

实用电力电子技术丛书

电力电子技术 在电力系统中的应用

陈建业 蒋晓华 于歆杰 诸旭 编著

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



本书从应用的角度出发,跟踪国内外电力电子技术在交直流输电系统中应用的最新进展,并结合作者自身的研究成果,深入浅出地介绍了各种基于电力电子器件的电力系统控制器的结构、原理和应用实例。本书的特点是注意理论和实际的紧密结合,侧重于应用技术和实际电路的分析与计算。

本书可供电气设备制造公司和从事于电力系统运行、控制和自动化领域的中等以上的技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力电子技术在电力系统中的应用/陈建业等编著. —北京:机械工业出版社, 2007. 8

(实用电力电子技术丛书)

ISBN 978-7-111-22816-5

I. 电… II. 陈… III. 电力电子学 - 应用 - 电力系统 - 研究
IV. TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 177652 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: 贡克勤 责任编辑: 贡克勤 版式设计: 冉晓华

责任校对: 张 媛 封面设计: 张 静 责任印制: 杨 曦

北京机工印刷厂印刷 (北京双新装订有限公司装订)

2008 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 17.5 印张 · 429 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-22816-5

定价: 25.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379711

封面无防伪标均为盗版

前 言

电力电子技术作为电子技术的一个分支，其主要功能就是利用半导体器件的开关作用来实现对电能的控制与变换。

现代电力系统通常是以固定的频率和电压向用户提供交流电能，但用户所需电能的形式则往往千差万别，既可能是直流的，也可能是不同频率的交流的，并且所需电压也往往因负荷而异。由常规电力系统的元件，如发电机、变压器等来满足所有这些要求既不经济，往往也不可能。而电力电子装置则可以作为上述交流电力系统和用户之间的接口，通过受控的开关作用对电能进行不同的变换来满足用户不同的需求，所以自其问世以来，一直得到电力工业界的高度重视。

由早期的同步发电机励磁开始，电力电子技术就开始显示了其灵活、快速、高效的特点，特别是近年来随着电力电子技术和功率半导体集成技术的发展，电力电子器件的性能不断地提高，耐压和功率等级迅速增大，再加上计算机技术和控制技术的发展，使电力电子装置直接用于对电力系统一次回路进行控制成为可能。

随着科学技术的发展和人民对生活质量和环境保护的关注，现代社会对高质量电能的依赖程度日益提高。例如，虽然我国输电系统近年来经历了规模最大、速度最快的扩容，但仍不能满足国民经济和人民生活迅速发展的需求，为了解决夏天的酷暑导致的电力系统的负荷过重，仍需采用拉闸限电的方式，这极大地影响了各行各业的工作和人民的正常进行。又例如，北美2003年8月14日发生的大规模停电事故，这种小概率局部事件导致电网的崩溃则更进一步表明，电力工业作为国民经济的基础产业其安全稳定的供应直接关系到社会稳定和人民生活，也表明用电安全对于现代社会的极端重要性。

随着电网规模的扩大，设备数量急剧增加，除了加强电力系统的规划和管理外，电力安全稳定的问题的解决还有赖于通过技术的进一步发展，来增强电力网络自身的自我保护和调节能力。而利用高速电力电子技术使整个电网的运行如同一个大型的、高技术的“集成电路”，在降低系统对扰动的灵敏度的同时增加对现有设备的利用率，在系统发生故障时利用高速向系统中注入无功或改变潮流的方法对电网薄弱点提供支撑等措施，则是提高系统稳定性的一个根本的解决方案。

为了推动电力电子技术在电力系统中的应用和发展，向读者介绍电力电子技术在电力系统中应用的基本原理和适用领域，本书对上述技术进行了较深入的介绍。

本书的重点在于根据国内外输配电系统中电力电子技术应用的最新发展和作者在各自领域的研究结果，对用于电力系统的各种类型的电力电子装置的基本原理和其在电力系统控制中的作用进行讨论。同时，在内容安排上尽可能避免复杂的理论推导，而以定性的方法从物理概念入手对各种新型控制器的结构、原理和应用实例进行介绍，并特别地将侧重点放在对于应用技术和实际电路的分析与计算上面。

