



高压直流输电 与柔性交流输电

GAOYA ZHILIU SHUDIAN
YU ROUXING JIAOLIU SHUDIAN

杨晓萍 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

高压直流输电 与柔性交流输电

GAOYA ZHILIU SHUDIAN
YU ROUXING JIAOLIU SHUDIAN

杨晓萍 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

我国能源资源和生产力发展呈逆向分布,长距离、大容量输电是我国未来电网发展的趋势。因此发展高压直流输电和利用柔性交流输电技术提高交流输电线路的输送能力成了必然选择。

高压直流输电和利用柔性交流输电的基础理论均为电力电子技术。本书以介绍换流器的工作原理为基础,分别介绍了高压直流输电和柔性交流输电的基本概念、构成和工作原理。全书共分11章,包含直流输电系统的控制和保护、换流站及其设备、高压直流输电线路、换流站谐波分析与滤波、几种柔性交流输电技术等内容。

本书可作为电力系统相关技术人员的技术参考书,也可作为高等院校电气工程专业学生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

高压直流输电与柔性交流输电/杨晓萍编著. —北京:中国电力出版社,2010.9

ISBN 978-7-5123-0916-6

I. ①高… II. ①杨… III. ①高电压-直流-输电技术
②交流-输电技术 IV. ①TM726.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第188488号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2010年9月第一版 2010年9月北京第一次印刷
787毫米×1092毫米 16开本 13.25印张 322千字
印数0001—3000册 定价28.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
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

高压直流输电（HVDC）与柔性交流输电（FACTS）技术在过去的几十年中取得了巨大的成就。自 1882 年采用直流输电输送电能以来，经过 20 世纪 50 ~ 60 年代的汞弧阀时期，直流输电在远距离大容量输电、海底电缆输电和不同频率联网方面发挥了独特的作用；又经过 20 世纪 70 ~ 80 年代的晶闸管时期，使直流输电得到了大发展，并在大电网互联方面展现了更多的优势。20 世纪以来，大功率可关断器件的迅猛发展，促进了新型直流输电的快速发展，使直流输电扩展到了配电网和新能源开发等更为广阔的领域。直流输电技术是技术面广、技术含量高、综合性很强的高技术，它不仅促进了电力电子技术的发展，而且随着电力电子器件、计算机技术的发展，新材料的出现，新能源和可再生能源的开发利用，必将为电力工业的发展发挥更大的作用。

由于我国地域辽阔，能源分布与负荷发展很不均衡，水力资源主要集中在西南地区，煤炭资源主要集中在山西、陕西和内蒙西部，而负荷主要集中在东部沿海地区，因此远距离大容量输电势在必行。另一方面，电网互联是电力工业发展的必然趋势。直流输电与交流输电相比在以下几个方面具有独特的优势：

(1) 对于输电距离超过 1000km，输送容量超大的西电东送工程，利用直流输电是最经济、合理的方案；

(2) 采用直流输电联网，不会影响被联交流系统的短路水平；

(3) 采用直流输电联网，彻底根除了联络线低频振荡产生的可能性；

(4) 采用直流输电，可以在网络结构上隔断交流故障的传递，避免发生连锁反应，是在网架结构上预防大面积停电的有效措施。因此利用高压直流输电进行远距离大容量输电和全国联网在技术上、经济上 and 安全性等方面具有独特的优势。我国已成为世界上直流输电应用前景最为广阔的国家之一。

电力系统已进入大系统、超高压远距离输电、跨区域联网的新阶段，社会经济的发展促使现代电网的管理和运行方式发生变革，对其安全可靠、稳定、高效、灵活运行控制的要求日益提高，从而急需发展新的调节手段，提高其可控性；同时，控制理论、大功率电力电子、计算机信息处理等技术的发展又为输电控制手段的改善和换代提供新的可能。在这种情况下，20 世纪 80 年代美国科学家提出了柔性交流输电技术的概念，经过近 30 年的研究和工程应用，使相关技术得到不断的发展和完善。控制技术由集成电路控制向全数字控制发展，电力电子功率器件也从低电压、小电流向高电压、大电流，半控型向全控型发展。新型基于 DSP 的控制保护系统，高电压、大电流，半控和全控器件的采用，使 FACTS 技术在实际应用中可以进行优化设计和优化组合。电网的发展，特别是用户对电网可靠性和供电质量的更高要求，加速了电力系统对柔性交流输电系统的需求。

我国电网正处于高速发展阶段，特高压交流主干电网的建设、特高压直流输电的广泛采用、已有输电通道输送能力的提升、电能质量的提高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。这一技术领域与传统的电力系统控制有很大差别,许多电力工程人员和电气工程专业学生对此缺乏系统的了解。本书系统介绍和探讨了电能传输领域的电力技术——高压直流输电与柔性交流输电技术,可作为电力工程相关技术人员和电气工程专业学生学习高压直流输电与柔性交流输电技术的教材和技术参考书。

