

柔性电力技术

— 电力电子在电力系统中的应用

Flexible Electric Power Technology

The Application of Power Electronics
in Power System

韩民晓 尹忠东 徐永海 文俊 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

TM7/48

2007

柔性电力技术

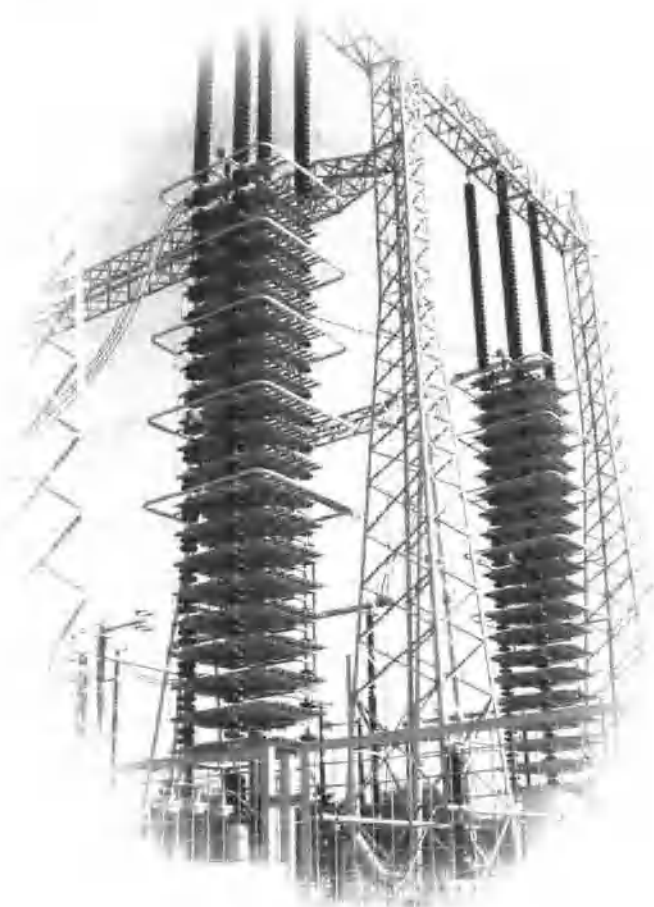
— 电力电子在电力系统中的应用

Flexible Electric Power Technology

The Application of Power Electronics

in Power System

韩民晓 尹忠东 徐永海 文俊 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书系统介绍了电力电子技术在电力系统各个环节中应用的柔性电力技术。在发电领域,主要介绍了基于晶闸管调节的励磁系统、分布式电源的利用和并网的电力电子变换与调节装置、可变速抽水蓄能机组等;在输电领域,主要介绍直流输电技术、基于电力电子技术的并联及串联交流输电控制技术;在配电环节,介绍了电力电子技术在电能质量调节与控制中的应用;在用电领域,则在介绍常见电能利用电力电子变换设备的基础上,重点分析了电力负荷电力电子化趋势对电力系统稳定和电能质量方面所产生的影响。

本书编写的目的在于推进柔性电力技术理论与应用的相关知识在电力工程技术人员、管理人员及电力工程专业学生中的普及。

本书可作为开展电力电子技术在电力系统中的应用等相关领域的电力工程技术人员、管理人员以及电力工程专业学生学习、研究及工程应用的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

柔性电力技术:电力电子在电力系统中的应用 / 韩民晓等编著. — 北京:中国水利水电出版社, 2007

ISBN 978-7-5084-4842-8

I. 柔… II. 韩… III. 电力电子学—应用—电力系统
IV. TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 106882 号

书 名	柔性电力技术——电力电子在电力系统中的应用
作 者	韩民晓 尹忠东 徐永海 文俊 编著
出版 发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202613 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	787mm×1092mm 16开本 18印张 427千字
版 次	2007年10月第1版 2007年10月第1次印刷
印 数	0001—4000册
定 价	39.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

随着电能利用形态和规模的发展与进步，现代社会对电力系统安全稳定与供电质量的要求日益提高。而电力体制改革的推进、资源开发形态的制约、负荷特性的转变等对电力系统的安全稳定与供电质量的提高构成新的挑战。电力系统越来越需要能够对其数量和质量可以灵活控制的电力技术。以现代电力电子技术为核心的电能变换与控制技术在电力系统中的应用——柔性电力技术，使这一目标成为可能。柔性电力技术已开始应用于发电、输电、配电与用电的各个环节并得到快速发展：分布式电源通常要通过基于电力电子装置的变换与调节才能得以联网和利用，可变速抽水蓄能机组、基于晶闸管调节的励磁系统等都是电力电子技术在发电环节的应用；直流输电成为电力电子技术在输电领域应用的典型示例。近年来，基于电力电子技术的交流输电控制得到迅速发展；在配电环节，电力电子技术广泛用于电能质量的调节与控制；用电领域则是电力电子技术应用最为经典和最为普遍领域。近年来，电力负荷电力电子化趋势对电力系统无论是稳定还是电能质量方面都产生重要的影响。总之，电力电子在电力系统中的应用，即柔性电力技术正在电力的安全、稳定、高效、灵活的控制中发挥着重要作用。