本书内容根据电力电子技术在电力系统中的应用领域分为电力电子技术与电力系统、柔性交流输电系统、直流输电系统的基本原理和超导储能在电力系统中的应用四部分。其中，

第1~3章由陈建业和于歆杰编著，第4章由蒋晓华和诸旭编著。

本书适于电气设备制造公司和从事于电力系统运行、控制和自动化领域的中等以上的技术人员阅读参考。

由于水平有限，书中难免存在一些不当之处，希读者给予批评指正。

作 者

目 录

| | |
|---|-----|
| 前言 | |
| 第1章 电力电子技术与电力系统 | 1 |
| 1.1 输电系统的运行特点和基本要求 | 1 |
| 1.1.1 电力系统运行的基本任务 | 1 |
| 1.1.2 交流输电系统的运行特点和存在的问题 | 4 |
| 1.1.3 直流输电系统的应用领域 | 6 |
| 1.1.4 交流输电的补偿技术 | 7 |
| 1.2 电力电子装置的基本原理 | 11 |
| 1.2.1 相控型变流器 | 13 |
| 1.2.2 自换流型变流器 | 17 |
| 1.3 大功率电力电子装置的结构 | 23 |
| 1.3.1 开关器件阀 | 23 |
| 1.3.2 冷却系统 | 30 |
| 1.3.3 多重化结构 | 40 |
| 1.4 电力电子技术在电力系统中的应用 | 55 |
| 第2章 柔性交流输电系统(FACTS) | 59 |
| 2.1 并联补偿器 | 61 |
| 2.1.1 并联无功补偿器的功能 | 61 |
| 2.1.2 静止无功补偿器(SVC) | 72 |
| 2.1.3 静止同步补偿器(STATCOM) | 105 |
| 2.2 串联补偿器 | 127 |
| 2.2.1 串联阻抗补偿及其在电力系统中的应用 | 128 |
| 2.2.2 串联移相补偿及其在电力系统中的应用 | 147 |
| 2.2.3 串联同步补偿器(SSSC)和动态电压恢复器(DVR)在电力系统中的应用 | 156 |
| 2.3 串并联混合补偿器 | 178 |
| 2.3.1 统一潮流控制器(UPFC)的基本原理 | 178 |
| 2.3.2 统一潮流控制器的应用实例 | 182 |
| 2.4 有源滤波器 | 191 |
| 2.4.1 谐波问题的现状 | 191 |
| 2.4.2 有源滤波器的原理和结构 | 194 |
| 2.4.3 有源滤波器的设计 | 200 |
| 2.4.4 有源滤波器的应用实例 | 207 |
| 2.5 柔性交流输电系统技术的现状和应用前景 | 213 |
| 第3章 直流输电系统的基本原理 | 217 |
| 3.1 直流输电系统的基本原理和发展概况 | 217 |
| 3.1.1 直流输电系统的发展历程 | 217 |
| 3.1.2 直流输电系统的优势和缺点 | 217 |
| 3.1.3 直流输电系统的基本原理和运行方式 | 219 |
| 3.1.4 直流输电系统的现状和发展前景 | 222 |
| 3.2 直流输电系统的工作原理及结构 | 223 |
| 3.2.1 直流输电系统整流侧的工作原理 | 223 |
| 3.2.2 直流输电系统逆变侧的工作原理 | 227 |
| 3.2.3 直流输电系统的结构 | 229 |
| 3.3 直流输电系统的谐波问题 | 230 |
| 3.3.1 直流输电系统的谐波分析 | 230 |
| 3.3.2 直流输电系统的谐波治理 | 232 |
| 3.4 直流输电系统的控制、故障和过电流保护 | 234 |
| 3.4.1 直流输电系统的控制 | 234 |
| 3.4.2 直流输电系统的故障与保护 | 237 |
| 3.5 直流输电技术的发展前景 | 238 |
| 3.5.1 器件和电路拓扑 | 238 |
| 3.5.2 轻型直流输电(HVDC Light) | 240 |
| 3.5.3 多端直流输电 | 242 |
| 3.5.4 其他直流输电技术发展前景 | 243 |

| | |
|--|-----|
| 第 4 章 超导储能 (SMES) 在电力系统中的应用 | 245 |
| 4.1 概述 | 245 |
| 4.2 超导储能的基本原理 | 245 |
| 4.2.1 电流源型变流器 | 247 |
| 4.2.2 电压源型变流器 | 250 |
| 4.3 超导储能在提高电力系统稳定性方面的应用 | 251 |
| 4.3.1 系统动态模型的建立 | 252 |
| 4.3.2 控制器的设计 | 255 |
| 4.3.3 数字仿真及动态模拟实验 | 256 |
| 4.4 超导储能在改善用户电能质量方面的应用 | 260 |
| 4.4.1 瞬时电压跌落 | 261 |
| 4.4.2 基于超导储能的动态电压补偿 | 262 |
| 4.4.3 基于超导储能的有源滤波装置 | 264 |
| 4.4.4 用于波动负荷补偿的超导储能装置 | 265 |
| 4.5 超导储能技术的最新发展 | 267 |
| 参考文献 | 269 |

第 1 章 电力电子技术与电力系统

电能作为一种特殊形式的二次能源，具有清洁、易于传输和可以方便地转换为各种不同形式的能量的特点，在我们的现代生活中得到越来越广泛的应用。比如，以脉冲信号和电磁波形式出现的电信号构成了现代 IT 行业计算机技术和通信技术的基础；而广泛应用的音响、照明、电冰箱等家用电器所需要的声、光、热能和各种电力拖动系统中所需要的机械能等其他形式的能量，也都是电能通过适当设备进行转换的结果。

科技的发展使现代生活日益依赖于优质、可靠的电能供应。据统计，全世界大约有 30% 的一次能源被用来产生电能。2001 年，我国电力消费占一次能源的比例已高达 41.7%。而发达国家的数字则远高于上述值，其中日本的电能需求量占一次能源供应的比例在 2000 年即达到 43%，预计 21 世纪该比例会达到 50% ~ 60%。

对电能的依赖使电力危机对经济发展和社会稳定的影响是严重的。美国加州 2001 年延续十余月、波及数十万用户的电力危机就给全世界上了生动的一课。造成加州电力危机的原因十分复杂，但危机的直接起因是电力严重短缺。随着家用电器的广泛应用和以硅谷为代表的高科技产业的发展使得近年来加州电力需求急剧增加。虽然仅从工艺能耗的角度来看，高科技产业是低能耗的，但由于高科技产品的质量乃至成品率是靠建筑环境来保证，是将传统工业工艺过程的能耗转变成建筑环境的能耗，所以实际上，高科技产业是所谓“环境依赖型”的高能耗产业。例如，硅谷附近圣何塞的互联网中心，高峰时期用电需求就高达 12 万 kW。据统计自 1994 年以来硅谷的电力需求以每年 6% 的速度增长。而由于经济、环保和管理的原因，加州十年来没有建设新的输配电设施，使得电力供需严重失衡。2001 年的电力危机不仅给加州带来约 200 亿美元的损失，而且对社会的稳定也产生了严重的影响。经济学家预计，电力危机对加州经济的威胁，比网络泡沫的破灭还要严重。电力危机后评论家纷纷指出，电没有替代品，是现代生活的“氧气”，安全可靠的电能供应是现代生活的重要基石。

1.1 输电系统的运行特点和基本要求

1.1.1 电力系统运行的基本任务

电力系统作为地球上最大的人造系统，是一个包括从电能的生产、传输，一直到消费的完整系统。它的基本任务是将电能电压、频率合格的前提下安全、可靠、经济地分配给各用电设备。而由于电能不能大量地存储，电力系统控制的最基本的一点就是要做到供电和用电的有功功率平衡，即电力系统内所有电源输出的有功功率必须同系统内所有的用电设备消耗的有功功率与输配电网中所有元件损耗的有功功率之和相等，并且按照需求的变化实时对潮流进行调整与控制。对于早期的电力系统而言，由于发电机就位于用电负荷附近，所以电能的传输不存在上述问题。但随着电力系统的扩展和环保要求的提高，发电厂正逐步从中心城市退出，用电中心的电能越来越依赖于由位于远端的发电中心通过长距离输电来提供。



