
3.8.3 电源电压质量对直流电压波动的影响及电容器的选择 …… 118
3.9 基于 SVG 的混合型动态无功补偿系统 …… 119
3.9.1 SVG + FC 结构 …… 119
3.9.2 SVG + MSC/TSC 结构 …… 119
参考文献 …… 120
第 4 章 VSC-HVDC 技术 …… 122
4.1 直流输电的特点与运行方式 …… 122
4.1.1 直流输电与交流输电的比较 …… 122
4.1.2 VSC-HVDC 的运行方式 …… 124
4.2 VSC-HVDC 的结构与原理 …… 125
4.2.1 VSC-HVDC 系统的组成结构 …… 125
4.2.2 VSC-HVDC 的特点 …… 130
4.2.3 VSC-HVDC 系统的稳态工作原理 …… 131
4.2.4 VSC-HVDC 的四象限功率运行特性 …… 134
4.2.5 VSC-HVDC 的基频控制模型 …… 136
4.3 VSC-HVDC 的控制策略 …… 140
4.3.1 VSC-HVDC 的控制系统结构体系 …… 140
4.3.2 VSC-HVDC 系统的控制目标 …… 142
4.3.3 VSC-HVDC 的幅相控制 …… 143
4.3.4 VSC-HVDC 的选择性控制 … 146

4.3.5 VSC-HVDC 的矢量控制 …… 147
4.4 VSC-HVDC 系统的暂态过程仿真 …… 152
4.4.1 VSC-HVDC 系统仿真模型与参数 …… 152
4.4.2 幅相控制方式下的仿真 …… 154
4.4.3 矢量控制方式下的仿真 …… 156
4.5 IGBT 串联阀均压技术 …… 158
4.5.1 RCD 吸收电路与门极平衡核的复合均压技术 …… 159
4.5.2 基于门极 RCD 有源控制的均压技术 …… 164
4.6 VSC-HVDC 系统的故障分析与诊断 …… 173
4.6.1 VSC-HVDC 系统的故障分类 …… 173
4.6.2 VSC-HVDC 系统的故障特征分析 …… 174
4.6.3 VSC-HVDC 故障诊断方法 …… 177
参考文献 …… 179
第 5 章 基于 VSC 的谐波抑制技术 …… 181
5.1 引言 …… 181
5.2 谐波电流的检测原理 …… 183
5.2.1 三相对称系统总谐波电流的检测 …… 184
5.2.2 三相对称系统单次谐波电流的检测 …… 186
5.2.3 单相系统单次谐波电流的检测 …… 186
5.3 并联型有源电力滤波器 …… 190
5.3.1 并联型有源电力滤波器的电路拓扑与信号采样 …… 190
5.3.2 并联型 APF 的 PWM 控制策略 …… 191
5.3.3 APF 直流电压的控制 …… 199
5.3.4 并联型有源电力滤波器的补偿策略 …… 200
5.3.5 并联型有源电力滤波器的参数设计 …… 203
5.3.6 并联型有源电力滤波器的扩容方案 …… 207
5.4 有源调谐型混合电力滤波器（ATHPF） …… 209
5.4.1 引言 …… 209
5.4.2 ATHPF 的结构与原理 …… 211
5.4.3 ATHPF 的控制与保护 …… 212
5.4.4 ATHPF 的参数优化设计 …… 216
5.4.5 ATHPF 的仿真 …… 218
5.4.6 ATHPF 的特点与应用 …… 220
参考文献 …… 221
第 6 章 基于 VSC 的分布式电源技术 …… 223
6.1 分布式电源并网换流器的技术要求 …… 224
6.2 光伏发电并网技术 …… 225
6.2.1 光伏电池原理 …… 226
6.2.2 最大功率点跟踪（MPPT）方法 …… 227
6.2.3 光伏发电并网的结构及控制 …… 231
6.3 风力发电并网技术 …… 242
6.3.1 风力发电的基本结构和原理 …… 243
6.3.2 最大风能捕获原理 …… 243
6.3.3 基于电压源换流器的并网结构及其控制 …… 244
6.4 微电网中分布式电源控制技术 …… 250
6.4.1 恒功率控制 …… 252
6.4.2 下垂控制 …… 253
6.4.3 电压频率控制 …… 256
6.5 孤岛保护 …… 258
6.5.1 孤岛检测方法 …… 258
6.5.2 基于周期交替扰动法的孤岛检测 …… 259
6.6 并网换流器的锁相同步技术 …… 263
6.6.1 锁相同步技术 …… 263
6.6.2 锁相同步性能的评价 …… 266
参考文献 …… 269