本书介绍了高压直流输电与柔性交流输电技术相关的技术理论、电路拓扑、控制技术和系统研究等内容。全书共11章,第1章概述高压直流输电和柔性交流输电技术,并阐述了高压直流输电和柔性交流输电之间的关系。第2章介绍了电流源换流器、电压源换流器、强迫换相换流器、电容换相换流器的工作原理、基本特性、基本关系式、典型波形及电压源换流器的PWM调制方法。第3章针对两端直流输电系统的控制调节,介绍高压直流输电系统的配置,及控制器的基本原理和表述形式。给出了直流输电控制系统的分层结构和控制功能,讨论了直流输电系统的故障及其保护措施。第4章介绍换流站的主要电气设备,并对各种电气设备的构成、分类、工作原理进行了分析和论述。第5章论述了高压直流输电的特征与非特征谐波,给出了传统的谐波抑制方法和无功补偿方法。第6章阐述了直流架空线路、直流电缆线路、接地极涉及的工程相关问题。第7章论述了柔性交流输电装置控制中所采用的各种矢量变换和瞬时无功功率理论。分析了输电系统并联补偿的作用和电能质量问题。第8章论述了机械投切的并联电容器和并联饱和电抗器补偿。对目前比较典型的几种SVC装置的原理、结构、运行特性及控制策略进行了阐述。第9章论述了静止同步补偿器的主电路结构和基本原理,分析了静止同步补偿器的稳态和暂态性能,从运行特性、输电系统稳定性等方面对STATCOM和SVC进行了比较,并从控制系统结构、控制策略、多电平调制策略几个方面对控制系统进行了研究。第10章概述了有源电力滤波器的分类和拓扑结构,论述了有源电力滤波器的工作原理、系统构成、谐波检测方法与控制系统的分析与设计。第11章分析了串联补偿的基本原理、作用和分类,论述了晶闸管控制串联电容器的工作原理、运行模式及控制策略,对基于VSC的静止同步串联补偿器的工作原理、运行特性及控制策略也进行了研究。

梁振锋完成了第4~6章及3.8节的编写,宁联辉完成了第7、8章的编写,杨晓萍完成了其他章节的编写,并担任主编。在本书的编写过程中得到了钟彦儒教授的指导,西安理工大学水电学院电力系的多位老师在本书编写过程中给予指正和帮助,多位硕士研究生帮助完成部分书稿输入和图表绘制,在此表示诚挚的感谢。

高压直流输电技术既传统又新颖,既理论又实践;柔性交流输电技术又是一门新颖的技术,同时还具有涉及面广、发展迅速的特点。作者在组稿时感到选题庞大、很多问题无法深入,很多技术无法跟进,在一册图书中要全面反映两个方面的研究技术确有难度。因此在编写时着重于提供该领域的基本知识和基本素材,以期为对该领域关注的技术人员、师生提供参考。由于作者水平有限,书中难免存在错误与不妥之处,敬请广大读者批评指正。

作者

2010年9月

前言

第 1 章 概述	1
1.1 传统电力系统的构成与控制	1
1.2 现代电力系统面临的挑战	5
1.3 直流输电发展历史	6
1.4 直流输电的基本原理	8
1.5 高压直流输电系统的类型	10
1.6 直流输电和交流输电的比较	13
1.7 直流输电的应用	17
1.8 柔性交流输电技术的发展	19
1.9 FACTS 可以解决的系统问题	20
1.10 HVDC 与 FACTS 的关系	21
第 2 章 直流输电的换流技术	23
2.1 概述	23
2.2 电流源换流器 (CSC)	24
2.3 电压源换流器 (VSC)	35
2.4 强迫换相换流器	42
2.5 电容换相换流器	47
第 3 章 高压直流输电系统的控制与保护	49
3.1 两端直流输电系统的基本控制原理	49
3.2 换流器基本控制方式及其配置	51
3.3 定电流控制	55
3.4 定电压控制	56
3.5 定关断角控制	57
3.6 直流输电控制系统的分层结构	59
3.7 直流输电控制系统功能	61
3.8 故障与保护	68
第 4 章 换流站及其设备	74
4.1 换流站概述	74
4.2 换流站主接线	75
4.3 换流阀	78

4.4	换流变压器	80
4.5	平波电抗器	83
4.6	换流站无功补偿装置	85
4.7	换流站开关设备	87
4.8	测量设备	91
4.9	换流站辅助设施	93
第 5 章	谐波和滤波器	95
5.1	概述	95
5.2	换流器交流侧的特征谐波	96
5.3	换流器直流侧的特征谐波	98
5.4	非特征谐波	99
5.5	交流滤波器	100
5.6	直流滤波器	104
第 6 章	高压直流输电线路	106
6.1	概述	106
6.2	高压直流架空线路	106
6.3	直流电缆线路	110
6.4	大地回路	111
6.5	接地极及其引线	113
第 7 章	柔性交流输电技术基础	118
7.1	矢量变换	118
7.2	瞬时功率理论	121
7.3	输电系统并联补偿	127
7.4	电能质量	129
第 8 章	变阻抗型静止无功补偿器	133
8.1	并联电容器补偿	133
8.2	并联饱和电抗器 (SR) 补偿	135
8.3	晶闸管控制电抗器 (TCR)	137
8.4	晶闸管投切电容器 (TSC)	140
8.5	静止无功补偿器 (SVC)	143
第 9 章	静止同步补偿器	150
9.1	STATCOM 的基本原理	150
9.2	STATCOM 与 SVC 的比较	159
9.3	控制系统	161
9.4	冷却系统	167