利用交流电压进行大规模的电能传输有两个基本的条件：一是主要的同步电机必须能稳定地保持同步；二是系统各级的电压必须维持在其标称值附近。

电力系统在正常运行状态下应在标称频率下运行，因为系统中所用的所有电气设备均是按该频率进行设计和制造的，并只有在该频率下才能保证其运行的可靠性和经济性，所以频率对于电力系统而言是一个全局的量。系统的频率是和系统中各发电机组的转速直接相关的，而每台发电机的转速则取决于原动机输入的机械功率和施加于发电机系统侧负荷之间的平衡程度。当发电机供求不平衡时，就会引起其转速的变化。所谓主要同步电动机保持同步，就是指电力系统中所有发电机组输出的有功功率的总和与系统负荷功率总需求相平衡，从而维持系统中所有发电机组运转在同步转速。为了便于讨论，通常将系统简化为由一台发电机组和一台频率和电压均不变的无穷大容量的等效同步电动机所构成的单机无穷大系统，如图 1-1a 所示。正常运行时两台电机是同步的，均以角速度 ω_0 旋转。相应的相量图如图 1-1b 所示，图中，上角标 “'” 表示变化后的变量。

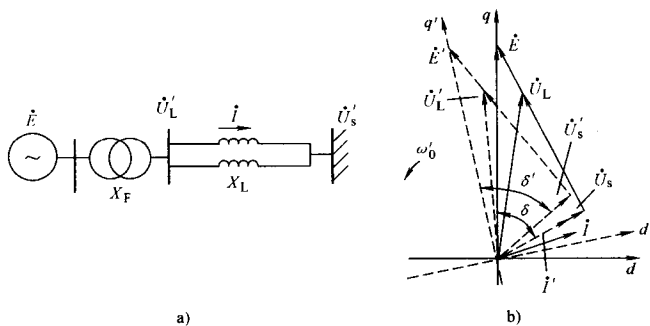


图 1-1 简单单机无穷大系统和相量图

a) 单机无穷大系统 b) 综合相量图

注： \dot{E} —发电机等效电动势的幅值，单位为 V \dot{U}_s —无穷大系统电压幅值，单位为 V

X_F —变压器电抗 \dot{U}_L —母线电压 ω_0 —电源角频率

正常运行时，两个相量 \dot{U}_s 和 \dot{E} 之间的夹角 δ （功率角）是常数。在扰动发生后，该发电机和系统失去同步， δ 将不再是常数，而是在不断地变化。相应地，发电机的同步功率将随时间振荡，其平均值几乎为零。由于原动机机械功率调整慢，因此发电机的过剩功率将继续使发电机加速，进入异步运行状态。此后，随着发电机转差率和异步功率的逐步增加和原动机的机械功率在调速器的作用下逐渐减小，两者将可能达到平衡，从而进入一个稳定的异步运行状态。但该状态中，发电机的电磁功率、定子电流和励磁电流均是交变的，并且随着时间变化大幅度地波动。图 1-2 所示为发电机异步运行时输出电压的频率为 51Hz，但无穷大等效同步电动机仍以同步转速运行（频率为 50Hz）时各参数的变化情况。此时 δ 在不断地变化，如图 1-2a、b 所示。线路中的电流 I_L 和发电机输出的视在功率 S 及其平均值有功功率 P_s ，如图 1-2c、d、e 所示，均将发生不断的振荡，致使系统不能正常工作。上述情况即称为系统不稳定。所以保持主要同步电动机同步，也即将各局部系统的频率偏离控制在允许的范围内是保证电力系统能可靠运行的一个基本条件，而频率偏移成为衡量电能质量的一项重要指标。

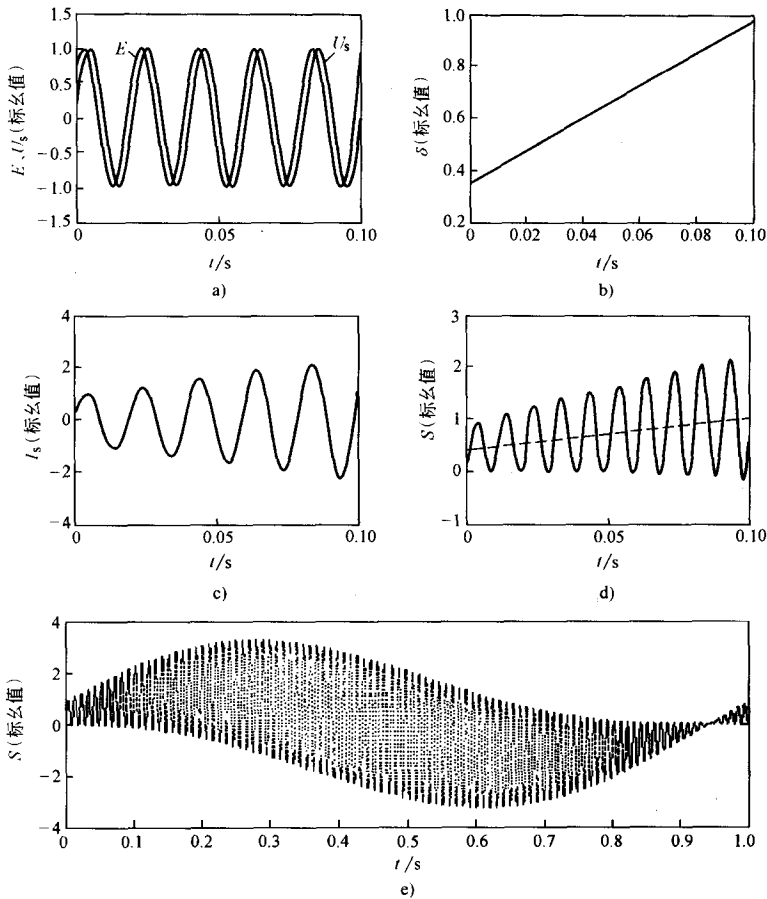


图 1-2 单机无穷大 (SMIS) 系统非同步响应

- a) 发电机电动势 E 和系统电压 U_s^* 的波形 b) 功率角 δ 的变化
c) 系统电流 I_s d) 视在功率 S^* 的变化 e) 视在功率 S^* 响应曲线

注：图中曲线为仿真结果。其中， δ 为功率角，标么值； S 为线路输送的视在功率，标么值； I_s 为线路电流，标么值； U_s 、 U 分别为无穷大母线电压和发电机端电压，标么值。