第 1 章　电力系统及其电力电子控制

1.1　电力系统的发展

电力系统是一个集电能生产、电能传输、电能分配和电能使用于一体的电力网络。电力系统的发展目标是：在适当的地方，充分利用合适的原始能源生产电能，以满足用户的需要；以合理的方式将电能传输到用电中心；向用户分配优质充足的电能。

就发电而言，生产充足的电能以满足用户的要求，经济合理地利用一次能源，积极开发可再生能源，促进社会可持续发展；就输电而言，安全可靠经济地输送电能，满足大容量长距离输电的需要，保障电压质量；就配电而言，安全经济地向电力用户分配电能，加强电力需求侧管理，保障用户供电质量（包括电能质量和供电可靠性）。

围绕着上述目标，一个多世纪以来，电力系统经历了从直流系统到交流系统再到交直流混合系统的发展过程。电力系统的发展始终是沿着以科学技术进步为前提，以追求安全、经济、高效为目的道路前进的，“大机组、大电厂、大电网、高电压”成为了电力系统追求的目标。

交流电力系统具有统一的技术模式。大型水轮机或汽轮机驱动着发电机旋转，以产生交流电，通过高压输电网和中压配电网输送电力给用户，所有用电设备接入电网中，并从电网取得电能来做功。不管电力系统的规模有多大，所有设备均以相同的频率同步运行，整个系统运行起来类似一台巨大的机器。在运行过程中，用户不受约束，独立自主地操控着用电设备，而电力系统必须相应地快速做出响应，随时调整各发电机出力，以保障电能的供需平衡和良好的供电质量。

随着电网规模的扩大，输电容量越来越大，输电距离越来越长，这就要求输电电压越来越高。我国电网电压从建国初期的 6kV，逐步提高到 10kV、35kV、110kV、330kV、500kV、750kV，目前交流输电电压已经达到 1000kV。一条 750kV 的交流输电线路可以输送数千兆瓦电力至数百公里之外。

超高压交流输电面临的压力也越来越大。电气设备的绝缘制造困难，输电线路走廊占地成本高，长距离输电系统运行稳定性和经济性受到挑战。此外，交流输电线路存在分布电感和对地分布电容，长距离输电线路上的电压升限制了诸如跨海输电这样的应用。两个不同步电网也无法通过交流输电来联网。

实际上，直流电是最先用于电力传输的电能形式，后来虽然让位于交流电，但

关于直流输电的应用研究一直没有停止过。1954 年，世界首个基于汞弧换流器的直流输电试验工程在瑞典建成投运。20 世纪 70 年代初，开创了以晶闸管换流器为基础的高压直流输电。

高压直流输电是建立在现代交流电力系统的基础之上的，它是对现代交流输电系统的补充和完善，直流输电线路的两端分别是两个独立的交流电力系统。由于高压直流输电的快速可控性，高压直流输电的发展在进一步扩大电网规模的同时，有利于提高电网的运行稳定性。

