



国际电气工程先进技术译丛

# 智能电网中的 电力电子技术

**Power Electronics  
in Smart Electrical Energy Networks**

R. Strzelecki  
(波兰) G. Benysek 等著  
徐 政 译



国际电气工程先进技术译丛

# 智能电网中的 电力电子技术

Power Electronics in Smart  
Electrical Energy Networks



机械工业出版社

本书主要讲述应用于智能电网的电力电子技术,包括功率理论、电力电子变流器、电能质量与电磁兼容性、高频交流配电系统、分布式发电系统接入电网、有源电能质量控制器、各种储能系统、风力发电系统接入电网以及光伏电站与燃料电池并网等。本书适合于从事可再生能源开发、电能质量调节和电力电子技术应用的技术人员和电力系统科研、规划、设计、运行的工程师,以及高等学校电气工程专业的教师和研究生阅读。

Translation from the English language edition: "Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks" by R. Strzelecki and G. Benysek; ISBN 978-1-84800-317-0.

Copyright © 2008 Springer-Verlag London Limited, as a part of Springer Science + Business Media.

All Rights Reserved.

本书中文简体字版由 Springer 授权机械工业出版社独家出版。

版权所有,侵权必究。

本书版权登记号:图字 01-2010-2469 号

## 图书在版编目(CIP)数据

智能电网中的电力电子技术/(波兰)斯切莱茨基(Strzelecki R.)等著;徐政译. —北京:机械工业出版社,2010.7

(国际电气工程先进技术译丛)

Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks

ISBN 978-7-111-31079-2

I. ①智… II. ①斯…②徐… III. ①智能控制—电力系统—电力电子学  
IV. ①TM76

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 117990 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:付承桂 责任编辑:付承桂

版式设计:霍永明 责任校对:张晓蓉

封面设计:马精明 责任印制:乔宇

三河市宏达印刷有限公司印刷

2010年8月第1版第1次印刷

169mm × 239mm · 22 印张 · 429 千字

0001 - 3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-31079-2

定价:88.00 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

读者服务部:(010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

## 作者名单

### **Grzegorz Benysek**

University of Zielona Góra  
Institute of Electrical Engineering  
Podgorna 50 Street  
65-246 Zielona Góra, Poland  
G.Benysek@iee.zu.zgora.pl

### **Piotr Biczal**

Warsaw University of Technology  
Institute of Electrical Power Engineering  
Koszykowa 75 Street  
00-662 Warszawa, Poland  
Biczalp@ee.pw.edu.pl

### **Zbigniew Hanzelka**

AGH University of Science  
and Technology  
Department of Electrical Drive  
and Industrial Equipment  
al. Mickiewicza 30  
30-059 Krakow, Poland  
Hanzel@agh.edu.pl

### **Matthias Jahn**

Fraunhofer Institut für Keramische  
Technologien und Systeme  
Winterbergstraße 28, 01277  
Dresden, Germany  
Matthias.Jahn@ikts.fraunhofer.de

### **Adam Kempski**

University of Zielona Góra  
Institute of Electrical Engineering  
Podgorna 50 Street  
65-246 Zielona Góra, Poland  
A.Kempski@iee.uz.zgora.pl

### **Włodzimierz Koczara**

Warsaw University of Technology  
Institute of Control and Industrial  
Electronics  
Koszykowa 75 Street  
00-662 Warszawa, Poland  
Koczara@isep.pw.edu.pl

### **Patrick Chi-Kwong Luk**

Cranfield University  
Defence College of Management  
and Technology  
Shrivenham Wiltshire SN6 8LA, UK  
P.C.K.Luk@cranfield.ac.uk

### **Jovica V. Milanović**

University of Manchester  
School of Electrical and Electronic  
Engineering  
B11 P.O. Box 88, Sackville Street,  
Manchester M60 1QD, UK  
Milanovic@manchester.ac.uk

#### IV 智能电网中的电力电子技术

**Andy Seng Yim Ng**

Cranfield University  
Defence College of Management  
and Technology  
Shrivenham Wiltshire SN6 8LA, UK  
S.Ng@cranfield.ac.uk