第 10 章 有源电力滤波器	169
10.1 概述	169
10.2 有源电力滤波器的分类	170
10.3 有源电力滤波器的拓扑结构	171
10.4 直流有源滤波器	174
10.5 有源电力滤波器的基本原理	175
10.6 有源电力滤波器的构成	176
第 11 章 静止串联补偿器	187
11.1 概述	187
11.2 晶闸管控制串联电容器	190
11.3 TCSC 的控制	194
11.4 静止同步串联补偿器 (SSSC)	198
参考文献	202

第 1 章 >>>

概 述

1.1 传统电力系统的构成与控制

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、用电设备及保护和控制设备。这些设备通过适当的方式连接成有机整体，实现以最小的运行成本、最大的运行可靠性、最高的电能变换效率进行电能的产生、传输与应用。

电力系统依据电能的流向可划分为四个组成部分：发电、输电、配电和用电。发电实现各种一次能源到电能的转换。发电机组以严格的同步方式连接到一起，通过功角与出口电压的调节，实现输出有功和无功的调节。发电厂通常远离负荷中心，因而采用高压输电成为电力系统输电的主要形式。目前我国采用的交流输电电压等级有 110、220、330、500、750kV 等电压等级。在负荷中心，则必须通过多级降压，将电能分配到工业、商业、居民等电力用户。配电系统的电压等级有 35、20、10、6kV 等。到达电力用户后通常还需要进一步降压，如 380V/220V，以满足电力用户设备的需要。因此传统电力系统中功率的控制主要包括对同步发电机、电力变压器、线路及负荷的控制。

1.1.1 同步发电机

同步发电机由两个基本部分组成，即磁场和电枢。通常磁场在转子上而电枢在定子上，磁场绕组用直流励磁。当转子由原动机拖动时，励磁绕组的旋转磁场将在定子的三相定子绕组上感应出交变电压。交变电压及定子绕组接负荷后产生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，故称“同步电机”。

当两台或多台同步电机互联运行时，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，所有互联运行的同步电机的转子必须同步。

定子电枢绕组的物理分布，应使流过三相绕组的时变交流电流，在稳态运行方式下产生旋转磁场，以与转子相同的速度旋转。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（或功率）输出的变化只能通过改变原动机的机械转矩才能实现。增加输入机械转矩，将使转子相对定子旋转磁场的位置超前。相反，减少输入机械转矩，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。但按发电机电磁转矩（或功率）大小的不同，它们之间存在一个电角度。

在同步电动机情况下，与发电机相比，其电磁转矩和机械转矩的作用正好相反。电磁转

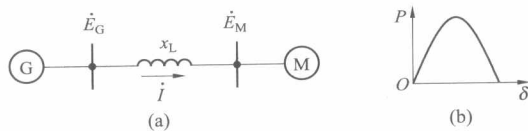


图 1-1 两机系统的功率传输特性

(a) 等值系统图; (b) 功角曲线

矩维持旋转，而机械负荷抵抗旋转。增加机械负荷将使转子相对定子旋转磁场的位置滞后。

同步电机转子角的位置与交换功率的关系是电力系统稳定的一个重要特性。为说明这一关系，以如图 1-1 (a) 所示简单系统

为例。该系统有两台同步电机经一条线路互联，该线路只计感抗而忽略电阻和容抗。

送端传送的有功功率和无功功率为

$$P = \frac{E_G E_M}{x_L} \sin \delta \quad (1-1)$$

$$Q = \frac{E_G (E_G - E_M) \cos \delta}{x_L} \quad (1-2)$$

式中： E_G 和 E_M 分别为两台电机的空载电动势； x_L 为包括两端电机、线路的总电抗； δ 为两台电机转子之间的角度差即功角。

传统电力系统中有功功率的调节，稳定性的控制，主要表现在功角 δ 及电动势 E_G 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，而电动势 E_G 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

变压器使系统中存在不同的电压等级成为可能。在现代电力系统中，从发电到终端用户，传输的功率要经过 4~5 次电压变换。一个电力系统中所有变压器的总容量是所有发电机总容量的 5 倍左右。

除了电压变换之外，变压器常用来控制电压和无功潮流。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有分接头，以改变匝数比。在电力系统中，通过改变变压器的匝数比可以补偿系统电压的变化。