今天，电能仍然是最为舒适、方便、清洁和安全的能源。但是，电能生产所依赖的一次能源受到了严重挑战。首先，石化能源仍然是当今电力生产的主要来源，随着能源需求的增长，石化能源危机的阴影不散；其次，从环境污染的角度，燃煤发电排放的二氧化碳引起温室效应，燃油发电排放的硫化物和氮化物形成大气酸雨，核能发电的放射线安全问题和核废料处理问题尚未完全解决；第三，大电网的抗灾性问题日益突出，自然灾害使电网大面积崩溃，严重影响了人们的生产、生活和救灾进程。

1996 年 8 月，一棵树的坍倒引发了逐步扩大的停电，使美国西部的 9 个州陷入一片黑暗[1]；1996 年 12 月，系统过载使印度北部两个省 1.45 亿的人口饱受停电之苦[1]；1998 年 1 月，加拿大魁北克南部连绵降雨，折断的树枝压断了线路，随着冰雪不断积压，输电铁塔也因不堪重负而倒塌，造成圣劳伦斯河沿岸地区大面积停电[1]；2008 年 1 月，出现在我国南方地区的罕见冰雪灾害给我国电网造成了有史以来最严重的破坏，冰雪灾害致使输电线路严重受损，导致多个省级电网大面积停电，多个县市的电力供应完全中断，仅湖南电网就有 14 条 500kV、44 条 220kV 和 121 条 110kV 线路停运[2]，给数百万用户的生产和生活带来了极大的困难，国民经济损失严重。随着全球气候变暖和频发的自然灾害引发的巨大停电损失，人们在思考着如何应对。

电力系统已经开始变化。首先，表现在能源的种类和利用方式上，从偏远的大容量集中式发电向就地小规模分布式发电过渡，其前提是使用清洁能源（天然气、风力、太阳能、生物能源等）。直到 20 世纪 80 年代以前，人们普遍认为，发电站越大越好，但到了新世纪，这种观点受到质疑，以新能源为基础的小型电站越来越受到重视。其次，表现在电网的改造和建设上，利用高压直流输电技术提高输电容量和输电距离；利用柔性交流输电系统（FACTS）技术改造传统电网，提高电网输电能力和运行稳定性；利用定制电力（CP 或 DFACTS）技术，实现高效用电和高品质用电。第三，表现在电网层次结构的调整上，大用户或小区电网不再是单纯的用电设备的集合，将向以分布式电源为基础的含有发电、配电和用电环节的微电网发展。

微电网具有更强的抗灾性、更好的经济性和更高的环保性。微电网是一个开放式电力网络，通过与大电网的联网，既可保障微电网的供电可靠性，允许时还可将

剩余电力输送到大电网中去。将来的系统将是一个以水电、火电和核电为支撑的大电网和以微型燃气轮机、风力发电、太阳能发电等分布式电源构成的含源微电网并存互补的时代。

1.2 电力系统的结构与等效分析

基于电压源换流器（VSC，也称为电压源变流器）的电力电子装置并入电网之后，它与电力系统之间就存在一定的相互作用与影响。为了分析电压源换流器的性能和接口特性，往往需要对复杂的电力系统进行简化和等效处理。

1.2.1 电力系统的结构

在人类赖以生存的地球上，蕴藏着大量的能源，譬如石油、天然气、煤炭等化石能源，核能、水力、电力和太阳能等，但从能源利用和控制的角度而言，唯有电能可以达到更加广泛和深入的利用。自然界中，虽然也存在电，譬如静电、雷电等，但目前还无法加以利用。目前广泛应用的电力均来自于其他能源的转换，譬如煤电、水电、核电、风电或太阳能电厂（站）等。

（1）发电与输电系统

各种自然能源有其不同的特点，水力具有季节性，油气煤具有枯竭性，风力、太阳能具有间歇性。各种自然能源的区域分布不同，发电成本也不同。为了向用户提供可靠、持续、稳定、经济的电能，需要将各发电厂（站）生产的电能联网，联合向区域中广大用户供电。