**Khaled Nigim**

Conetsoga College  
Institute of Technology and Advanced  
Learning  
Doon Campus  
Doon Valley Drive Kitchener  
Ontario, N2G 4M4, Canada  
KNigim@conestogac.on.ca

**Thomas Pfeifer**

Fraunhofer Institut für Keramische  
Technologien und Systeme  
Winterbergstraße 28, 01277  
Dresden, Germany  
Thomas.Pfeifer@ikts.fraunhofer.de

**Detlef Schulz**

Helmut Schmidt University  
Department of Electrical Engineering  
Electrical Power Engineering  
Holstenhofweg 85, 22043  
Hamburg, Germany  
Detlef.Schulz@hsu-hh.de

**Robert Smoleński**

University of Zielona Góra  
Institute of Electrical Engineering  
Podgorna 50 Street  
65-246 Zielona Gora, Poland  
R.Smolenski@iee.uz.zgora.pl

**Ryszard Strzelecki**

Gdynia Maritime University  
Department of Electrical Engineering  
81-87 Morska Street  
81-225 Gdynia, Poland  
Rstrzele@am.gdynia.pl

**Genady S. Zinoviev**

Novosibirsk State Technical University  
Department of Industrial Electronics  
20 Karla Marksa Prospect  
Novosibirsk, Russia  
Genstep@mail.ru

## 译者的话

本书主要由来自欧洲的 15 位作者共同编写而成，于 2008 年由 Springer 出版社出版，是电力电子技术在智能电网中应用的权威著作。目前国际上尚未出现同类著作。由于智能电网的核心技术之一是电力电子技术，因此本书在智能电网领域的重要性是显而易见的。

虽然关于智能电网还没有一个广泛接受的统一定义，但美国现代电网计划 (Modern Grid Initiative) 总结了智能电网的七大特征，可以帮助了解智能电网的内涵。这七大特征是：1) 使用户能够积极参与并成为电力系统的一个组成部分；2) 包容所有的发电和储能方式；3) 能提供新的产品、新的服务和新的市场；4) 为依赖于数字设备的现代经济提供高质量的电能；5) 能达到资产的优化利用和电网的高效运行；6) 对系统扰动能够预测并作出响应；7) 能抵抗攻击和自然灾害并能自行恢复。

当前，与智能电网相关的各种技术已成为国内外研究和开发的热点，希望本书的翻译对推进我国智能电网的建设、促进电力电子技术在电力系统中的应用有所帮助。

本书的翻译得到了“十一五”国家科技支撑计划重大项目“特高压输变电系统开发与示范”课题 21 的资助。翻译过程中，徐琼璁、张琪祁、管敏渊、屠卿瑞、裘鹏、韩俊、潘伟勇等同学做了大量工作，在此深表谢意。原书中一些明显的笔误或印刷错误，改正以后并未加以说明。限于译者水平，书中难免存在错误和不妥之处，恳请广大读者批评指正。译者联系方式：电话 0571-87952074，电子信箱 hnxuzheng@yahoo.com.cn。

徐政

2010 年 5 月

于浙江大学求是园

# 前 言

写作本书的原因是我们深信必须对配电系统的基本结构体系进行反思。就笔者的观点来看，需要充分发挥可再生能源、分布式发电、储能和其他因素的潜在优势，它们不仅仅要与电网相连，而且还要与电网融为一体，用于提高电网的效率、灵活性、安全性、可靠性和电能质量。将目前的电网转变成智能（故障自恢复的，交互式的，等等）电网，需要对关键性的有竞争力的引领技术进行开发、展示和推广，例如新颖连网技术、用于可再生能源的储能技术、电力电子技术、通信技术等。基于上述观点，本书的主要目标是将可能应用于未来智能电网的电力电子装置和系统的技术特点、设计方案和应用案例呈现给读者。

本书的第1章介绍了当前电网的结构和基本问题，同时提出了智能电网的概念。

第2章对功率理论进行了评价性的回顾，包括时域理论和频域理论，主要针对单相系统和三相系统中的非正弦条件。本章对功率理论进行选择讲解的基本准则是，该理论在本领域知识发展过程中的历史地位，以及该理论在解决实际问题的有用性。这些实际问题包括补偿无功功率、平衡供电负载、减轻电压和电流畸变等。本章对在时域中定义电流分量的理论给予了特别的关注，因为此理论是当前连网、有源补偿系统和有源滤波系统的基础。本章的内容对理解大多数当前使用的电能质量改善系统和连网系统的运行原理与控制算法都是必需的。