分接头调整装置有两种：无载分接头调整（Under Load Tap Changer, ULTC）和有载分接头调整（On Load Tap Changer, OLTC）。无载分接头调整装置要求不通电时改变分接头。使用它们来改变匝数比，只是为了满足长期的变化，如负荷增长、系统扩展或季节变化。当匝数比需要频繁变化时，则采用有载分接头调节，如针对系统负荷的日变化进行调节时，分接头通常允许匝数比在 $\pm (10\% \sim 15\%)$ 的范围内变化。

变压器分接头调节是传统电力系统中电压分布调节最主要的手段。一个典型的带分接头调节的双绕组变压器可用如图 1-2 所示的模型描述。图中 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。

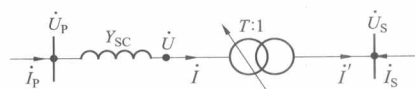


图 1-2 带分接头的双绕组变压器电路

对理想变压器有

$$\frac{\dot{U}}{\dot{U}_s} = \frac{T}{1} \quad \text{和} \quad \frac{T}{1} = \frac{\dot{i}'}{\dot{i}}$$

又因为

$$\dot{i} = Y_{SC}(\dot{U}_P - \dot{U}) = Y_{SC}(\dot{U}_P - T\dot{U}_S) = \dot{i}_P$$

$$\dot{i}' = T\dot{i} = Y_{SC}(T\dot{U}_P - T^2\dot{U}_S) = -\dot{i}_S$$

可得到带分接头的变压器的电压、电流关系，如式 (1-3) 所示。

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_P \\ \dot{i}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{SC} & -TY_{SC} \\ -TY_{SC} & T^2Y_{SC} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_P \\ \dot{U}_S \end{bmatrix} \quad (1-3)$$

改变匝数比 T ，将改变 \dot{i}_P 和 \dot{i}_S ，进而改变电网中的电压分布。

传统有载分接头调压采用机械式转换装置，因而存在调节响应速度慢、不适应频繁调节等缺点。

1.1.3 输电线路

电功率通过架空线路和电缆从发电站传输到用户。架空线路用于空旷地区和乡村远距离输电，而电缆则用于城市地区地下输电和水下跨越。

输电线路的特性有四个参数表征：由导体电阻率引起的串联电阻，由相与地间漏电流引起的并联电导，由导体周围磁场引起的串联电感，由导体之间的电场引起的并联电容。

架空线路和地下电缆的基本参数都包括电阻、电导、电感和电容。但由于电导体本身的结构和铺设方式不同，其参数值及其特性有明显不同。地下电缆的等效电容比架空线路要大得多，等效电阻、等效电感则比架空线路小。

输电线路的功率传递用图 1-3 所示的简单线路分析。两个电源通过一个感性电抗相互连接。输电线路电容的影响用传输的纯无功功率来隐含表示。

图 1-3 中受端的复功率为

$$S_R = P_R + jQ_R = \dot{E}_R \dot{i}^* = \dot{E}_R \cdot \left[\frac{\dot{E}_S - \dot{E}_R}{jX} \right]^* = E_R \cdot \left[\frac{E_S \cos\delta + jE_S \sin\delta - E_R}{jX} \right]^* \quad (1-4)$$

于是，受端有功功率和无功功率分别为

$$P_R = \frac{E_S E_R}{X} \sin\delta \quad (1-5)$$

$$Q_R = \frac{E_S E_R \cos\delta - E_R^2}{X} \quad (1-6)$$

同理，送端有功功率和无功功率分别为

$$P_S = \frac{E_S E_R}{X} \sin\delta \quad (1-7)$$

$$Q_S = \frac{E_S^2 - E_S E_R \cos\delta}{X} \quad (1-8)$$

由式 (1-5) ~ 式 (1-8) 可知，改变线路参数 X 可以改变系统的有功功率与无功功率水平，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。

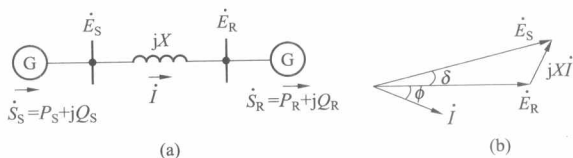


图 1-3 输电线路的传输特性
(a) 等值系统图；(b) 相量图

1.1.4 负荷

电力系统的稳定运行取决于系统中发电机组的电力输出与电力负荷连续匹配的稳定性。因此，负荷特性对系统稳定性有重要的影响。一个典型的负荷母线是由大量设备组成的，例如荧光灯、白炽灯、电冰箱、电热器、电动机和电炉等。负荷的准确组成是难于估计的。负荷的组成变化依赖包括时间、季节、气候条件和经济形势等许多因素。因此，系统研究中负荷的表示通常是基于大量简化的。