电网电压呈现两端低、中间高的现象。发电机的输出电压多在 20kV 及以下，大多数电力用户的用电电压亦在 10kV 及以下，而要把发电厂（站）的大容量电力远距离输送到用户中心，需要使用更高的电压等级。我国电网的输电电压目前在 110kV 至 750kV。因此，在发电厂（站），发电机输出电压经过升压后并入高压电网，在用户端，电网电压再经过降压后分配给各种用电设备，如图 1-1 所示。

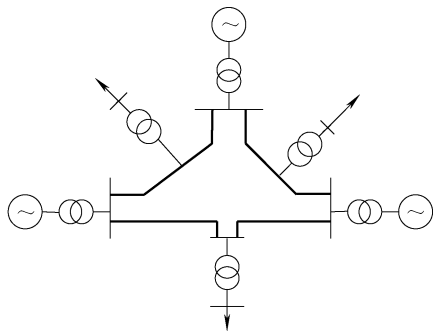


图 1-1 电力系统原理示意图

（2）配电系统

配电系统作为电网与用电设备的接口，对电网的稳定经济运行和电力用户的安全可靠供电有着重要影响。如果电网的电压质量不高，影响了用户的用电质量，则可以在配电系统中采取适当措施加以解决；如果用户的用电设备对电网有着不良的影响，则同样可以在配电系统中加以解决。

低压用电设备的额定电压多为 380V，油田和矿山设备的额定电压还有 660V 和

1140V 等。低压配电系统采用三相四线制，可供电给三相负载和单相负载。为了限制单相负载引起的三相负载不平衡程度，设计中要求单相负载尽量平衡地分配于三相线路的各相之中。尽管如此，低压系统仍然是不平衡的，存在零序分量，更为严重的是，低压系统中单相整流设备（办公自动化设备、电子仪器等）数量多，3 次谐波严重，导致中性线上出现相当大的 3 次谐波零序分量[3]。图 1-2 为某计算机房配电线路上的电压电流波形实例。当低压配电变压器采用 Yyn0 联结时，变压器对二次侧 3 次零序谐波电流呈现较高阻抗，可导致低压侧母线电压出现严重畸变。因此，在 3 次谐波较大的场合，建议采用 Dyn11 联结的配电变压器。