此外，第2章对电力系统的控制方法也进行了回顾，重点放在阻尼机电振荡和缓解电能质量两个问题上。选择这两个问题的背景是，由于电力工业的放松管制和非传统发电方式（可再生能源和分布式发电）的出现，加剧了电力系统的不确定性。关于上述两个问题的最优技术-经济解决方案，也作了简要论述。电能质量部分的重点放在了对扰动及其结果的概率模拟上。

第3章主要论述低功率、中功率和大功率等级的功率变换问题以及应用于智能电网中对功率进行不同方式处理的各种电力电子变流器。本章循着电力电子技术的最新发展趋势，重点放在现代电力电子变流器上，包括谐振逆变器、多电平逆变器和矩阵逆变器等。本章还对各种功率变换的类型：AC/DC、AC/AC、DC/DC和DC/AC，进行了深入的讨论。

第4章对电能质量与电磁兼容性的关系和差别进行了解释,给出了这些概念的定义,并对这两个领域标准化的原理都进行了讨论。电能质量调查是确认和解决与电能质量相关的设备和装置问题的有用程序,它是一种有组织和系统化的解决问题的途径。如果电能质量调查的所有步骤都完成了,就能明确电能质量问题的解决方案或者表明该问题与电能质量无关。

第5章概述了智能电网中与电磁兼容性相关的问题以及一些电磁兼容性法规。特别关注了传导性电磁干扰的起源及其在电力系统中的传播。由于功率变流器的多样性,使得对电磁干扰频谱的一般性分析变得困难;但是,从带有功率变流器的系统的典型应用和典型布置中可以抽取出一些共同的特征。本章给出了电力电子技术中电磁兼容性的特别关键方面,例如,功率变流器的典型作用以及它们在智能电网中的地位,功率变流器产生的电磁干扰噪声的典型频率范围,三相变流器系统中共模源的特点以及行波现象等。此外,基于笔者自己的实验结果,本章对电磁兼容性问题进行了详细的分析,笔者所采用的实验系统是智能电网中常见的带有变流器的系统。

第6章介绍了高频交流配电系统。高频交流配电系统是电力领域相对较新并有发展前途的技术。与低频或直流电力系统相比,高频交流系统具有很多重要的优势,包括由滤波器和变压器的小型化而导致的系统紧凑化,具有更好的电能质量,没有可闻噪声和机械谐振等。此外,高频交流配电系统特别适合于未来电力系统的分布式和混合式结构,并且有可能与信息高速公路合而为一。本章还描述了采用高频交流配电系统的动力以及既有系统的性能,包括最早用于美国国家航空航天局(NASA)空间站的高频系统以及给通信系统供电的高频系统,并对最新的发展进行了论述,如用于电动汽车、微电网和可再生能源等。此外,本章还对这些高频系统的很多潜在效益进行了讨论,认为高频系统在改变未来电力系统结构方面会有作用,同时也论述了需要克服的困难。

第7章论述了分布式发电设备接入传统电力系统的问题。这个问题起源于这样一个事实:大多数的配电系统其设计、保护和运行都是基于这样一个前提,任何时候每条馈线只有一个电源。分布式发电违背了这个基本假设,因此,分布式发电接入公用配电网时,为了保证安全和可靠运行,要求其满足特殊的连网规范就有关键性的作用。制造商、供应商和终端用户经常将要求分布式发电满足的连网规范看作是一个巨大的市场壁垒,而电力公司的工程师则认为这些是绝对必要的。因此,本章提供了帮助评估具体工程和设备连网的工具,并对目前正在进行的开发统一连网标准的国内外的努力进行了综述。

第9章论述已有的储能系统以及对储能系统接入电网的经济价值和战略意义进行评估的方法和工具的发展情况。此类工具应当能够评估和分析各种不同应用的储能方案,如分布式或可再生能源的接入系统,降低高峰负荷,改善输