现代电力系统是以定电压的方式提供电能的，各种用电器均需在额定电压下才能正常发挥作用，偏离额定电压将导致用电器效率的下降，寿命减小，甚至损坏。但线路上各点的电压不仅取决于供电电压，还取决于流经线路的电流在线路电抗和变压器上所引起的压降，且其数值在系统中随地点而异，是一个局部参数。实际上，大多数用电负荷的功率因数是滞后的，也就是说它们需吸收无功功率。如果这部分无功功率也由发电机来提供，将使得线路上的所流过的负荷电流大于单纯向负荷提供能量转换所需的有功电流的值；再加上传输线和变压器中的电抗远大于电阻，在重负荷时线路的无功损耗也将迅速增加，这一切会引起系统电压的明显降落。更为严重的是，在系统发生大的扰动之后，系统中所存在大量的感应电动机等动态负荷的起动和电力电子装置，如高压直流输电换流器的作用，将导致无功功率需求的急剧增加，产生所谓的暂态电压不稳定以致电压崩溃问题。

电力系统控制的基本功能就是针对上述问题，在允许每一个用户可以根据自身需要随时



投切负荷的条件下，将所提供的电能的频率和电压控制在标称值附近一个不大的范围之中。这个看似简单的问题构成了对电力系统控制的最大挑战，特别是在考虑到每日和每年用电的尖峰负荷时就更是如此——巨大的负荷变化和大量的自由功率潮流不仅困扰着系统的运行调度，更在电网中形成大量的电能损耗和发电能力闲置。由于我国煤炭、石油和水利等资源集中在西部，而用电中心则集中在东部，特别是东南沿海，因此，长距离输电所带来的发电机和负荷之间的电阻和电抗的增大直接限制了系统所能传输的最大功率，再加上由于缺乏快速控制手段，传输过程中功率按阻抗分配，导致“功率绕送”甚至“功率倒送”问题，造成输电过程的瓶颈。另一方面，当长距离输电系统发生扰动时，借助传统的利用远端发电机的调速和电压控制系统进行控制将面临很大的控制延时，难以及时平息系统的振荡，而利用开关的投切来改变电网结构或断开故障又受到机械断路器动作速度过慢的困扰，成为影响系统暂态稳定问题的重要因素。采用在负荷中心设置固定的或开关投切的电容器和电抗器，固然可以改善系统的性能，但由于其在控制上存在的较大的延时，以及只能采用分级投切的方式，所以难以有效地提高系统的稳定性。上述输电系统在频率和电压方面所存在的稳定性问题，表明了对具有快速响应和精确调节功能的电力系统控制器的需求；近年来电力电子器件容量的迅速增大和其应用技术的不断发展，为电力电子装置进入输电系统的一次回路进行控制提供了可能。

1.1.2 交流输电系统的运行特点和存在的问题

下面对交流输电系统的运行特点和存在问题进行一个简单的介绍。图 1-3a 所示为一条输电线路的单相集中参数等效电路。

以送电端电压 U_s 作为参考信号，在线路的电气长度较短的条件下，上述电路送电端输

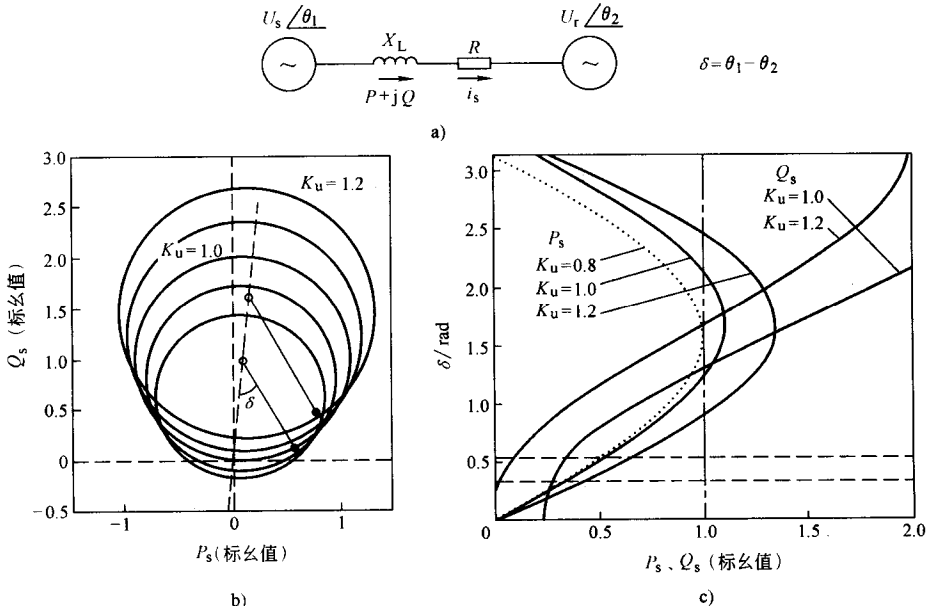


图 1-3 输电线路的单相等效电路及送电端输出功率与功率角的关系

a) 单相等效电路 b) 送电圆图 c) 功角曲线



出的有功和无功功率可以由下式给出：

$$\begin{aligned}
 P_s + jQ_s &= \dot{U}_s \dot{I}_s^* = U_s \left[\frac{U_s - U_r(\cos\delta - j\sin\delta)}{R + jX_L} \right]^* \\
 &= \frac{U_s(U_s - U_r\cos\delta)R + U_s U_r X_L \sin\delta}{R^2 + X_L^2} + \\
 &\quad j \frac{U_s(U_s - U_r\cos\delta)X_L - U_s U_r R \sin\delta}{R^2 + X_L^2} \quad (1-1)
 \end{aligned}$$

式中， $\delta = (\theta_1 - \theta_2)$ 为送电端电压 U_s 和受电端电压 U_r 之间的相位差，即功率角；上角标“*”表示共轭相量。

注意到实际系统中线路的电抗远大于电阻， $X_L = \omega L \gg R$ ，故在忽略线路损耗的条件下，上式中有功和无功功率可以分别表示如下：

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{U_s(U_s - U_r\cos\delta)R + U_s U_r X_L \sin\delta}{R^2 + X_L^2} \\
 &\approx \frac{U_s U_r}{X_L} \sin\delta \approx \frac{U_s U_r}{Z} \sin\delta \quad (1-2)
 \end{aligned}$$