传统的系统负荷模型分为静态负荷模型和动态负荷模型两大类。静态负荷模型表示任意瞬时的负荷特性是该瞬时的母线电压幅值和频率的代数函数。有功功率分量和无功功率分量分别考虑。动态负荷模型表示在一个扰动发生后到恢复配电电压负荷的动态特性。图 1-4 为一个合成的负荷模型。

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。负荷从系统取用的有功功率和无功功率受系统电压和频率波动的影响大，负荷能量转换效率较低，可控性差。

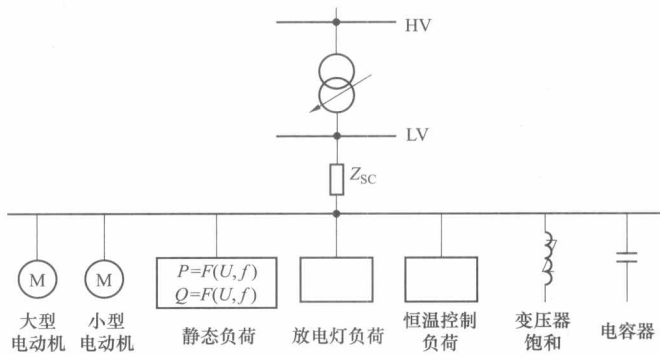


图 1-4 合成静态和动态负荷模型

通过以上分析，传统电力系统在控制方式方面的特点总结如下：

(1) 目前由于不能实现电能的大规模存储，因此电力系统电能的发生、传输和使用必须同时完成。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，机组间的失步导致功率的振荡甚至稳定的破坏。

(3) 电网中的潮流由系统阻抗决定，改变变压器分接头，可以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) 不同负荷对供电的可靠性和电能质量的要求不同。传统的配电系统供电模式单一，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、通过有载分接头调节变压器。这些调节方式无法满足负荷对精确、动态电能质量调节的要求。

(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，如直接驱动异步电动机、白炽灯、工频电炉等。这些转化设备的电能利用率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 现代电力系统面临的挑战

随着经济和电力技术的发展,现代电力系统已经发展得非常庞大和复杂。它的特点可用“机组容量大、电压等级高、输送距离远、交直流混合输电和区域电网互联”来概括。在全球范围内,能源和经济发展不平衡,以及电力市场的发展,促进了大区电网的互联。电力系统互联可以实现最大范围内电力资源的优化配置,发挥大电网互联的错峰调峰、水火互济、跨流域补偿调节、互为备用等联网效益,实现电网之间功率交换,在更大范围内优化能源配置方式,提高供电可靠性。然而,随着电力系统规模的不断增大,输电电压等级的提高,非线性负荷的增长,电力系统面临巨大的挑战,表现在以下几个方面:

(1) 一方面是有远距离输送更多电能的需求,架设新的输电线路受到线路走廊资源的限制,而另一方面却是现有线路的输电能力受系统暂态稳定和动态稳定的限制,大大低于导线的热稳定极限,使线路的输电能力不能充分发挥。

(2) 电网互联的作用之一是提高了对用户的供电可靠性。可是由于缺乏对潮流的有效控制手段,在一条线路故障断开后,由于潮流转移使其他线路过载或超出稳定极限,引起电压崩溃、系统失稳,从而造成更大面积的停电事故。

(3) 交直流混合输电方式的采用,输电电压等级的提高,使现代电力系统的结构越来越复杂。在电网建设的一定阶段,采用在发电机侧进行无功和电压控制的方式,已经不能满足现代电力系统发展的需求,特别是输配电环节快速、灵活和可连续调节的手段普遍不足。功率分布中的自由潮流和负荷变化很大,并且在电网中造成大量电能损耗或被迫降低输送能力。

(4) 随着电力系统的快速发展,特高压技术应运而生。交流特高压存在有效灵活控制充电功率、长距离输送有功功率以及限制潜供电流等诸多技术问题需要解决。

(5) 现代电力系统中负荷结构发生了很大的变化。随着技术的发展,用户使用的精密仪器对电能质量提出了更高的要求,不仅要求供电连续可靠,还希望供电电压、频率稳定,波形良好。与此同时,诸如超高功率变流设备、电弧炉、电气化铁路和变频调速装置等负荷的迅速发展,由于其非线性、不对称及冲击性等用电特性,产生大量的无功和谐波电流,加剧了电网的不平衡度,引起电压波动和闪变,致使电网的电能质量恶化。

(6) 电力负荷随时间变化呈现出谷段和峰段。为了保证峰段时的安全运行,电力系统不得不留有备用容量。过多的备用容量阻碍了电力系统运行效率的提高。

由于电能的特殊性,电能的生产、传输和消费要在电力系统的发电、变电、输电、配电、用电几个环节同时进行,呈现出刚性,这在输配电环节显得尤为明显。要改变电力系统刚性特点可以建立柔性交流输电系统(Flexible AC Transmission System, FACTS)。电力电子技术的发展,为解决上述问题提供了技术支持。