## VIII 智能电网中的电力电子技术

电网的稳定性和可靠性等。此外，储能技术被描述为一种战略性的使能技术，它不但能够降低成本并提高电网资产的使用效率，而且是加速分布式发电和可再生能源接入电网的关键技术。

第 11 章讨论风电系统的接入电网问题。这个主题的重点放在风能转换系统的电气部分。首先简述了风电系统的基本原理，包括能量转换、功率极限和速度控制范围以及风电系统的既有发电机类型。由于风电机组的实际问题，它们的接入电网是一个有趣的领域，为此讨论了风电机组本身的特性、与电网耦合的常见类型以及所导致的风电场设计方案。在公共连接点，风电系统可能会导致电网电压产生畸变，例如闪变和谐波。本章对它们产生的原因、相互叠加的原理以及缓解方法进行了仔细的讨论。另外，从风电机组的角度，对输电系统的既有标准和要求也进行了讨论。

由于欧洲陆上风能资源有限，大容量的风电场只能安装在已选好的地点。解决这个问题一个方案是采用海上风电技术。由于海上风电场具有更好的风力条件，因而具有更大的能量输出，但对风力机的安装和运行也有很多额外的要求。因为处于盐性环境以及风电场结构具有多种可能性，发电机必须特殊设计，它具有内部固定的或自由调节的参数，如频率、电压范围和输电方式等。到陆上变电站的外部输电可以通过不同的系统结构来实现。本章对这些输电结构的优缺点进行了讨论。

第 12 章讨论光伏系统和燃料电池系统的接入电网问题。首先阐述了太阳能电池的种类及其效率以及对安装地点的要求。重点放在并网型光伏系统，主要是光伏电站的设计、取决于孤岛运行条件的与电网的接口形式，以及使用不同元器件的可能性。对于大功率单元，电能质量是一个重要问题；当大量光伏系统接入低电压等级时，会产生特殊问题。另外，根据电网中的现有装置及其问题，还探讨了未来发展的可能性。

燃料电池和光伏系统都产生直流电压，它们的并网需要电力电子变流单元。本章描述了不同种类的燃料电池和它们的典型应用。重点放在燃料电池发电厂的设计、与电网的接口以及未来的发展上。目前只有少量的燃料电池应用案例。这项技术的巨大潜力可能会导致在今后的五年内大量安装。本章列出了这项技术的既有标准，以帮助理解这些技术。

Ryszard Strzelecki 和 Grzegorz Benysek  
2008 年 1 月于波兰 Gdynia 和 Zielona Góra

# 目 录

作者名单

译者的话

前言

第 1 章 引言 .....	1
1.1 电力系统的结构和基本问题 .....	1
1.2 潮流控制、分布式发电和能量储存对电网的效益 .....	4
1.3 智能电网的概念 .....	7
参考文献 .....	8
第 2 章 电功率控制的原理 .....	10
2.1 功率理论 .....	10
2.1.1 经典功率理论的评述 .....	10
2.1.2 瞬时功率理论 .....	20
2.2 智能电力系统控制中的一般性问题和解决方案 .....	23
2.2.1 智能电力系统中的控制 .....	23
2.2.2 系统振荡的阻尼 .....	24
2.2.3 电能质量控制 .....	28
参考文献 .....	36
第 3 章 电力电子变流器及其控制概述 .....	44
3.1 电力电子技术背景知识 .....	44
3.1.1 历史回顾 .....	45
3.1.2 电力电子装置的一般性特征 .....	48
3.1.3 开关转换和变流器的连续模型 .....	50
3.2 变流器技术 .....	54
3.2.1 功率半导体开关的现状 .....	54
3.2.2 软开关和硬开关技术 .....	57
3.2.3 结构布置和冷却系统 .....	59
3.3 多电平变流器 .....	63