式中， $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ 为线路阻抗。

式(1-2)表明，对于一个已知线路而言，在送电端电压 U_s 和受电端电压 U_r 不变的条件下，输电线路的传输功率可以用一个变量——功率角 δ 来进行描述。若图 1-3 所示单相等效电路为两端分别接有一台等效同步发电机和同步电动机的简单双机系统，该角度实际上表明两台同步旋转着的同步电机转子相对的机械位置。假定图 1-3a 所示系统中有功功率是由角度超前的等效同步发电机（送电端）输送到角度滞后的受电端等效同步电动机。在系统两端电压不变的条件下，电动机的负荷增加将导致电动机转速下降；如发电机仍维持原同步转速不变，两者转子之间的夹角——功率角 δ 就会增大，从而导致输入电动机的有功功率增加。这个过程一直进行到传输功率和负荷功率相等，达到新的功率平衡为止。此时电动机重新恢复以同步转速运行，系统保持稳定。同理可以得到为了满足线路无功功率的需求，送电端发电机输出的无功功率 Q 为

$$\begin{aligned}
 Q &= \frac{U_s(U_s - U_r\cos\delta)X_L - U_s U_r R \sin\delta}{R^2 + X_L^2} \\
 &\approx \frac{U_s(U_s - U_r\cos\delta)}{X_L} \approx \frac{U_s(U_s - U_r\cos\delta)}{Z} \quad (1-3)
 \end{aligned}$$

图 1-3b 给出当 $U_r = 1.0$ 、 $X_L = 0.4$ 、 $R = 0.04$ （标么值）、送电端电压 U_s 与受电端电压 U_r 之比 K_u 由 0.8 变到 1.2 时的送电圆图，送电圆圆周上各点与圆心的夹角即是功率角 δ 。因此可以根据送电端和受电端的电压比 K_u 和 δ 从功率圆图上得到送电端的有功和无功功率。当图 1-3b 中送电圆电压比 K_u 为 1.0 时，且当功率角 δ 在常用的范围 $0.349 \sim 0.524\text{rad}$ ，即 $20^\circ \sim 30^\circ$ 之间变化时，可以看到有功功率 P_s 会发生较大的变化；而无功功率 Q_s 则变化较小。而当送电圆的直径由 1.0 增大到 1.2 时，此时无功功率的变化将远大于有功功率的变化。观察图 1-3c 送电端输出的有功和无功功率与功率角 δ 的关系曲线同样可以得到上述结论。

图 1-3 中， $P_s = P_s/P_m$ ， $Q_s = Q_s/P_m$ ，分别表示线路传输的有功功率和无功功率的标么



值。其中 $P_m = 1/Z$ 是线路端电压标幺值 $U_s = U_r = 1.0$ 时, 在无补偿条件下线路所能传输的最大功率的标幺值。由此可见, 在正常运行状态 ($20^\circ < \delta < 30^\circ$) 时, 输电线路上传输的有功功率受端电压比变化的影响较小, 主要取决于送电端和受电端之间的相位差——功率角 δ 。而输电线上的无功功率则主要决定于线路端电压比。

随着功率角 δ 的增大, 线路所消耗的有功功率一直在持续增大。在忽略线路的电阻的条件下, 送电圆图的圆心位于纵轴上, 故所传输的有功功率将在功率角 δ 为 90° 时达到其最大值: $P_m = U_s U_r / X_L$, 如图 1-3c 中曲线 $K_u = 0.8$ 所示。在功率角 δ 达到 90° 后, 如果电动机负荷继续增加, 功率角 δ 也将继续增大, 但此时线路传输的有功功率反而会减小。受电端的电动机将由于得不到足够的有功功率而进一步减速。假如此时发电机转速保持不变, 两者之间的相位差将不断增加, 直至失去同步。换句话说, 系统将是不稳定的。上述这个理论上可以传输的最大功率就称为该线路的静稳定极限。由于输电系统在运行过程中总会受到各种各样的包括线路故障在内的干扰, 所以将一条未经补偿的线路运行在其静稳定极限附近是不切实际的。为了保证输电线路的正常运行, 对于未经补偿的线路在输电时留出一定的裕量, 比如将线路的功率角 δ 限制在 $20^\circ \sim 30^\circ$ 以内, 也即将传输的最大功率限制在其静稳定极限的一半, 是大多数电力公司的实践。因此, 采用何种方式最大限度地提高现有线路的传输功率已成为全世界电力工业界关注的焦点。由式 (1-2) 可以看出, 对于交流输电系统而言, 可以通过提高输电系统的电压, 增大线路的功率角, 以及减小输电线路的阻抗来达到上述目的。

我国目前主干网的最高输电电压已经达到 500kV, 进一步提高输电电压会带来一系列技术和经济问题; 而利用增加并行回线的方法减小线路阻抗, 除了存在经济性的问题以外, 还受到难以获得新的输电走廊的困扰。因此, 采用直流输电进行超长距离输电, 以及引入各种补偿方法以减小交流线路的等效阻抗就成为 21 世纪电力系统控制器的两个并行的发展方向。

1.1.3 直流输电系统的应用领域

在许多环境下, 在电力系统中引入直流畅络线具有明显的经济和技术上的优点。在某些特定条件下, 它甚至可能是输送电能的唯一可行的方式。例如, 当被连接的两个交流系统不能同步时, 以及当传输距离和陆地或海底电缆的长度太长以致不能稳定地和经济地进行交流输电时, 采用直流系统就成为唯一的选择。此时, 交流在一个换流站被转换成直流, 然后将其输送到第二个换流站, 再转换回交流, 并被输入另一个电网。在“背靠背”的高压直流输电项目中, 由于两个换流站安装在同一个厂房中, 因此直流输电线的长度为零。高压直流输电的应用包括三大领域, 并且通常任何项目均涉及其中两个或三个领域。其三个领域包括:

- 1) 在采用交流输电为不经济、不可行, 或受到环境限制的条件下进行大量的电能输送。
- 2) 在不同频率的系统, 或者在虽然具有大体相同的标称频率但不能实现可靠地同步运行的系统 (不同步的或隔离的系统) 之间进行互连。
- 3) 利用快速和精确地控制高压直流传输功率来改善交流系统的性能。

高压直流输电被实践证明是可以提供非常高的可靠性和可用率的输电方式。到目前为止, 在全世界已有总容量约达 70000MW, 超过 60 个主要的高压直流输电系统投入运行, 其中单个项目的容量在 20 ~ 6300MW 不等。