柔性电力技术涉及器件、电路、设备、控制方法等各个层次，遍及发电、输电、配电、用电各个环节，内容庞杂、资料分散，有一本系统介绍这一技术的书籍成为许多电力工程人员和电力专业的学生的需求。2001年，由赵贺教授编著的《电力电子学在电力系统中的应用》成为我国在该领域的先河之作。该书基于当时电力电子技术发展水平对电力电子技术在电力系统中应用的基本状况进行了阐述。其后，我国学者姜齐荣、谢小荣、陈建业等出版了《电力系统并联补偿—结构、原理、控制与应用》、徐政翻译的 R. Mohan Mathur 和 Rajiv K. Varma 合著的《基于晶闸管的柔性交流输电控制装置》等深入地论述了所探讨问题的原理与应用。在欧美，N. G. Hingorani, L. Gyugyi, “Understanding FACTS: Concepts Technology of Flexible AC Transmission Systems” (New York IEEE Press, 2000)、Y. H. Song 等人的 “Flexible AC Transmission System” (PJ International Ltd. Padston, Cornwall 1999)、

E. Acha V. G. Agelidis 等人的“Power Electronic Control in Power System” (MPG Books Ltd, Bodmin, Cornwall, 2002)、Vijay K. Sood 的“HVDC and FACTS Controllers: Application of Static Converters in Power Systems” (Kluwer Academic Publishers 2004) 成为电力电子在电力系统中的代表性著作。在日本有关电力电子在电力系统中的应用主要通过技术报告的形式发布, 如电气学会技术报告第 874 号: 静止无功补偿的现状与动向; 第 919 号: 全控电力电子器件在电力系统中的应用等。

我国电力工业正处于快速发展的时期, 特高压交流骨干网架的建设、特高压直流输电的广泛实施、已有输电通道的输送能力的提升、电能质量与电能利用效率的提高、分布式电源技术的积极推进等为电力电子技术在电力系统中的应用开辟了广阔的领域。然而, 这一技术领域相关内容较为新颖且具有自身的特点, 与传统的电力系统控制有较大差别, 许多电力工程人员和电力专业的学生对此还缺乏系统地了解。上述教材或专著虽然从不同环节或不同侧面进行了介绍, 但还缺少一本系统介绍和探讨电能流程各个环节的柔性电力技术。正是为了推进这一技术的理论与应用在电力工程人员、电力工程专业学生中的普及, 华北电力大学柔性电力技术研究所多名多年参加相关内容教学和科研的教师通力合作, 编写了此书。愿此书能为推进电力电子技术在现代电力系统中的应用, 为构筑信息化社会高稳定性、高质量、高灵活性、高效率的电力系统发挥一定的作用。

柔性电力技术从本质上讲, 是通过电力变换方式对电能的数量和质量进行调节和控制的技术, 本书围绕这一主题, 从发电、输电、配电到用电这 4 个电能流通的环节, 讲述柔性电力技术的作用, 分析传统控制技术的局限性, 给出柔性电力技术的原理, 工程实例及其应用和发表前景。本书力求:

(1) 全面性。系统介绍柔性电力技术的各种应用领域, 各种典型的电路拓扑与控制技术。

(2) 新颖性。给出相关技术的最新发展, 包括器件、电路及控制算法和手段的展新进展。

(3) 工程性。结合工程应用进行分析, 从实际电网需求的角度阐明柔性电力技术在所讨论的问题中是如何实现对电能的数量和质量的控制的。

本书的读者对象及其用途主要包括:

(1) 电气工程相关专业本科生作为学习电力电子技术应用课程的教材或参考书。

(2) 电力相关专业研究生学习柔性输配电技术的教材或参考书。

(3) 电力工程相关专业的工程技术人员技术参考书。

本书共分8章。其中第1章为概述，给出柔性电力技术的定义，作用，组成；柔性电力技术所基于的电力电子技术、储能技术、信息处理与控制技术的现状与发展；第2章简述了电能形态变换的各种方式：AC/DC，DC/DC，DC/AC，AC/AC变换器的电能变换特性分析及控制策略；第3章为电力电子技术在发电环节的应用，包括励磁技术的新进展，可变速抽水蓄能技术，双馈电机风力发电技术，太阳能发电等分布式电源的并网技术及火电厂辅机的变频控制；第4章介绍直流输电技术，包括直流输电的基本原理与结构，换流器的特性与发展、轻型直流输电及特高压直流输电；第5章主要论述输电系统柔性并联补偿技术，包括基本原理与结构，静态和动态调节特性及其对交流系统稳定运行的控制作用；第6章为输电系统柔性串联补偿技术，主要从基本原理与结构、如何实现功率和电压的调节的角度介绍串联补偿在电能传输中的作用，说明串联补偿对交流系统稳定、经济运行的作用；第7章讨论电力电子技术在电能质量控制中的应用，依据用户需求、负荷特征可灵活提供多种电能质量的定制电力的构成，提高供电质量的控制方法，供电方电能质量控制及用电方电能质量控制措施；本书最后一章分析了电能应用领域的柔性化技术对电力系统的影响，重点讨论了电气照明、电热、电机驱动等负载采用电力电子技术后特性的变化，从电力系统角度描述所关心的电磁特性（主要是谐波问题）和机电特性（有功、无功与电压频率的关系问题）的变化及其对电力系统的影响。