## X 智能电网中的电力电子技术

3.3.1 多电平变流器的概念 .....	63
3.3.2 多电平逆变器拓扑的简单比较 .....	66
3.3.3 适用于多电平 VSI 的空间矢量 PWM 算法 .....	68
3.4 阻抗源变流器 .....	72
3.4.1 电压型 Z 逆变器的运行原理 .....	74
3.4.2 三相四线阻抗源逆变器 .....	77
3.5 小结 .....	81
参考文献 .....	81
<b>第 4 章 智能电网中的电能质量问题 .....</b>	<b>89</b>
4.1 电能质量与电磁兼容性 .....	89
4.2 电能质量问题 .....	91
4.2.1 供电电压的幅值 .....	92
4.2.2 电压波动 .....	93
4.2.3 电压暂降与暂时断电 .....	95
4.2.4 电压和电流畸变 .....	96
4.2.5 电磁骚扰的分类 .....	98
4.3 电能质量监视 .....	99
4.3.1 测量步骤 .....	99
4.3.2 测量所用的时间长度合成方法 .....	99
4.3.3 标记的概念 .....	100
4.3.4 评估步骤 .....	100
4.4 法律条例与行业条例 .....	102
4.5 缓解方法 .....	102
4.6 智能电网中与电磁兼容相关的现象 .....	104
4.6.1 电磁骚扰的起源和影响及电磁兼容性术语 .....	104
4.6.2 电磁兼容性的标准化 .....	109
4.6.3 散布在分布式电力系统中的传导性电磁干扰 .....	113
4.6.4 改善分布式电力系统中的电磁兼容性 .....	116
参考文献 .....	121
<b>第 5 章 分布式电力系统中的电磁兼容性案例 .....</b>	<b>123</b>
5.1 四象限变频器 .....	123
5.2 变速传动系统 .....	132
5.3 多电平逆变器 .....	136
参考文献 .....	145

<b>第 6 章 高频交流配电平台</b> .....	146
6.1 引言 .....	146
6.2 高频在空间系统中的应用 .....	146
6.3 高频在通信系统中的应用 .....	151
6.4 高频在计算机和商用电子系统中的应用 .....	156
6.5 高频应用于汽车和电动机驱动 .....	159
6.5.1 汽车 .....	159
6.5.2 电动机驱动 .....	162
6.6 高频在微电网中的应用 .....	165
6.7 前景展望 .....	166
6.7.1 未来的动力和资金问题 .....	166
6.7.2 未来的趋势和挑战 .....	167
致谢 .....	168
参考文献 .....	168
<b>第 7 章 分布式发电接入电力系统</b> .....	170
7.1 分布式发电的过去与未来 .....	170
7.1.1 分布式发电能量转换系统 .....	171
7.1.2 分布式发电的机会 .....	171
7.1.3 分布式发电的分类、布局 and 规模 .....	172
7.2 与当地电网的互连——并联运行 .....	173
7.2.1 使用化石燃料的 DG 的接入问题 .....	173
7.2.2 使用非化石燃料的 DG 的接入问题 .....	174
7.2.3 使用化石与非化石混合燃料的 DG 的接入问题 .....	175
7.3 接入和连网所关注的问题 .....	177
7.4 功率注入原理 .....	179
7.5 采用静止补偿器的功率注入 .....	181
7.5.1 固定无功补偿 .....	181
7.5.2 可控动态无功补偿 .....	181
7.6 采用先进静止装置的功率注入 .....	184
7.6.1 静止同步补偿器 .....	184
7.6.2 统一潮流控制器 .....	185
7.7 DG 对电能质量问题的作用 .....	186
7.8 当前 DG 的挑战 .....	187
参考文献 .....	189

<b>第 8 章 有源电能质量控制器</b> .....	192
8.1 动态静止同步补偿器 .....	192
8.1.1 拓扑结构 .....	192
8.1.2 运行原理 .....	194
8.1.3 负载补偿 .....	195
8.1.4 电压调节 .....	199
8.2 基于 D-STATCOM 的其他并联补偿装置 .....	200
8.2.1 混合布置 .....	200
8.2.2 带有能量储存系统的补偿装置 .....	202
8.3 动态静止同步串联补偿器 .....	204
8.3.1 供电电压中独立分量的辨识问题 .....	205
8.3.2 三相三线制系统中电压的滤波和平衡 .....	207
8.4 动态电压恢复器 .....	209
8.4.1 什么是 DVR .....	209
8.4.2 DVR 装置的控制策略 .....	210
8.5 AC/AC 电压调节器 .....	216
8.5.1 机电型电压调节器 .....	217
8.5.2 阶梯型电压调节器 .....	218
8.5.3 连续型电压调节器 .....	220
参考文献 .....	221
<b>第 9 章 能量储存系统</b> .....	226
9.1 引言 .....	226
9.2 电能储存装置的结构 .....	228
9.3 抽水蓄能 .....	229
9.4 压缩空气储能 .....	233
9.5 飞轮储能 .....	237
9.6 蓄电池储能 .....	239
9.7 氢气储能 .....	243
9.8 超导磁体储能 .....	247
9.9 超级电容器储能 .....	248
9.10 储能装置的应用 .....	250
参考文献 .....	252
<b>第 10 章 可变速与可调速发电系统</b> .....	254
10.1 引言 .....	254