实际上,早期的输电方式采用的就是直流输电,当时由于发电机和负荷距离很近,所以可以将直流电力直接输送给用户。但随着用电负荷的增加和输电距离的加大,在利用输电线输送电能时,负荷电流流经线路电阻所引起的导线发热、电压降落和电能损耗变得不可忽略。所以提高输电电压以减小线路电流就成为一个有效的方法。交流变压器的出现使得我们可以按需要自行调节交流电压,但直流系统中却没有类似的可以简单地改变电压的设备,因此交流输电就成为一个自然的选择而逐渐取代了直流输电。但是随着负荷中心和电源中心距离的不断增大,交流系统送电容量和稳定性逐渐成为需要解决的问题。而直流系统由于其输送的功率本质上是具有有功功率,而没有无功功率,所以线路上的压降和损耗小,在同样的线路条件下可以传输更多的功率,再加上不存在同步运行的稳定性问题,所以随着电力电子技术的发展,直流输电再次提上日程。但是,由于直流输电结构复杂,换流设备价格较贵,所以通常认为传输距离在300~500km以上才有优势。我国幅员辽阔但经济发展极不均衡,80%以上的水利和煤炭资源位于我国西部和北部,而80%以上的经济容量和78%的电能消费却集中在东部和中部地区。为了将西部的电力长距离输送到经济发达的珠江三角洲、长江三角洲和京津地区,直流输电成了“西电东送”规划中的一个重要组成部分。

1.1.4 交流输电的补偿技术

作为与直流输电互补的一种技术——“补偿”指的是通过对交流系统输送的有功和无功功率的控制来达到提高现有线路最大传输功率的方法。由式(1-1)~式(1-3)可以看到,除了提高线路两端的电压水平以外,还可通过控制线路的阻抗和输出入端的相移来达到提高线路传输功率的目的。下面分别对后者加以讨论。

图1-4a所示为一个三相对称系统的线电压和相电压的相量图,可以看到其中任一相(例如A相)的相电压和其他两相所构成的线电压之间相互垂直,后者落后或超前前者 90° 。这给我们一个启示,即如果利用所谓的励磁变压器对上述线电压进行变压,将一个与前述相电压相垂直,且幅值适当的电压与该相电压相串联,就构成如图1-4b所示的系统。其对应的A相电压的相量图如图1-4c所示。在没有补偿的条件下,其传输功率如式(1-1)~式(1-3)所示的取决于送电和受电端电压之间的夹角。在忽略线路有功损耗的条件下,接入移相变压

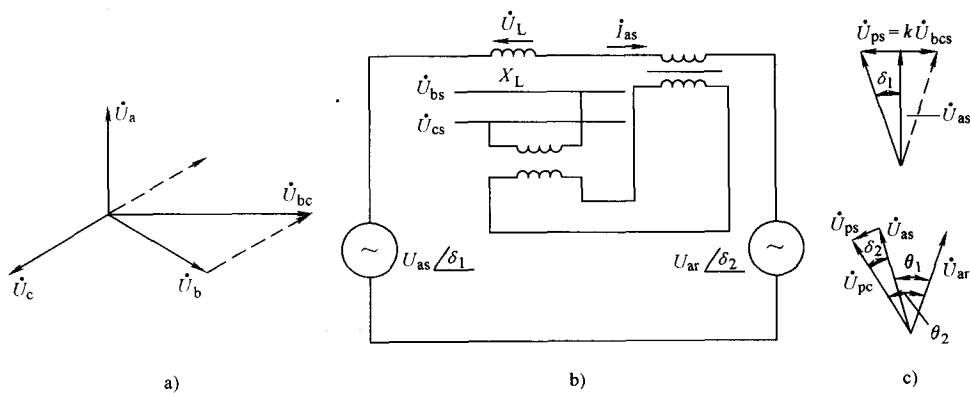


图1-4 移相变压器补偿原理图

a) 系统电压相量图 b) 单相等效电路 c) 补偿电压相量图



器，相当于在系统中注入了一个和系统相电压成比例的超前/滞后正交电压分量 $\dot{U}_{ps} = k\dot{U}_{bc}$ ， \dot{U}_{ps} 与系统相电压的相量及 \dot{U}_{pc} 成为新的送电电压，其与受电端电压 \dot{U}_{ar} 之间的夹角由原系统的 $\delta_1 = \theta_1 - \theta_2$ ，变为 $\delta_2 = \delta_1 + \arctan(k\sqrt{3})$ ；从而改变了线路的功率角，实现了对线路传输的有功功率的调制。这个结果表明，可以通过调节串接到系统中的电压的幅值和方向来改变线路的功率角 δ ，也即通过改变相移来达到控制线路潮流的目的。

对线路阻抗的控制又可以分为串联和并联两种方式。首先对采用无源器件进行并联补偿进行讨论。若设前述简单双机系统的整个线路的容性并联电纳为 B_c ，如其线路中点接入一个电纳为 B_{sh} 的并联补偿装置，而将每一半线路均以 π 形等效电路来表示，同时将同步发电机的内阻计入相应的传输线阻抗之中，可以得到如图 1-5a 所示的等效电路。为了简化讨论，如果我们进一步假定输出/输入两端同步发电机电压保持恒定，同时由于两端同步发电机一直在吸收电容器产生的无功功率，所以忽略两端的容性并联电纳 $B_c/4$ ，则电路可以进一步简化如图 1-5b 所示。

此时线路中点并联电纳为

$$B_T = \frac{B_c}{2} - B_{sh} = \frac{B_c}{2}(1 - k_m)$$

式中， k_m 为线路的补偿度， $k_m = \frac{2B_{sh}}{B_c}$ 。

当 B_{sh} 为感性时， k_m 为正，而当 B_{sh} 为容性时， k_m 为负。

为便于讨论，对图 1-5b 进行星—三角变换，得到图 1-5c 所示的等效电路，且

$$X_{sr} = \frac{X_L}{2} + \frac{X_L}{2} - \frac{X_L^2}{4X_T} = X_L(1 - K_s) \quad (1-4)$$

式中， K_s 为线路的并联补偿度，由 $K_s = \frac{X_L}{4} \left(\frac{B_c}{2} - B_{sh} \right) = \frac{X_L B_c}{8} (1 - k_m)$ 给出。