本书由韩民晓担任主编并负责第1章、第3章、第7章、第8章的编写工作，尹忠东负责第5章、第6章的编写，徐永海负责第2章的编写，文俊负责第4章的编写。华北电力大学柔性电力技术研究所多位老师在本书的编写过程中给予指正和帮助，前后三届硕士研究生帮助完成书稿输入和图展绘制，在此表示诚挚的感谢。

中国电力科学研究院赵贺教授对该书的编写思路和编写大纲提出了许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

电力电子技术在电力系统中的应用还是相对较为新颖的技术。许多定义、名称尚表统一。如术语“柔性”有时又称为“灵活”，“定制电力”有时表用“用户电力”，“轻型直流输电”又称为“柔性直流输电”。作者出于以往的习惯采用了前一种说法，本质含义是一致的。柔性电力技术还具有涉及面广，发展迅速的特点。作者在组稿的过程中更深刻地体会到选题庞大，很多问题无法深入探讨，很多技术很难立即跟进。作者的目的是提供该领域的基本素

材，以期为该领域关注的技术人员、师生提供参考。

由于作者水平的限制，书中存在的错误和不妥之处，敬请广大读者加以批评指正。

编著者

2007年5月

目 录

前言

第 1 章 电力系统的柔性化技术	1
1.1 传统电力系统的构成与特点	1
1.2 电力系统柔性化的必要性	5
1.3 柔性电力技术的概念、分类和应用示例	6
1.4 电力电子器件的基本特性与发展	9
1.5 储能技术的现状与发展.....	15
1.6 信息处理与控制技术的发展与应用.....	24
参考文献	27
第 2 章 电力变换电路与控制	29
2.1 交流—直流变换电路.....	29
2.2 直流—直流变换电路.....	40
2.3 直流—交流变换电路.....	49
2.4 交流—交流变换电路.....	61
参考文献	73
第 3 章 发电领域的电力电子技术	74
3.1 整流励磁在现代同步发电机中的应用.....	74
3.2 风力发电中的电力电子技术.....	79
3.3 可变速抽水蓄能发电技术.....	87
3.4 太阳能发电中的电力电子技术.....	97
3.5 发电领域其他相关的电力电子技术.....	99
参考文献.....	103
第 4 章 直流输电技术	104
4.1 概述	104
4.2 整流器工作原理	106
4.3 逆变器工作原理	123
4.4 直流输电换流技术新发展	128
参考文献.....	143
第 5 章 输电系统柔性并联补偿	144

5.1	概述	144
5.2	阻抗控制型并联补偿	148
5.3	电流控制型并联补偿	159
5.4	能量控制型并联补偿	167
	参考文献	179
第 6 章	输电系统柔性串联及混合补偿	180
6.1	概述	180
6.2	阻抗控制型串联补偿	181
6.3	电压控制型串联补偿	194
6.4	串并联混合补偿	203
	参考文献	204
第 7 章	电力电子技术与电能质量控制	206
7.1	概述	206
7.2	电力谐波抑制技术	208
7.3	电压波动与闪变的抑制技术	222
7.4	电压暂降与短时中断抑制技术	228
7.5	电能质量控制方案的选择与电力工业园区	240
	参考文献	242
第 8 章	柔性化用电与负荷特性	244
8.1	概述	244
8.2	典型电力负荷的柔性化	246
8.3	电力电子类负荷电磁特性分析	260
8.4	电力电子类负荷机电特性分析	272
	参考文献	277

第 1 章 电力系统的柔性化技术

1.1 传统电力系统的构成与特点

电力系统是为电能的生产、输送、分配与应用而构建成的人工系统。传统电力系统的构成主要包括：发电机、变压器、传输线、电缆、电容器组、直接实现电能转接的用电设备及保护与控制设备。这些设备通过适当的方式进行连接，组成有机整体，确保电力系统在任何时刻都能够产生数量充足的电能，满足系统负荷的要求。系统运行的目标在于以最小的运行成本、最大的运行可靠性、最高的电能变换效率，实现电能的生产、传输与应用。