10.1.1	传统发电系统 .....	254
10.1.2	变速和可调速解耦发电系统 .....	256
10.2	发电系统的电气部分 .....	260
10.2.1	引言 .....	260
10.2.2	由永磁发机构成的自治发电系统 .....	260
10.2.3	采用永磁发电机的非自治发电系统 .....	263
10.2.4	混合式发电系统 .....	265
10.2.5	电力电子发电系统中的发电机启动 .....	266
10.3	原动机和控制系统 .....	267
10.3.1	原动机 .....	267
10.3.2	转速控制策略 .....	269
	参考文献 .....	270
<b>第 11 章</b>	<b>风力发电系统接入电网 .....</b>	<b>271</b>
11.1	引言 .....	271
11.2	系统概述 .....	271
11.3	风电机组 .....	274
11.3.1	能量转换 .....	274
11.3.2	叶尖速度比和功率曲线 .....	274
11.3.3	运行模式 .....	276
11.3.4	功率限制 .....	277
11.3.5	转速控制 .....	279
11.3.6	风电机组的功率曲线 .....	280
11.4	接入系统 .....	281
11.4.1	发电机类型 .....	281
11.4.2	与电网耦合的常见类型 .....	285
11.4.3	风电场设计和能量管理 .....	286
11.4.4	风电场中的无功功率管理 .....	287
11.5	风电机组的电能质量 .....	293
11.5.1	功率波动和闪变 .....	293
11.5.2	谐波 .....	298
11.6	海上风电 .....	306
11.6.1	装机数量及情况 .....	306
11.6.2	风电场设计 .....	306
11.6.3	输电类型 .....	307
11.7	未来的要求和发展 .....	308
11.7.1	风电机组类型 .....	308
11.7.2	能量管理、储存和通信 .....	309

11.8 经济与电价补贴 .....	309
参考文献 .....	310
<b>第 12 章 光伏电站和燃料电池系统接入电网 .....</b>	<b>313</b>
12.1 引言 .....	313
12.2 光伏电站 .....	313
12.2.1 系统概述 .....	313
12.2.2 能量转换 .....	314
12.2.3 太阳电池类型 .....	314
12.2.4 太阳电池的模拟方法 .....	315
12.2.5 光伏组件的模拟 .....	317
12.2.6 运行特性 .....	317
12.2.7 逆变器类型 .....	318
12.2.8 电站设计 .....	319
12.2.9 电网接口与孤岛检测 .....	320
12.2.10 电能质量 .....	323
12.2.11 未来的发展 .....	326
12.2.12 经济性 .....	326
12.3 燃料电池电站 .....	327
12.3.1 燃料电池的种类 .....	327
12.3.2 能量转换 .....	329
12.3.3 并网应用 .....	330
12.3.4 发电厂设计 .....	333
12.3.5 并网问题 .....	334
12.3.6 经济性 .....	335
12.3.7 发展方向 .....	336
参考文献 .....	337

# 第 1 章 引 言

## 本章作者:

Ryszard Strzelecki: Department of Electrical Engineering, Gdynia Maritime University, 81-87 Morska Street, 81-225 Gdynia, Poland. Email: Rstrzele@am.gdynia.pl

Grzegorz Benysek: Institute of Electrical Engineering, University of Zielona Góra, 50 Podgórna Street, 65-246 Zielona Góra, Poland. Email: G.Benysek@iee.uz.zgora.pl

## 1.1 电力系统的结构和基本问题

今天的电网主要是由大型发电厂、输电线路和配电系统组成的，输电线路连接大型发电厂并为配电系统供电。因此，电网的总体结构仍然与过去相同，即潮流是单向的，由发电厂通过输电线路和配电系统到达终端用户。