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生产、输送与应用带来积极的变化。

直流输电的应用改变了电网互联仅限于交流输电的格局,为大容量功率的远距离输送,大区域电网、不同频率电网的非同步互联提供了有效的手段。通过控制还可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。

柔性交流输电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。

1.3 直流输电发展历史

1.3.1 国外直流输电的发展

直流输电是最早的电力传输方式。早期的直流输电是不需要经过换流，直接从直流电源送往直流负荷，即发电、输电和用电均为直流电。1882年，远距离输电实验成功，直流发电机发出的电力传送到57km外的慕尼黑，为国际博览会供电，电压为2kV，输送功率为1.5kW。由于电压不高，直流输电的效率只有25%，3/4的电能被消耗在输电线路上了。为了减小线路损耗，必须提高线路电压、降低电流。1889年，法国将直流发电机串联提高输电电压，典型工程为毛梯埃斯（Moutiers）到里昂（Lyon）的125kV、20MW、230km的直流输电工程。但直流发电机串联运行复杂，可靠性低，高电压、大容量直流发电机存在换向困难等问题。因此直流输电的发展受到了限制。

随着交流输电原理的完善，三相交流发电机、感应电动机和变压器的发展，发电和用电领域很快被交流电取代，交流输电和交流电网得到迅速发展，占据电力工业的主导地位。随着电网的不断扩大，交流输电呈现出明显的局限性，如交流远距离输电受到同步运行稳定性的限制，而且随着传输容量的增加问题更加突出。而直流输电有交流输电不能替代的作用，如远距离电缆输电，不同频率电网之间的联网等。

在发电和用电的绝大部分均为交流电的情况下，要采用直流输电，必须解决换流问题。因此直流输电的发展与换流技术的发展密切相关。高压直流输电的发展分为三个阶段：

(1) 汞弧阀换流时期。1928年，具有栅极控制能力的汞弧阀研制成功并投入运行，为发展高电压、大功率直流输电开辟了道路。从1954年世界上第一条工业性直流输电工程（瑞士本土与果特兰岛之间的海底电缆），到1977年最后一个采用汞弧阀直流输电工程（加拿大纳尔逊河I期工程），世界上共有12项采用汞弧阀的直流输电工程投入运行，总容量约为5000MW。

这一阶段直流输电工程的特点是：直流输电设备的制造技术、施工质量、运行水平有了很大的提高，使直流输电进入了工业实用阶段。但汞弧阀制造技术复杂、价格昂贵、逆弧故障率高、可靠性较低、运行维护不便，使直流输电的发展受到限制。

(2) 晶闸管换流时期。20世纪70年代以后，以晶闸管为代表的大功率电力电子技术取得突破性进展。晶闸管换流阀和微机控制技术在直流输电工程的应用，有效地改善了直流输电的运行性能和可靠性，促进了直流输电技术的发展。1970年，瑞典首先在果特兰岛直流工程上扩建了50kV、10MW采用晶闸管换流阀的试验工程；1972年，世界上第一个采用晶闸管换流阀的伊尔河（Eel River）背靠背直流输电工程投入运行。由于晶闸管换流阀不存在逆弧问题，而且制造、试验、运行维护和检修都比汞弧阀简单，从此直流输电工程均采用晶闸管换流阀。此后微机控制和保护、光电传输技术、水冷技术、氧化锌避雷器等新技术在直流输电工程中也得到了广泛的应用。使直流输电在远距离大容量输电、电网互联和电缆送电（特别是海底电缆）等方面均发挥了重大的作用。

(3) 新型半导体换流设备的应用。进入20世纪90年代，新型氧化物半导体器件——绝缘栅双极晶体管（IGBT）首先在工业驱动装置上得到广泛应用。1997年，世界上第一个采用IGBT组成电压源换流器的直流输电试验工程在瑞典中部投入应用，输送功率为3MW，电压为10kV，输送距离为10km。此后，这种被称为轻型直流输电（HVDC Light）工程的技术

逐渐成熟，并走向工程应用。此外，随着 IGBT、IGCT（集成门极换相晶闸管）等具有关断能力的新型半导体换流器件的不断发展，用 PWM 脉宽调制技术换流取代晶闸管的自然换流，必将引起直流输电领域的一场革命。

1.3.2 我国的直流输电发展概况

我国一次能源地理分布不均，传统电源建设所需的煤和水力资源主要分布在西部，而主要负荷分布在东部沿海，因此需要远距离输电。我国沿海岛屿星罗棋布，许多需要海底电缆送电。随着人们对环境问题的日益重视，大城市的供电走廊也有限。HVDC 由于在远距离输电的成本和一些特殊环境（背靠背、地下、海底等）中的优势而得到应用。从而形成了当前电力工业中 HVAC 输电占主导地位、HVDC 输电作为重要补充的格局。