电力系统依据电能的流程可划分为四个组成部分：发电、输电、配电和用电。发电部分实现各种一次能源到电能的转换，传统发电方式多通过储备（水坝的形成，煤的储存）实现一次能源转换过程中的稳定性。传统电力系统中的发电机组以严格同步方式连接到一起，通过功角与出口电压的调节实现输出有功与无功的调整。由于受自然条件和环境因素的限制，这些发电厂通常远离负荷中心，因而采用高电压等级输电成为电力系统输电的主要形式。我国目前采用的交流输电电压等级有 110kV、220kV、330kV、500kV 等电压等级。目前正在发展的 750kV、1000kV 将成为跨地区联网的主网架电压。在负荷中心，则必须通过多级降压，将电能分配到工业、商业、市政和居民等电力用户。国内配电系统使用的电压等级多为 35kV、10kV、6kV、3kV 等。到达用户的电力，除部分可为中压用电设备直接利用外，通常还需进一步降压，如 380V 三相/220V 单相，以满足电能转换为机械能、热能、光能等设备的需求。图 1.1 所示为传统电力系统的典型构成。

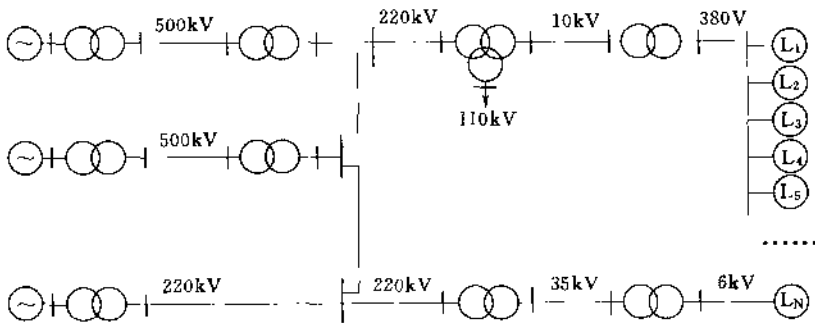


图 1.1 传统电力系统的构成示例

为深入讨论传统电力系统中功率的控制方式及其局限性和引进柔性电力技术的必要性，这里对传统电力系统中主要设备的功率控制特性给予简单的描述。

1.1.1 同步发电机的基本特性

电力系统电能的产生主要靠同步发电机实现。同步发电机有两个重要组成部分：磁场和电枢。磁场绕组通以直流电而产生一个磁场，该磁场的旋转变化的在电枢绕组中感应出交流电动势。同步发电机依据转子磁极的结构分为隐极机和凸极机。高速旋转的汽轮发电机组的转子通常为隐极式，其上装有直流方式的励磁绕组；而转速较低的水轮发电机组的转子则采用凸极式，其上除装设直流励磁绕组外，还装有阻尼绕组。

当发电机转子由原动机（汽轮机，水轮机等）拖动时，励磁绕组的旋转将在定子的三相电枢绕组上感应出交流电压。交流电压及定子绕组接负荷后产生的定子绕组电流的频率取决于转子的转速。因而电机的定子电气量的频率与转子的机械转速同步。

当两台或多台同步发电机互联运行时，所有电机的定子电压，电流必须具有相同的频率，每台发电机转子的机械转速必须与此频率同步。因此，所有互联运行同步发电机的转子必须同步。

定子电枢绕组的空间分布，使流过三相绕组的交变电流在稳态运行方式下，产生旋转磁场，该磁场与转子同步。定子和转子磁场相互作用，产生电磁转矩。在发电机情况下，电磁转矩与转子的旋转方向相反，因此必须由原动机提供机械转矩才能维持旋转。发电机电磁转矩（电功率）输出的变化只有通过改变原动机提供的机械转矩来实现。增加机械转

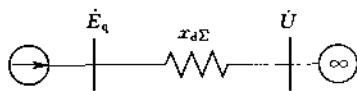


图 1.2 单机无穷大系统

矩的输入，将使转子相对于定子旋转磁场的位置超前。

相反，减少输入机械转矩或功率，将使转子位置滞后。在稳态运行条件下，转子磁场和定子旋转磁场具有相同的转速。但依据发电机输出功率的不同，它们之间存在一个角度差。

以图 1.2 所示的简单系统为例，说明同步发电机的功角关系。当发电机为隐极机时，以空载电动势和同步电抗表示的功角关系为

$$P_{E_q} = \frac{E_q U}{x_{d\Sigma}} \sin\delta \quad (1.1)$$

式中： E_q 为发电机空载电势； U 为电力系统母线电压； $x_{d\Sigma}$ 为直轴总电抗。

当发电机为凸极机时，以空载电动势和同步电抗表示的功角关系为

$$P_{E_q} = \frac{E_q U}{x_{d\Sigma}} \sin\delta + \frac{U^2}{2} \frac{x_{d\Sigma} - x_{q\Sigma}}{x_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} \sin 2\delta \quad (1.2)$$

