

耿建风 主编

柔性交流输电系统 应用技术



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

耿建风 主编

柔性交流输电系统 应用技术



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 简 介

柔性交流输电系统 (Flexible AC Transmission Systems, FACTS) 技术是目前电力系统领域最具有活力的技术之一,也是目前研究的热点和重点。本书主要介绍了 FACTS 技术相关的基础和应用知识。内容主要包括 FACTS 技术的概述,电力电子技术与电力电子器件,并联型、串联型以及混合型 FACTS 装置原理及在电网中的应用,DFACTS 装置原理及在电网中的应用等。

全书内容理论联系实际,可供电力系统相关专业人员阅读,也可供电力院校、研究机构相关师生学习参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

柔性交流输电系统应用技术/耿建风主编. —北京: 中国电力出版社, 2010. 12

ISBN 978—7—5123—1161—9

I. ①柔… II. ①耿… III. ①交流—输电—电力系统
IV. ①TM721. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 241295 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 http://www.cepp.sgcc.com.cn)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 2 月第一版 2011 年 2 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 12.75 印张 194 千字

印数 0001—1500 册 定价 35.00 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



随着科技和经济的发展，我国电网的规模越来越大，人们对其可靠性和可控性的要求也越来越高。要提高电网的安全运行水平和提供良好的电能质量，除了需要电网的合理规划和可靠的电力设备外，先进的调节控制手段也是必不可少的。电网的“可控性”在某种程度上决定了电网的安全和经济运行。

随着电力电子技术的飞速发展，大容量电力电子技术开始在电力系统控制中得到应用。具有快速的、可频繁操作的、可靠动作的电力电子开关开始逐步取代机械开关。大功率电子开关的应用，在电力系统中引起了一系列的革命，使现代电力系统的控制调节更加灵活和便捷，并由此诞生了柔性交流输电系统（Flexible AC Transmission Systems, FACTS）。FACTS是综合电力电子技术、微处理和微电子技术、通信技术和控制技术而形成的用于灵活快速控制交流输电的新技术。它的诞生是与智能集成电路技术及大功率电力电子技术的发展分不开的。正是由于大功率电力电子技术和智能集成电路技术的结合，才促成了FACTS概念的诞生，并进一步为其迅速持续的发展创造了条件。

FACTS技术最主要的目的是使不可控的电网变得可控，使原本不容易控制的参数变得更加容易控制。客观上讲，FACTS技术的产生是现代电网发展的需要，是解决电网运行和发展中各种困难的需要。现代电网规模越来越大，结构越来越复杂，对电能质量的要求越来越高，同时对清洁能源和低碳能源的要求也越来越高。在这种情况下，对电网可靠、经济、稳定运行的要求也越来越高，传统的机械控制方法越来越不适应电网的发展。而FACTS技术在控制电网潮流、提高系统稳定性方面具有独特的优点，因此得到了迅速发展。FACTS技术（技术系统应用技术及其控制器技术）已被国内外一些权威的输电工作者预测确定为“未来输电系统新时代的三项支持技术（柔性交流输电技术、先进的控制中心技术和综合自动化技术）之一”。

FACTS装置是FACTS技术的核心，也是实现电力系统柔性化的具体实施途径。本书立足于实际，力图在阐述FACTS装置基本原理的同时，通过FACTS

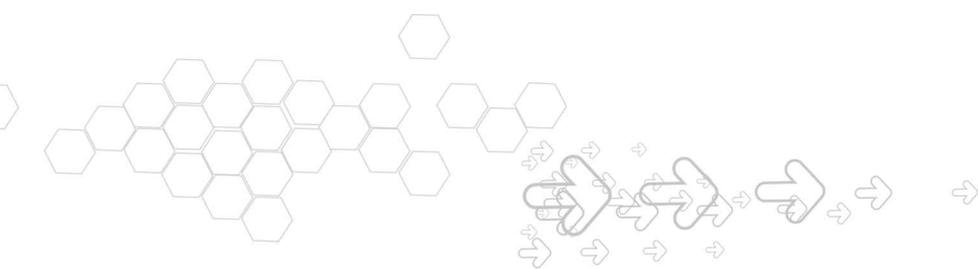
技术在电网中的实际应用对其进行进一步说明。

本书主要由三大部分构成。第一部分是 FACTS 技术概述。这部分是全书的基础，主要阐述了 FACTS 技术的发展过程及基本概念，对 FACTS 技术的发展背景、应用优点、目前实施状况等进行了概述。第二部分是电力电子技术与电力电子器件。电力电子器件是 FACTS 装置的基础器件，正是由于电力电子技术的大力发展才引发了 FACTS 技术的广泛应用，这部分主要介绍了目前在 FACTS 技术中应用到的各种电力电子器件。第三部分是各类 FACTS 装置的原理及在电网中的应用，力图通过实例使 FACTS 技术清晰明了的展现在广大读者眼前。