我国直流输电起步比较晚，它跨越了汞弧阀换流时期，在 20 世纪 70 年代直接从晶闸管换流阀时期开始发展。

1963 年，中国电力科学研究院建成了 1000V、5A 的直流输电物理模拟装置。1974 年，西安高压电器研究所建成了 8.5kV、200A、1.7MW 的背靠背换流试验站。1977 年，上海利用杨树浦发电厂到九龙变电站之间的 23kV 交流报废电缆，建成了 31kV、150A、4.65MW 的直流输电试验工程，全长 8.6km。20 世纪 80 年代，中国开始建设直流输电工程，到目前为止有十多条直流输电工程已经投运。

(1) 舟山直流输电工程：1987 年投运。工程的规模为双极电压 $\pm 100\text{kV}$ 、500A、100MW，输送距离 54km。舟山工程的特点是：受端为弱交流系统；直流输电线路为架空线和海底电缆交替分段混合型；采用直流输电可以使舟山电网与华东电网非同步运行；工程从科研设计、设备制造到调试运行，全部都依靠国内技术力量，具有工程试验的性质。

(2) 葛洲坝—南桥直流输电工程（简称葛—南直流工程）：1990 年投运。工程规模为双极电压 $\pm 500\text{kV}$ 、1200A、1200MW，输送距离 1045.6km。由于我国不能制造这种大型直流输电工程的换流设备，同时又缺乏工程设计经验，因此工程设计和设备制造全部由国外承包商承担。1990 年 8 月，全部工程建成，并投入商业运行。该工程既解决了葛洲坝电站向华东上海地区的送电问题，又实现了华中与华东两大电网的非同期联网，具有输电和联网的双重性质。

(3) 天生桥—广州直流输电工程（简称天—广直流工程）：2001 年投运。工程规模为双极电压 $\pm 500\text{kV}$ 、1800A、1800MW，输送距离约 960km。该工程为西电东送工程的一部分，它和天—广交流输电工程形成交直流并联的输电系统，工程建设的目的是解决天生桥水电站以及云南、贵州的多余电力向广州负荷中心的送电问题。为了促进换流设备的国产化，少量的换流阀在国内制造厂进行组装和试验。

(4) 嵊泗直流输电工程：2002 年投运。工程规模为双极电压 $\pm 50\text{kV}$ 、600A、60MW，全长 66.2km，其中 59.7km 为海底电缆。该工程是中国自行设计和建造的双极海底电缆直流工程，主要解决从上海向嵊泗岛及宝钢马迹山码头的送电问题，同时也考虑到当嵊泗岛上的风力发电发展到一定规模时，也具有向上海反送的功能。工程的主要特点是受端为弱交流系统，并含有大量的动态冲击负荷，从而使工程的控制保护系统以及受端的无功补偿方式在技术上均需进行特殊的考虑。

(5) 三峡—常州直流输电工程（简称三—常直流工程）：2003 年投运。工程规模为双极电压 $\pm 500\text{kV}$ 、3000A、3000MW，全长 860km。该工程主要解决三峡水电站向华东电网的

送电问题，同时也加强了华中和华东两大电网的非同期联网。

(6) 三峡—广东直流输电工程：2004 年投运。工程规模为双极电压 $\pm 500\text{kV}$ 、3000A、3000MW，全长 960km。工程主要为解决三峡水电站向广东的电力输送以及实现华中与华南电网的非同期联网。

(7) 贵州—广东 I 回直流输电工程：2004 年投运。工程规模为双极电压 $\pm 500\text{kV}$ 、3000A、3000MW，全长 960km。本工程为西电东送工程，主要解决西南水电与火电向广东珠江三角洲负荷中心的送电问题。本工程中采用了光直接触发晶闸管（LTT）换流阀。

(8) 灵宝背靠背直流输电工程：2005 年投运。工程规模为 120kV、3000A、360MW，本工程实现华中和西北两大电网非同期联网的第一步，随着西北水电与火电的开发，当需要从西北向华中送电时，还可以通过大型的直流输电工程来加强两大电网的互联。

(9) 三峡—上海直流输电工程：2005 年投运。工程规模为双极电压 $\pm 500\text{kV}$ 、3000A、3000MW，全长 1040km。工程主要为解决三峡水电站向上海的电力输送以及实现华中与华东电网的非同期联网。

(10) 贵州—广东 II 回直流输电工程：2008 年投运。工程规模为双极电压 $\pm 500\text{kV}$ 、3000A、3000MW，全长 1225km。本工程为西电东送的第二条直流输电工程，主要解决西南水电与火电向广东珠江三角洲负荷中心的送电问题。

我国电力发展的基本国策为“全国联网，西电东送，南北互供，厂网分开”。到 2030 年左右，西电东送的电力将分北、中、南三条通道送出。北通道主要将陕北煤电和黄河上游水电送往北京、天津、河北和山东，中通道和南通道主要通过直流线路将西南水电送出。