式中： $x_{q\Sigma}$ 为交轴总电抗。

传统电力系统中有功率的调节，稳定性的控制主要表现在功角 δ 及电势 E_q 的调节。功角 δ 的调节是通过原动机调速机构的控制实现的，而电势 E_q 的调节是通过同步发电机励磁系统的调节实现的。

1.1.2 电力变压器

电力变压器能够实现同频率电网不同电压等级部分之间的互联。从效率和传输质量的观点来看，输送电压一定要高，但在很高的电压下，发电和用电实际上是不现实的。因而，在现代电力系统中，从发电机到最终用户，传输的功率要经过 4~5 次电压变换。

除了电压变换，变压器常用来控制无功潮流。因此，用于大功率传输的所有变压器和

许多配电变压器在一个或更多的绕组中都装有分接头，以改变匝数比。从电力系统观点来看，要求改变变压器的匝数比来补偿系统电压的变化，有两种分接头调压装置：无载分接头调压和有载分接头调压（ULTC，Under Load Tap Changer 或 OLTC，On Load Tap Changer）。无载分接头调压装置要求不带电时改变分接头，使用它们来改变匝数比，只是为了满足长期的变化，如负荷增加，系统扩展或季节变化。当匝数比需要频繁变化时，则采用 OLTC，例如，针对系统负荷的日变化进行调节时，分接头通常允许匝比在 $\pm 10\% \sim \pm 15\%$ 的范围内变化。

变压器及分接头调节是传统电力系统中电压分布调节的最主要的手段。一个典型的带分接头调节的双绕组变压器可用图 1.3 所示模型描述。

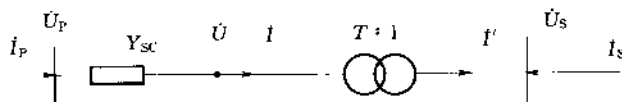


图 1.3 带分接头的双绕组变压器关系电路

图 1.3 中， Y_{sc} 为短路等效导纳， $T:1$ 为与分接头位置相对应的理想变压器。对理想变压器有

$$\frac{U}{U_s} = \frac{T}{1} \quad \text{及} \quad \frac{T}{1} = \frac{i'}{i}$$

又因

$$i = Y_{sc}(U_P - \dot{U}) = Y_{sc}(\dot{U}_P - T\dot{U}_s) i_P$$

及

$$i' = Ti = Y_{sc}(T\dot{U}_P - T^2\dot{U}_s) - i_s$$

可得到带分接头的变压器的电压、电流关系

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_P \\ i_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{sc} & -TY_{sc} \\ -TY_{sc} & T^2Y_{sc} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{U}_P \\ \dot{U}_s \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

改变 T ，将改变 \dot{U}_P ， \dot{U}_s ，进而改变电网中的电压分布。

传统 OLTC 方式采用了机械式转换装置，因而存在调节响应速度慢，不适于频繁调节等限制。

1.1.3 线路

电功率通过架空线和电缆从发电站传输给用户，架空线多用于空旷地区的长距离，大容量及偏远乡村的输电，而电缆则用于城市地区地下输电和 underwater 跨越。

架空输电线路的特性可用 4 个参数来表示：由导体电阻率引起的串联电阻 R ，由相与地之间漏电流引起的并联电导 G ，由导体周围磁场引起的串联电感 L ，由导体之间的电场引起的并联电容 C 。

地下电缆与架空线的基本参数相同，也包括电阻、电导、电感和电容。但由于电导本身的结构和铺设方式，其参数值及其特性与架空线明显不同。等效电容值比架空线要大得多（大 1~2 个数量级），等效电阻、等效电感则比架空线小。

输电线路的传输特性可用图 1.4 所示简单线路分析。

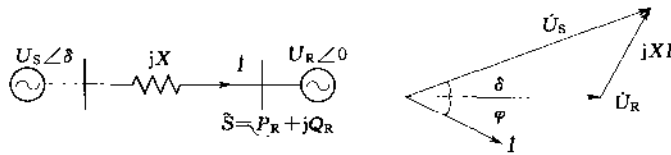


图 1.4 线路的功率传输特性

图 1.4 所示线路只考虑了在功率传输分析中起主导作用的电感参数。

由

$$\begin{aligned}\tilde{S}_R &= P_R + jQ_R = \dot{U}I^* = U_R \left[\frac{\dot{U}_S - \dot{U}_R}{jX} \right]^* \\ &= U_R \frac{U_S \cos \delta + jU_S \sin \delta - U_R}{jX}\end{aligned}$$