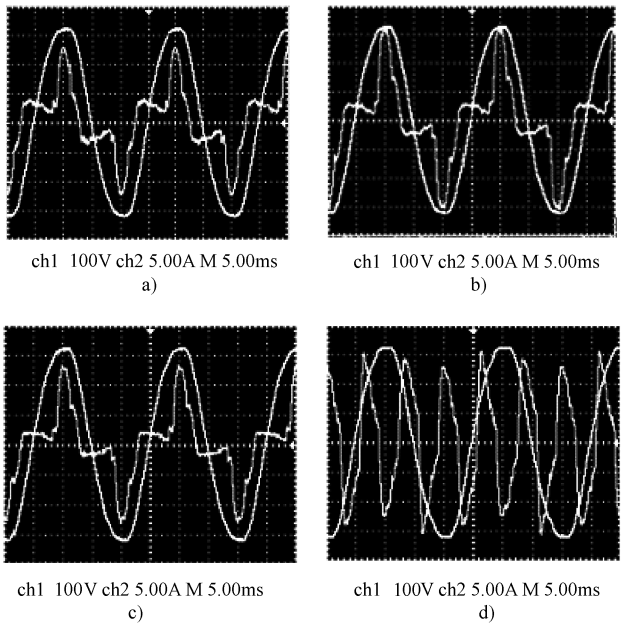


图 1-2　计算机房的电压、电流波形

a）A 相电压与电流　b）B 相电压与电流　c）C 相电压与电流　d）A 相电压与中线电流

低压配电系统的电压质量较低，三相不平衡、谐波和电压偏差等问题较为严重，低压系统并网用电压源换流器必须考虑电网电压质量对电压源换流器输出性能的影响。

（3）含有分布式电源的配电系统

分布式电源的输出功率较小，从几千瓦到几兆瓦，多数连接到配电系统中。图 1-3 为一种含有分布式

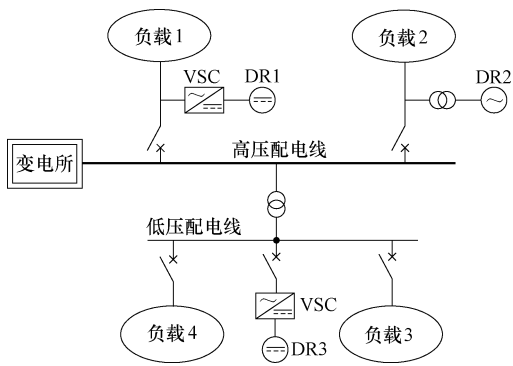


图 1-3　含有分布式电源的配电系统结构

电源（DR）的配电系统结构。分布式电源的接入会带来多方面的问题，譬如配电系统的潮流方向和分布复杂化、功率波动问题、孤岛保护问题、并网换流器的故障限流特性对常规继电保护的影响、谐波问题等。

分布式电源多利用风能、太阳能等可再生能源，而且常常通过并网换流器并网发电。与常规发电机相比，它具有如下显著特点：

1）单台发电设备容量相对较小。目前风力发电机容量多在 1 ~ 5MW，单台光伏发电设备容量更小。

2）由于可再生能源的自然随机性，发电容量具有较大的间歇波动性。

3）由于缺乏必要的储能和换流器过载能力限制，短时抗冲击能力差。常规发电机借助转子的巨大机械惯性而具有很强的抗负载冲击的能力。

1.2.2 电力系统的等效分析

电力系统是一个广阔而复杂的电气网络，基于电压源换流器的并网型电力电子装置多数情况下仅仅是这个网络中的一个部件而已，电力系统与 VSC 会相互影响。如果以 VSC 作为研究的对象，则电力系统就是这个对象的应用背景或应用场合，此时，可以采用一个简化电路来等效电力系统。

在 VSC 的研究中，常以 VSC 与电网的接口点作为分界，接口点以上为电力系统，接口点以下为 VSC 本身，此接口点称为 VSC 与电力系统的公共连接点（PCC）。PCC 的电压、电流和功率反映了 VSC 装置与电力系统的相互作用和影响。

电力系统可以等效为一个理想电压源与内阻抗的串联，如图 1-4 所示。在电力系统中，电源特性常用 PCC 额定电压 U_N 和短路容量 S_k 来表示，则 PCC 的电源内阻抗 Z_S 计算如下：

$$Z_S = \frac{U_N^2}{S_k} \tag{1-1}$$

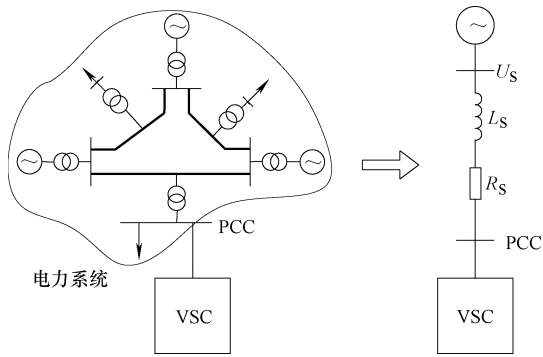


图 1-4　电力系统的等效分析

在高压电力系统中，电网等效电抗与电阻通常满足 $X_S >> R_S$，因此可忽略等效电阻，或按 $R_S = X_S/5$ 近似处理。对于低压系统，电网等效电阻相对较大，可按

$R_S = X_S/3$ 近似处理。

短路容量 S_k 定义为 PCC 短路时的电网电流与额定电压的乘积，它反映了电网的强弱。短路容量越大，电网越强，电网等效阻抗越小，PCC 电压随 VSC 功率的变化越小。实际上，VSC 对 PCC 电压质量的影响还与 VSC 的容量大小有关。