2030 年，陕北煤电基地将达到最终规模，有 3 个 3600MW 电厂和 1 个 3000MW 电厂，总装机容量为 13800MW。按照规划，陕北煤电的电力通过北通道的 6 条 500kV 紧凑型交流线路和一条 $\pm 500\text{kV}$ 、3000MW 的直流线路送往华北电网。到 2030 年，西部水电送往中部和东部的电力将达到 68800MW，采用纯直流输电的规划方案。直流线路的额定电压为 $\pm 500\text{kV}/\pm 600\text{kV}$ 。其中，11 条 $\pm 600\text{kV}$ 、输电容量 3500MW 和 1 条 $\pm 500\text{kV}$ 、输电容量 3000MW 的直流线路送电至南方电网，6 条 $\pm 500\text{kV}$ 、输电容量为 2700MW 和 1 条 $\pm 600\text{kV}$ 、输电容量 3500MW 的直流线路送电到华中电网。

1.4 直流输电的基本原理

直流输电系统由整流站、直流线路和逆变站三部分组成，如图 1-5 所示。

整流站和逆变站统称为换流站。换流站的主要设备是换流器，其作用是实现交流电与直流电的相互转换。换流器可分为整流器和逆变器。

换流器由一个或多个换流桥串联或并联组成。每个桥臂具有可控的单向导通能力，所以又称为阀或阀臂。

直流输电系统的工作过程：由交流系统 I（送电端）送出交流功率给整流站的交流母线，经换流变压器送到整流器，整流器将交流功率转换成直流功率，然后由直流线路把直流功率输送给逆变站内的逆变器，逆变器将直流功率转换成交流功率，再经换流变压器，把交流功率送入到受电端的交流系统 II。

如图 1-6 所示，设整流站的直流输出电压为 U_{d1} ，逆变站的直流输出电压为 U_{d2} ，直流线路总电阻为 R 。当 $U_{d1} > U_{d2}$ 时，有直流电沿着图 1-6 中 I_d 的方向流动。

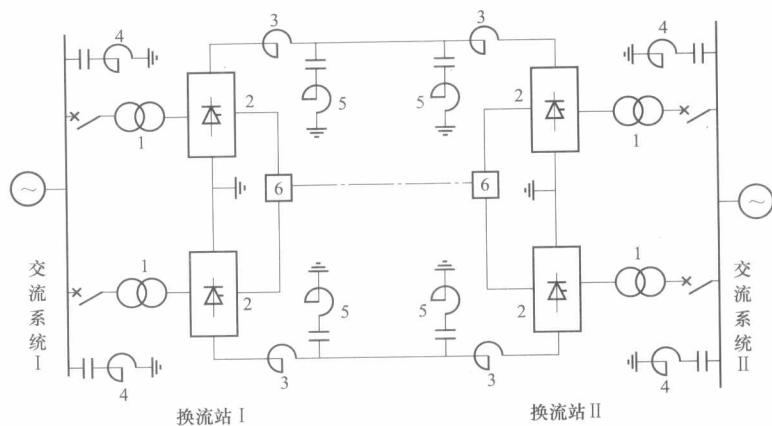


图 1-5 直流输电系统图

1—换流变压器；2—换流器；3—平波电抗器；4—交流滤波器；
5—直流滤波器；6—控制保护系统

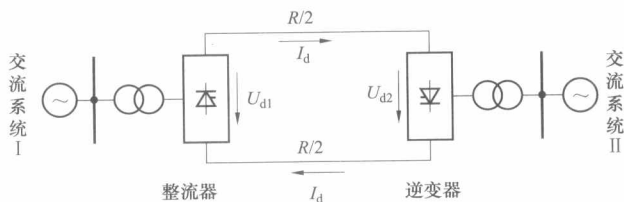


图 1-6 直流输电系统的潮流及直流电压、电流方向

由图 1-6 可知，直流线路的电流为

$$I_d = \frac{U_{d1} - U_{d2}}{R} = \frac{\Delta U}{R} \quad (1-9)$$

直流线路和交流线路不同，它只输送有功功率，不输送无功功率。送电端送到直流线路上的功率以及受电端从直流线路接受的功率分别为

$$P_{d1} = U_{d1} I_d, P_{d2} = U_{d2} I_d \quad (1-10)$$

则在直流线路上的损耗为

$$\Delta P = P_{d1} - P_{d2} = \Delta U I_d \quad (1-11)$$

从以上分析可见，通过调节直流输电系统两端的直流电压，就可以调节直流电流，进而调节直流线路输送的功率。如果需要，通过调节可保持输送的电流或功率不变。

调节直流输电系统使 $U_{d1} < U_{d2}$ ，并使两侧直流电压的极性反转称为潮流反转，如图 1-7 所示。虽然电流的流向没有发生变化，但潮流已转变为由交流系统 II 向交流系统 I 输送电力。整流站和逆变站的换流器是相同的设备，只是运行状态不同而已。换流器在整流运行状态时，它的直流电压正方向与在逆变运行状态时相反，这是靠改变触发相位来实现的。