于是

$$P_R = \frac{U_S U_R}{X} \sin \delta \quad (1.4)$$

$$Q_R = \frac{U_S U_R \cos \delta - U_R^2}{X} \quad (1.5)$$

类似地，送端的有功功率和无功功率为

$$P_S = \frac{U_S U_R}{X} \sin \delta \quad (1.6)$$

$$Q_S = \frac{U_S^2 - U_S U_R \cos \delta}{X} \quad (1.7)$$

从式 (1.4) ~ 式 (1.7) 可看出改变线路参数 X 可以改变系统的有功与无功传输水平，进而改变潮流及稳定水平。传统电力系统中参数 X 的改变具有很大的局限性，因而，潮流与稳定的控制就有很大的局限性。

1.1.4 负荷

传统电力系统负荷通常不采用中间变换环节，直接将电能变换为其他形式的能量加以利用。负荷从电网取用的功率受电网波动的影响大，负荷能量转换效率较低，可控性差。负荷从电网取用的功率受电网波动的影响称为负荷特性，可分为静特性负荷和动特性负荷。动特性负荷主要由感应电动机及同步电动机组成，其从系统取用的有功功率和无功功率受系统电压和频率的影响。静特性负荷则主要受电力系统电压变化的影响。由于这些负荷千差万别，特性各异，需要通过一定的综合方法或辨识方法才能得到统一的负荷特性。

总体而言，传统电力系统负荷的电压、频率调节特性较差，即负荷从系统取用的功率随系统电压、频率的波动而发生变化，这对于电力系统的稳定运行往往是有利的，但对用电设备的稳定运行则是不利的。

通过上述对传统电力系统的总体描述，可对传统电力系统在可控特性方面的主要特点汇总如下：

(1) 由于目前的技术还不能实现大规模电磁形式的电能存储，因而电力系统电能的发

生、传输和应用必须同时完成，不平衡的出现意味着系统运行的稳定性受到干扰。

(2) 各发电机组间必须严格保持同步。由于传统电力系统中的发电机组以同步方式连接到电网，机组间的失步就意味着功率的振荡甚至稳定的破坏。

(3) 电力系统网络中的潮流只能由系统阻抗决定，改变变压器分接头，可以在一定范围内改变潮流，但很难满足系统对潮流控制准确性、快速性及频繁调节的要求。

(4) 供电模式单一。不同负荷对供电的可靠性要求不同，对电能质量的要求不同。传统配电系统中，仅提供一致的电力，缺少针对不同负荷提供不同电能质量的供电方式。

(5) 电能质量控制主要以静态调节为主。如通过机械开关分组投切电容器、通过有载分接头的配电变压器调节负荷的电压。这些调节方式无法满足负荷对精确、动态电能质量调节的需求。

(6) 用电负荷电能利用调节性能较差，电能利用率较低，传统电力系统中的负荷多将电网提供的电能直接转化为机械能、热能、光能等。如直接驱动的异步电动机、白炽灯、工频电炉等。这些转换设备的电能利用数量和质量通常由系统电压和频率决定，缺少有效的调节手段。

1.2 电力系统柔性化的必要性

电力系统作为人类到目前为止构建的最庞大、最复杂的系统，随着社会要求的变化、技术的进步，处在不断发展、变化和更新之中。当今社会正进入信息时代，资源、环境及协调发展已成为社会生活和经济发展的课题。这个时代对电力系统的需求呈现出一系列新的特点。

(1) 可控性好，形式多样的发电系统。电力系统的稳定控制要求发电机组装设响应快、精度高、调节更灵活的励磁系统。

近年来，电力系统负荷率（平均负荷率/最大负荷功率）呈现逐年下降的趋势，而大型火电机组、大容量核能机组等出力调节困难的电厂又得到了快速的发展，这就对整个电力系统出力的调节提出了越来越高的要求。

可再生能源的发展要求对风力、太阳能发电等这些波动性很强的电能的生产及并网进行控制。

(2) 潮流可控、安全稳定的输电系统。电力市场的发展将出现对电网潮流可控的要求。

实现资源的最优配置、远距离、大功率、高电压电能的传输对潮流控制、无功功率的动态调整、线路阻抗的动态补偿等提出更高的要求。

(3) 模式多样、质量可控的配电系统。配电系统的模式是指电力用户除可以从主电网获得电能外，也可因可靠性、自然资源、能源的充分利用等原因，从热电联产的小型透平发电机、太阳能发电、风力发电等分布式电源，电池、电容、超导等储能设备获得电能。电能质量的控制则有两个方面的需求：一是确保供给用户的电能的电压、频率、平衡度及波形满足要求；二是用电设备注入电网的谐波、负序、冲击等电流应进行控制，满足标准要求。

(4) 调节性好、高效节能的用电系统。用电设备并非工作在电网的固定频率，固定电压下特性最好、效率最高。当用电设备所驱动的负载发生变化或电力系统电压、频率等电气量发生变化时，用电设备应能对用电过程进行调节，对电功率的形式和数量进行控制，使用电设备工作在性能最佳、效率最高的状态。