图 1-1 展示了当今电力系统的单线图及其主要部分，包括发电、输电和配电。由发电厂内的同步发电机发出的电力占到总量的主导部分，而大部分的同步发电机是由汽轮机或水轮机驱动的。因此，由这种发电厂发出的电力，通常必须通过输电系统输送很远的距离才能到达配电系统。配电网把来自输电网或当地小型分布式电源 (DR) 的电配送给用户。

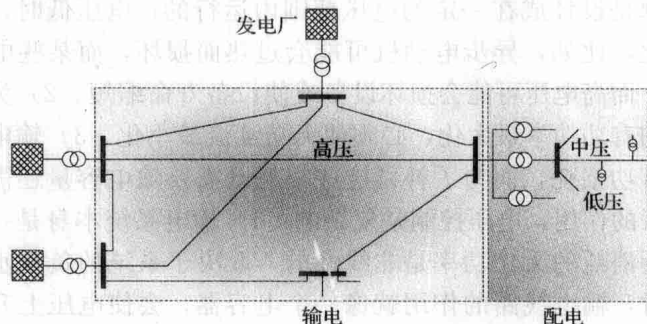


图 1-1 一个电力系统的简化单线图

上面提到的三个部分——发电、输电和配电，都会对供电的质量产生影响，但各部分的影响是不同的。这涉及很多因素，例如电力设备的维护状况，所运



行系统的稳定特性，故障状况，畸变状况以及负载的非线性等。

人们必须了解，一个部分内的故障可能会对整个系统性能产生影响。例如，发电部分的一个故障有可能引起输电部分的故障，从而导致配电部分断开负载；而输电部分的一个故障有可能引起发电部分的故障，从而也导致配电部分断开负载。然而，配电部分的故障却很少会引起其他两个部分的故障，并且所失去的负载是最少的，且是本地的。上述这些问题中，有些与输电系统相关，有些与配电系统相关，但从电能质量的观点来看，都是根本性的。

### 输电系统

正像以前已经注意到的那样，输电系统正运行在更加接近其稳定极限和热极限的水平上，如果输电设施不进行妥善的更新换代，面对静态稳定和暂态稳定问题，电力系统将变得十分脆弱<sup>[1,2]</sup>。在这样的环境下，输电能力就成为一种重要性能。因此，在过去的几年中，对输电系统中的潮流控制技术、分布式发电技术以及储能技术的兴趣大增。其原因有如下几个：1) 系统失去稳定，2) 潮流形成环流，3) 输电损耗大，4) 电压越限，5) 缺少将输电线路的输送能力提高到热极限的手段。

对输电系统的限制可以呈现出多种形式，可以包含以下的一个或多个因素<sup>[3-6]</sup>：

- (1) 电压幅值；
- (2) 热稳定极限；
- (3) 暂态稳定；
- (4) 动态稳定。

### 电压幅值

在交流电力系统中，电压是通过改变无功功率的发出和吸收来控制的。那么，为什么要对电压进行控制呢？主要有如下几个原因：1) 不管是用户设备还是电网设备，都是设计成在一定的电压范围内运行的；电压低时，很多种类的设备性能会劣化，比如，异步电动机可能会过热而损坏，而某些电子设备可能根本就不运行；而高电压可能会损坏设备或使设备寿命缩短。2) 为了使输电系统上能够输送的有功功率最大化，必须使无功潮流最小化。3) 输电系统中的无功潮流会引起有功损耗，而为了补偿这些损耗既需要输电容量还需要能量。由于另外两个因素的作用，电压控制是复杂的：1) 输电系统本身是一个无功功率的消耗者，且所消耗的无功功率是非线性的，取决于系统的负载水平。在系统负载水平很低时，输电线路的作用就像一个电容器，会使电压上升；而在高负载水平下，输电线路吸收无功功率从而使电压降低。2) 系统的无功功率需求同时还取决于发电部分和输电部分的结构。因此，系统的无功功率需求是随时间、随负载水平以及负载和发电模式的变化而改变的。

电力系统运行人员用以控制电压的装置有数种，例如，向电力系统注入无功