短路比是指 PCC 的电网短路容量与某电气设备容量之比，常用于衡量该设备输出功率的变化对 PCC 电压质量的影响程度。设电气设备的额定容量为 S_N，则设备短路比 SCR 定义为

$$SCR = \frac{S_k}{S_N} \tag{1-2}$$

对扰动性负载（如频繁起动的电动机、电弧炉、整流装置等）而言，短路比越小，则这些负载对 PCC 电压质量（如电压波动、电压闪变和谐波）的影响就越大。对于无功补偿装置而言，短路比越小，说明无功补偿装置对母线电压的调整力度越强。

1.3 电力系统的运行特性

在交流电力系统中，电气参数有：阻抗 Z、电压 U、电流 I、频率 f、相角 δ、有功功率 P 和无功功率 Q，但是，独立的参数只有四个，通常选取电压、电流、频率和相位角，或电压、频率、有功功率和无功功率。由于传统电力系统中发电机的旋转特性和电网的阻抗特性，有功功率与频率（P-f）、无功功率与电压（Q-U）之间具有特殊的关系。

1.3.1 有功功率-频率静态特性

电力负载的有功功率需求与系统频率有一定的关系，不同负载的有功-频率特性也不尽相同。平均而论，综合负载从电网吸收的有功功率随着系统频率的增大而升高，如图 1-5 所示。

系统频率是由发电机决定的。根据牛顿第二定律，发电机转子的运动方程可表示如下：

$$\begin{aligned} M\frac{\mathrm{d}^2\delta}{\mathrm{d}t^2} + D\frac{\mathrm{d}\delta}{\mathrm{d}t} &= P_m - P_e \\ \Delta\omega &= \frac{\mathrm{d}\delta}{\mathrm{d}t} \end{aligned} \tag{1-3}$$

式中 M——发电机转子的惯性因子；

D——阻尼系数；

P_m——来自汽轮机的机械功率；

P_e——发电机的输出电功率；

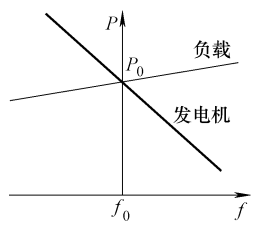


图 1-5 发电机与负载的有功功率-频率静态特性

δ——相对于同步旋转轴的转子角；

$\Delta\omega$——转子角速度 ω 相对于同步角速度 ω_s 的变化，$\Delta\omega=(\omega-\omega_s)$。

当电力系统功率平衡（$P_m=P_e$）时，$\Delta\omega=0$，发电机转速恒定，系统频率为常数。但是，当电力系统功率不平衡时，必将导致发电机转速和频率的升高或降低。因此，频率直接与发电功率和系统消耗功率的平衡特性有关，频率的变化直接灵敏地反映了有功功率的平衡性。由于电能不能够大量储存，发电功率必须与用电功率相等，为了保持功率平衡和频率稳定，发电功率必须跟随用电功率的变化。发电机就是通过稳定转速来实现电网的功率平衡的。

对于只有一台发电机的孤立系统而言，发电机可以采用无静差调速系统，不论负载发生多大变化，稳态时转速总是回到设定值 Ω_0。

对于互联系统而言，电力系统的功率平衡和频率稳定是由电网中各个发电机组的协调控制来维持的。如果不同发电机组都采用同一个设定转速，则整个系统的频率控制过程将是难以稳定的，此时，应该采用调差率控制[4]（即下垂特性，如图 1-5 所示）。当某发电机输出有功功率增大时，应允许它按照一定的调差率降频（或降速）运行。调差率 slope 定义为

$$\text{slope}=-\frac{\Delta f^*}{\Delta P^*}=-\frac{\dfrac{f_{\text{smin}}-f_{\text{smax}}}{f_0}}{\dfrac{P_{\max}-P_{\min}}{P_0}} \tag{1-4}$$