以上分析表明，从发电、输电、配电到用电的各个环节，现代电力系统对电能的量和质两方面的控制都提出了新的要求。

1.3 柔性电力技术的概念、分类和应用示例

电力系统的发展对电能的灵活调节不断提出新的要求，而更高性能的调节手段又对电力系统中电能的产生、输送与应用带来积极的变化。基于整流桥的发电机励磁装置代替直流发电机励磁，使系统在稳态与暂态控制中的响应速度、精确度大大提高。直流输电的应用改变了电网互联仅限于交流的格局，为大容量功率的远距离输送、大区域电网、不同频率电网间的互联提供了有效手段。柔性交流输电（FACT—Flexible AC Transmission）的提出和实施为交流系统参数、无功调节、输送能力、动态稳定给出了新的解决方案；用户电力技术（Customer Power）则是配网层上基于电能质量控制的技术，能够满足不同用户对不同电能质量的需求；变频调速、中频电炉、电子镇流器技术的发展则是在用电设备中实现对电能的变换与控制。

上述技术的发展正是柔性电力技术思路的体现。这些技术的核心是电力电子技术的应用。本书中，柔性电力技术定义为基于电力电子技术在电能的产生、输送与应用各个环节对电能的数量和形态进行快速、精确控制的技术。柔性电力技术实施的核心是电力电子技术，但并不限于电力电子技术，储能技术、分布式电源技术、信息处理与控制技术等与柔性电力技术都是密不可分的。相关内容将在后续章节中讨论。

基于柔性电力技术构成的电力系统的示例如图 1.5 所示。下面依据不同领域对柔性电力技术的具体应用给予简要说明。

(1) 发电领域中的柔性化技术。

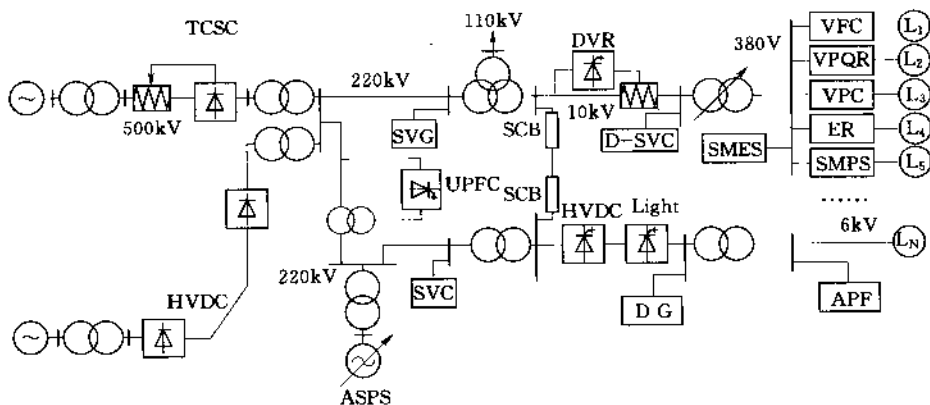


图 1.5 柔性电力技术概念图

1) 可变速抽水蓄能技术 (ASPS, Adjustable Speed Pump Storage)。可变速抽水蓄能机组采用交—交变频器, 将系统工频 50Hz/60Hz 变为转子滑差对应的频率作用于转子绕组进行励磁, 实现机组的非同步运行。这一技术也有用于火电机组的报导。该技术对于电力系统的频率控制与稳定控制有积极的作用, 体现了发电系统的柔性化思路。

2) 风力发电中的双馈感应发电技术 (DFIG, Double Feed Induction Generator)。基本原理与结构与可变速抽水蓄能相似, 通常功率较小, 滑差调节范围更大。为实现控制的灵活性, 功率器件通常采用全控器件。

3) 太阳能发电中的功率调节技术 (PC, Power Conditioning)。太阳能电池所产生的电能随太阳光强、环境温度及负载情况会发生变化, 太阳能发电系统中必须加入功率调节环节以实现控制、保护、降低损耗及尽可能地使系统工作在太阳能的最大发电状态。功率调节通常包括阻断二极管、直流—直流斩波器及直流—交流逆变器。

4) 静止励磁系统 (SE, Static Exciting)。同步发电机的励磁系统经历了直流励磁方式, 交流励磁方式, 目前越来越多的采用静止励磁方式。静止励磁方式中整个励磁回路无旋转部件, 核心电路是由可控交流—直流变换电路。由于能够几乎瞬间地响应各控制量, 对提高电力系统的控制性能发挥很大作用。

5) 随着能源利用形态的变化和供电模式的多样化, 新的发电方式不断出现。这些发电方式往往都存在功率控制、效率改善及平稳并网等问题, 因此都能找到柔性电力技术发挥作用的场所。

(2) 输电环节的柔性化技术。

1) 高压直流输电 (HVDC, High Voltage DC)。高压直流输电通常采用可控整流和有源逆变的方式实现两个交流电网的互联。不仅可以实现电能大容量、远距离的传送、两区域电网非同步互联, 还可通过控制实现功率的紧急援助、抑制低频振荡、提高交流系统的动态稳定性等。