据此补偿后线路传输的有功功率可以由下式给出：

$$P = \frac{U_s U_r}{X_L(1 - K_s)} \sin\delta \quad (1-5)$$

在线路两端电压相等 $U_s = U_r = U$ 的条件下，线路中点电压为

$$U_m = \frac{U}{1 - K_s} \cos(\delta/2) \quad (1-6)$$

式 (1-6) 表明，补偿器电纳 B_{sh} 的容性增加，可以有效地对线路串联电抗所造成的压降进行补偿，从而减小线路传输功率时线路中点电压降落，同时增大线路的最大可传输功率。当 $1 - K_s = \cos(\delta/2)$ 时，线路中点电压的幅值等于线路两端电压的幅值，此时线路传输的有功功率可以记为

$$P = \frac{U^2}{X_L/2} \sin(\delta/2) \quad (1-7)$$

这相当于将线路的长度缩短了一半，相应地，线路所能传输的最大功率也提高了一倍，如图 1-5d 所示。而为了将线路中点电压补偿到与端电压相等，线路中点补偿电纳所需产生的无功功率为

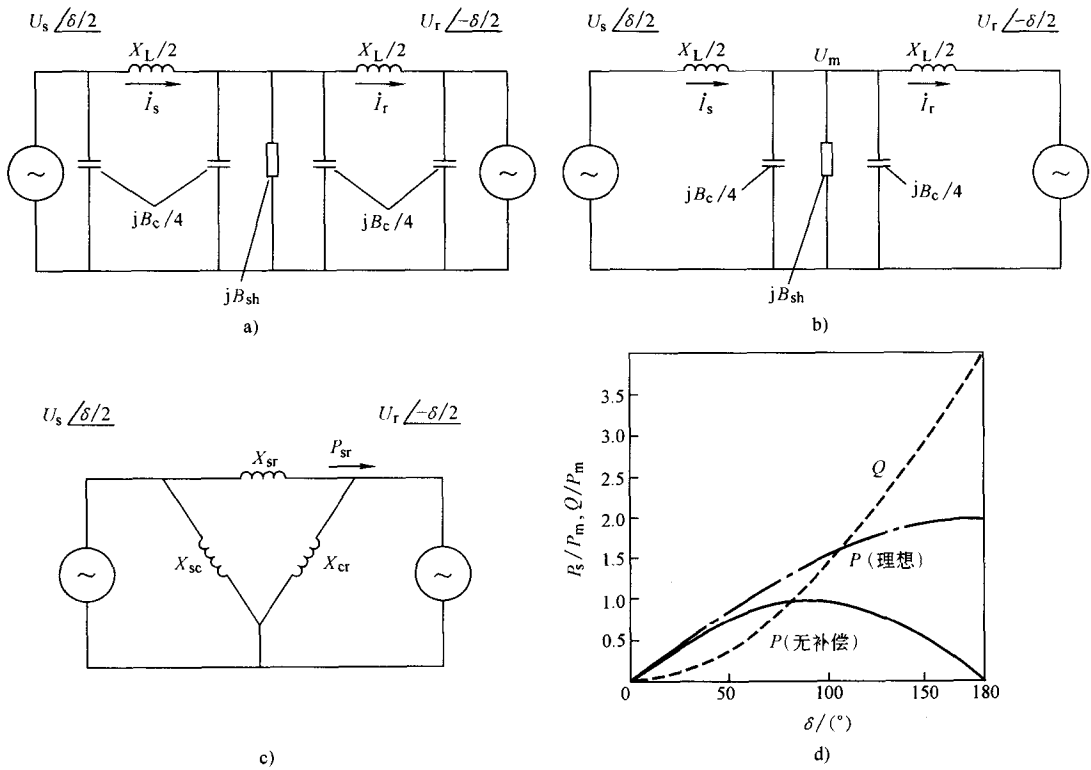


图 1-5 具有中点并联补偿器的等效输电线路图

a) 双 π 形等效电路 b) 简化 π 形等效电路 c) 三角形等效电路 d) 系统功角曲线

注：图中下标不是拼音，而是最早采用上述模型的日本作者所用的标注。sc 表示送电端 s 到补偿输出；cr 表示补偿端到受电端；sr 表示送电端到受电端；sh 表示并联。

$$\begin{aligned}
 Q &= B_{sh} U_m^2 = \frac{U^2}{(1 - K_s)^2} \cos^2(\delta/2) B_{sh} = \frac{B_{sh} U^2}{2(1 - K_s)^2} (1 + \cos\delta) \\
 &= \frac{k_m B_c U^2}{4(1 - K_c)^2} (1 + \cos\delta)
 \end{aligned} \tag{1-8}$$

显然线路中点并联电纳补偿在控制线路电压和提高传输功率方面具有显著的效果。

串联补偿的中心概念是利用串联电容器来抵消部分线路电抗，从而在给定的传输功率水平下减小了功率角，提高了线路可以传输的最大功率。在忽略线路中并联电容器和电抗器的条件下，图 1-3 所示的简单双机系统的在接有线路中点无源串联补偿电容时的等效电路如图 1-6a 所示。

由此可以得到线路的功率传输特性为

$$P = \frac{U_s U_r}{X_L - X_c} \sin\delta = \frac{U_s U_r}{X_L (1 - K_c)} \sin\delta \tag{1-9}$$

式中， K_c 为串联补偿度， $K_c = X_c / X_L$ 。

而当两端电压幅值相等即 $U_s = U_r = U$ 时，系统中的电流和串联电容两端的电压的幅值

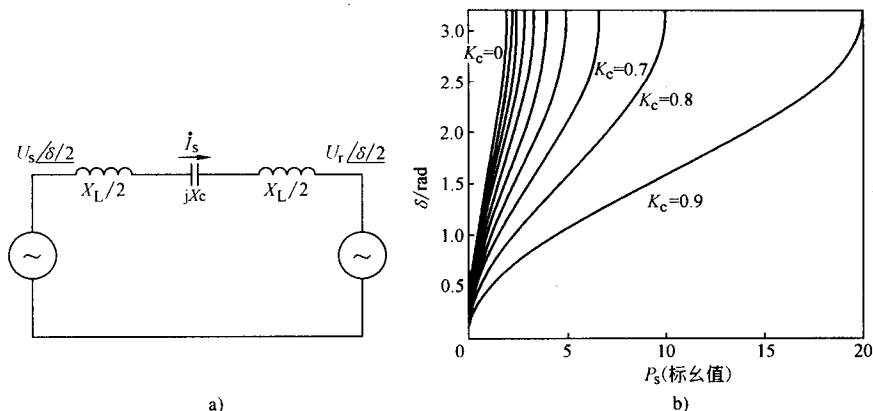


图 1-6 串联电容补偿等效电路和功角特性

a) 串联电容补偿等效电路 b) 功角特性

可以分别用下式给出：

$$I_s = \frac{U_s \angle \delta/2 - U_r \angle -\delta/2}{j(X_L - X_c)} = \frac{2U \sin(\delta/2)}{X_L(1 - K_c)} \quad (1-10)$$

$$|U_c| = \frac{2U \sin(\delta/2)}{X_L(1 - K_c)} X_c = \frac{2U \sin(\delta/2)}{(1/K_c - 1)} \quad (1-11)$$