式中 f_{smin}和f_{smax}——发电机组在最小和最大负载下的频率；

$P_{\max}$和$P_{\min}$——发电机组最大和最小负载功率；

P_0——机组的额定功率（即参考功率）。

调差率的取值范围通常在 2% ~6%。采用调差率控制时，随着发电机组输出功率的增大，其输出电压的频率相应减小，这有利于电网中各个发电机组输出功率的合理调配。下垂特性也是微电网中各个分布式电源的基本控制方式之一。

1.3.2 无功功率-电压静态特性

无功功率是影响电网节点电压的主要因素。通常认为，发电机输出电压是稳定的，因此电网中各个节点的电压的变化取决于电网等效阻抗和潮流。高压电网的一个显著特点是电网等效电抗远大于等效电阻。因此，电网的压降主要与线路上的无功潮流有关。

设 PCC 以上输配电网络的等效阻抗为 $Z=R+\mathrm{j}X$，输送功率为 $S=P+\mathrm{j}Q$，则输配电网络上的电压损失为

$$\Delta U\%=\frac{PR+QX}{U_N^2}\times 100\%\approx\frac{QX}{U_N^2}\times 100\%=\frac{Q}{S_k}\times 100\% \tag{1-5}$$

式中 S_k——PCC 系统短路容量。

式（1-5）表明，电网电压的变化与线路中传送的无功功率成正比，感性无功功率导致线路末端节点电压下降，而容性无功功率（负值）导致线路末端节点电压上升。电网电压随负载无功功率的近似变化关系如图 1-6 所示。

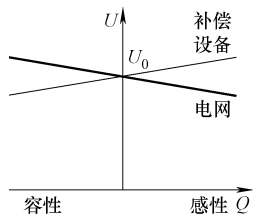


图 1-6　电网与无功功率补偿设备的电压-无功功率静态特性

式（1-5）同时表明，对电网进行无功功率补偿，可以调节电网的节点电压或稳定 PCC 的电压。这一结论是所有通过无功功率补偿来改善电网电压质量的电能质量控制设备的理论基础。无功补偿设备应该具有图 1-6 所示的电压-无功功率静态特性。

无功功率补偿具有电压调节的作用，利用变压器的分接头调整亦可直接升降电压，为了达到既维持电网电压稳定，又保持较高的功率因数，往往需要有载调压变压器与无功功率补偿装置的综合协调控制。

1.4　电能质量

电能质量是指电气设备正常运行所需要的电气特性，任何导致用电设备故障或影响用电设备良好工作的电压、电流或频率的偏差都属于电能质量问题。在三相电力系统中，理想的电能质量是：系统频率恒为额定频率；三相电压波形是三相对称的、幅值恒为额定电压的正弦波形；三相电流波形是三相对称的正弦波形；供电不间断。任何与理想电能质量的偏差都属于电能质量扰动。

电能质量问题始终存在。早期电力系统中的电能质量问题主要是电压偏差和频率偏差，但随着电力电子装置的普及应用和敏感电子设备的增多，谐波、电压波动与闪变、三相不平衡、短时供电中断等电能质量问题日益引起人们的关注。

电能质量包括电压质量、电流质量、频率质量和供电可靠性，而电压质量是电能质量的核心。由于发电机发出的电压是比较理想的，所以公用电网中的电压扰动主要是由负载电流扰动在电网阻抗上的压降引起的。譬如，大容量整流设备是电力谐波的主要发生源，交流电弧炉等波动负载是电压波动的发生源，电力机车等单相用电设备是导致三相系统不平衡的主要因素。

1.4.1　电压偏差

电压偏差是指电网电压偏离电网额定电压的程度。系统运行方式的改变，或用户负载的变化，都会使电网上某一点的实际电压偏离其额定电压。电压偏差（δU）定义为实际电压（U）与额定电压（U_N）之差对额定电压的百分数[5]，即

$$\delta U\% = \frac{U - U_N}{U_N} \times 100\% \tag{1-6}$$