2) 静止无功补偿器 (SVC, Static Var Compensator)。SVC 通过控制晶闸管的导通角, 调节整个装置的等效阻抗, 从而可给系统注入无功或吸收无功, 是目前基于电力电子技术制作的容量较大的静止无功补偿设备。

3) 静止无功发生器 (SVG, Static Var Generator), 又称 STATCOM (Static Compensator)。基于全控器件的电压型逆变器 (VSI, Voltage Source Inverter) 构成。具有响应速度快、谐波小, 调节性能好等特点, 是一类非常有前景的静止无功补偿设备。

4) 可控串联补偿设备 (TCSC, Thyristor Controlled Series Compensator)。其工作原理与 SVC 相仿, 但串接在线路中, 从而动态地调节线路的等效阻抗, 对提高交流输电线的传输能力、抑制低频振荡和次同步振荡都有积极作用。

5) 统一潮流控制器 (UPFC, Uniform Power Flow Controller)。统一潮流控制器是并联补偿和串联补偿的结合。并联部分通常由不控或半控器件构成, 串联部分则由全控器件构建。通过在交流输电线路中注入大小与相位都可控的等效电源, 改变电网的潮流分布, 同时, 在电网的稳定控制中也能发挥积极作用。

6) 大容量超导储能系统 (SMES, Super-conducting Magnetic Energy Storage)。在前述 UPFC 的直流环节增加 SMES, 就使得串联部分注入电网的有功、无功均可控, 既

可吸收也可发出,可进一步提高电力系统控制的灵活性。当然 SMES 也可为其他可能的大容量快速响应的储能设备所替代。

7) 静止同步串联补偿器 (SSSC, Static Synchronous Series Compensator)。通常采用多电平电压源型逆变器,将直流电压逆变为与系统频率一致的交流电压,通过串联变压器接入输电线路。直流侧多采用电容器,因此逆变器除从电网吸收装置线路、器件的损耗外,主要与电网进行无功功率的交流。

(3) 配电网中的柔性化技术。

1) 配网静止无功补偿器 (D-SVC, Distribution Static Var Compensator)。其工作原理与输电网中的 SVC 相同, D-SVC 通常直接用于波动负载的补偿,要求响应速度快且多为小商家购进,造价不能太高。

2) 配网静止无功补偿发生器 (D-SVG, Distribution Static Var Generator)。其工作原理与输电系统中的 SVG 相同。具体实现时的拓扑结构依据电压等级和响应要求有些变化。

3) 有源电力滤波器 (APF, Active Power Filter)。有源电力滤波器的拓扑结构与 D-SVG 相似。控制方法上以补偿负载电流与正弦基波电流的差值为目标,实现谐波的动态消减。

4) 固态断路器 (SCB, Solid-state Circuit Breaker)。这类断路器使用电力电子器件,实现不同电源间的快速切换。为降低功耗,这类开关同时并接有机械开关,电力电子开关用作电路的快速切换,机械电力电子开关用作正常工作时电流的流通。

5) 轻型直流输电 (HVDC-Light)。轻型直流输电采用全控器件,按基于电压源方式的逆变器 (VSI) 构成变换电路,可用于弱受端电网或受端无电源的系统的供电,在孤岛、城区等环境的供电中有发展前景。

6) 动态电压调节器 (DVR, Dynamic Voltage Regulator)。动态电压调节器的结构与前述的 UPFC 类似,依据电压等级的不同,可有不同的拓扑形式。串联电压的注入方式也可以是变压器的方式、电容器的方式或直接方式。DVR 在配电系统中主要用于电压暂降的抑制和电压谐波的补偿。

7) 配电系统用超导储能 (D-SMES, Distribution-SMES)。将超导储能设备连接于 DVR 的直流侧,则串联部分可注入有功功率,实现较严重的暂降甚至短时中断的补偿。

8) 不间断电源 (UPS, Uninterruptible Power Supply) 交流不间断电源的核心是通过整流电路对储能元件充电,通过逆变电路从储能元件中提取能量,以负载所要求的交流电源方式供电。随着信息时代重要电力用户的增加,UPS 的应用呈快速上升的趋势。

9) 统一电能质量调节器 (UPQR, Uniform Power Quality Regulator)。UPQR 的结构与前述配网中的 DSMES 相似,储能部分目前采用电池或超级电容较为普遍。UPQR 通常直接与敏感负荷连接,可对电力系统中出现的几乎所有电能质量问题进行调节。

(4) 用电设备的柔性化技术。

1) 电动机的变频调速 (VFD, Variable Frequency Drive)。电动机通过对电源的频率和电压都可进行调节的 AC-DC-AC 或 AC-AC 变频装置接入电网,从而依据电动机负载变化的要求调节加在电动机上电压的大小和频率,是柔性化概念在用电领域的典型