显然，串联电容补偿可以将线路的最大传输功率增大 $1/(1 - K_c)$ 倍，从而可以用来调节并联线路的负荷分配，以及提高稳定传输有功功率的距离。

串联电容补偿是存在一定的限度的，当补偿度 K_c 过大时（例如超过 0.8），两端同步电机转子间相位差或线路阻抗的微小变化均将引起很大的电流变化，使得系统在受到干扰时难以对急剧变化的暂态电压和电流进行控制。实践中串联补偿度的上限是 0.8 左右，其典型值在 0.25 ~ 0.70 之间。此外，上述串联电容与线路电抗在一起构成串联谐振回路，在一定条件下可能导致次同步振荡（SSR），以致发电机轴的破坏，从而限制了无源串联补偿在电力系统中的应用。

虽然上述静止的无源补偿装置可以有效地提高线路的功率传输水平，也即静稳定极限，但如采用固定的补偿装置，在同一补偿水平下，随着线路所传输的功率水平的变化，线路中点的电压也会随之发生变化（见图 1-7a），而且在同一功率水平，随补偿装置的电纳不同，中点电压也将发生变化。为了满足交流电力传输的第二个基本要求，即线路各点电压必须保持在额定电压附近，则补偿装置也必须随着传输功率的变化而改变其电纳。式（1-5）表示的功率特性为一正弦曲线，其幅值随补偿度 K_c 和 δ 而变化，产生一族正弦曲线（见图 1-7b），每一条曲线对应一个补偿度 K_c 。中点补偿器的作用是随着传输功率的变化，提供所需的无功功率以维持中点电压的基本恒定，此时运行点由某一个确定的 K_c 值对应的正弦曲线平滑地过渡到另一个 K_c 确定的正弦曲线，也即沿 A-B-C-D 运行，构成式（1-7）所描述的轨迹。

值得注意的是图 1-7b 中 C 点所对应的角度大于 1.57rad (90°)，位于相应功角曲线的不稳定侧，此时系统之所以仍能稳定运行是由于每当功率角 δ 增加时，补偿器立即改变相应的补偿度来响应其变化，从而保持线路中点电压为恒定，使运行点可以沿式（1-7）给定的稳

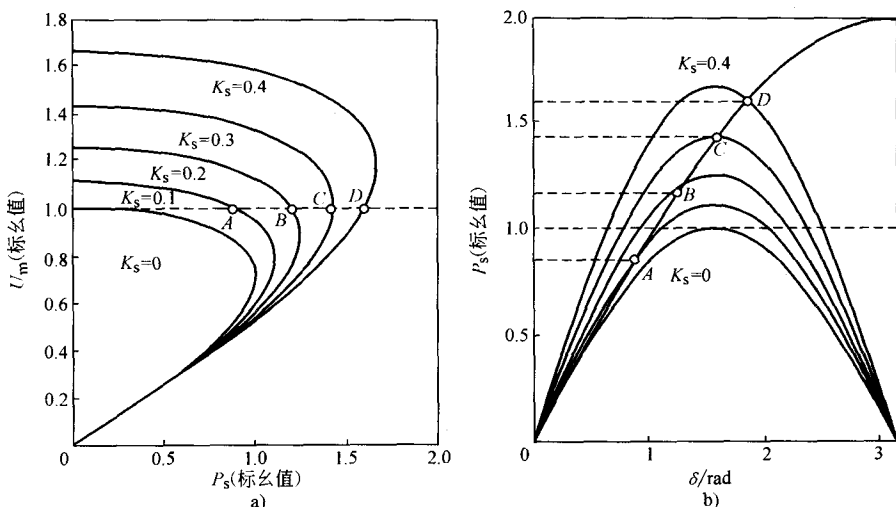


图 1-7 电路中点并联补偿器的动态运行轨迹

a) 电路中点电压和传输功率的关系 b) 并联补偿的功角关系

定运行轨迹运动。

从以上讨论可以看到，利用连续可调电纳的补偿方式可以有效地维持线路中点的电压水平，同时提高既有线路的功率传输能力。但为了达到上述曲线所给出的补偿效果，一定要在系统发生扰动时，对补偿器的电容和电感进行快速和连续地调节，在系统故障时更是要求补偿装置能及时和准确地投入。由于常规的机械开关来投切电容器或电抗器时，机械惯性限制了开关的动作速度，不能达到在精确时刻快速控制的目的，而且为了抑制功角振荡，补偿器的电容和电感可能需要反复地投入和切除，这又将导致机械开关操作结构和触点难以避免的磨损，再加上高压开关的价格较为昂贵，并联补偿器电容或电感的组数将受到限制，还有过大的补偿级差使得控制过粗，不能实现连续平滑调节，因此可以连续调节且可以高速响应的控制器是现代电力系统向用户提供高质量电能的根本保证，而近年来迅速发展的电力电子技术正是实现上述要求的最佳选择。

1.2 电力电子装置的基本原理

电力电子技术作为电子技术的一个分支，它的作用就是利用半导体器件的开关功能实现对电能的控制与变换，以适应不同领域中应用的需要。现代电力系统通常是以固定的频率和电压为用户提供交流电能，但用户所需的电能形式则往往千差万别，既可能是直流的，也可能是不同频率的交流的，而且所需电压也因负荷而异。由电力系统来满足所有这些要求既不可能，也不经济。电力电子装置作为上述交流电力系统和用户之间的接口，可以通过不同的变换方式来满足用户不同的需求。高速的半导体开关器件和相应的控制器是电力电子设备—变流器的核心，而按其功能不同，变流器通常分为整流器（交直变换器）、逆变器（直交变换器）、交流变

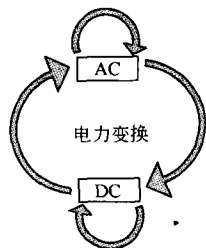


图 1-8 电力变换的基本类型