由于编写时间仓促，因此难免有不妥之处，望广大读者不吝指教。

编 者

2010年 11月



前言

第 1 章 柔性交流输电系统 (FACTS) 技术概述	1
1.1 FACTS 的背景、优点及其发展	1
1.2 FACTS 控制器	6
第 2 章 电力电子技术与电力电子器件	9
2.1 概述	9
2.2 电力电子技术	9
2.3 电力电子器件	13
2.3.1 电力电子器件概述	13
2.3.2 电力电子器件分类	13
2.3.3 主要电力电子器件	14
2.3.4 电力电子器件的驱动及保护	38
2.4 电力电子变换器	44
2.4.1 电力电子变换器的分类及基本概念	44
2.4.2 电流型变换器	46
2.4.3 电压型变换器	47
第 3 章 并联型 FACTS 装置原理及在电网中的应用	52
3.1 静止无功补偿器 (SVC)	56
3.1.1 SVC 概述	56
3.1.2 SVC 的应用现状及发展	60
3.1.3 SVC 的主要设备和关键技术	63
3.1.4 SVC 在电网中的应用实例	66

3.2	静止同步补偿器 (STATCOM)	82
3.2.1	STATCOM概述	82
3.2.2	STATCOM的应用现状及发展	87
3.2.3	STATCOM和 SVC的比较	91
3.2.4	STATCOM在电网中的应用实例	95
第 4 章	串联型 FACTS 装置原理及在电网中的应用	109
4.1	晶闸管控制串联电容器 (TCSC)	115
4.1.1	TCSC的数学模型	117
4.1.2	TCSC的控制技术	119
4.1.3	TCSC在电网中的应用实例	121
4.2	静止同步串联补偿器 (SSSC)	144
第 5 章	混合型 FACTS 装置原理及在电网中的应用	146
5.1	统一潮流控制器 (UPFC)	146
5.1.1	UPFC概述	146
5.1.2	UPFC基本原理	147
5.1.3	UPFC在电网中的应用实例	152
5.2	其他混合型 FACTS装置	155
第 6 章	DFACTS 装置原理及在电网中的应用	158
6.1	有源电力滤波器 (APF)	158
6.1.1	APF概述	158
6.1.2	APF基本原理	164
6.1.3	APF在电网中的应用实例	169
6.2	动态电压调节器 (DVR)	173
6.2.1	DVR概述	173
6.2.2	DVR基本原理	175
6.2.3	DVR在电网中的应用实例	180
6.3	固态断路器 (SSCB)	184

6.3.1	SSCB概述	184
6.3.2	SSCB的应用	185
6.3.3	SSCB目前存在的问题	188
6.4	配电用静止同步补偿器 (DSTATCOM)	189
第7章	展望	191
参考文献		193



第 1 章

柔性交流输电系统 (FACTS) 技术概述

1.1 FACTS 的背景、优点及其发展

现代电网的主要特征之一是采用电网互联，电网互联会形成越来越大的巨型电力系统，这一方面为能源的远距离传输奠定了基础，提高了供电可靠性；另一方面实现了电能资源的优化配置和规模效应。但电网互联在获得诸多好处的同时，也存在一系列的问题，其中重要的一项就是调节控制。

要提高电网的安全运行水平和提供良好的电能质量，除了需要电网合理规划和可靠的电力设备外，先进的调节控制手段也是必不可少的。电网的“可控性”在某种程度上决定了电网的安全和经济运行。因此，针对电网的控制调节手段，很多学者和现场工程师都进行了大量的研究，并提出了一系列的控制手段，如采用发电机励磁控制提高输电线路输送容量等。长期以来，调节控制主要集中在对系统潮流进行控制和改善系统稳定性以提高传输容量这两个方面，针对这两个问题，一些新设备如串联电容、并联电容、并联电抗等开始投入电网使用。但这些设备的共同特点是按照固定的、机械投切的、分接开关转换的方式来设计，而机械开关动作速度慢，几乎无法控制暂态稳定。此外，由于机械开关动作过频容易被损坏，因此这些设备不能频繁操作。这些缺点严重制约了其对系统进行连续快速控制的能力。

随着电力电子技术的飞速发展，大功率电力电子技术开始在电力系统控制中得到应用。动作快速、可频繁操作、可靠性高的电力电子开关开始逐步取代机械开关。大功率电力电子开关的应用，引发了电力系统的一系列革命，使现代电力系统的控制调节更加灵活和便捷。

柔性交流输电系统 (Flexible AC Transmission Systems, FACTS) 技术, 是综合电力电子技术、微处理和微电子技术、通信技术和控制技术而形成的用于灵活快速控制交流输电的新技术。它的诞生与智能集成电路技术及大功率电力电子技术的发展是分不开的。正是由于大功率电力电子技术和智能集成电路技术的结合, 才促成了 FACTS 概念的诞生, 并进一步为其迅速持续的发展创造了条件。柔性交流输电系统的建设过程, 是以原有交流输电系统为基础, 根据需要选择利用灵活交流输电系统技术及功率电子设备, 加以逐步改造, 形成柔性交流输电系统的过程。

FACTS 技术历史上的一个标志性事件是 20 世纪 80 年代中期, 由美国电力科学研究院 (EPRI) N.G.Hingorani 博士在 1986 年的 PES (Power Engineering Society) 的夏季会议上首次提出了 FACTS 概念, 即应用大功率、高性能的电力电子元件制成可控的有功电源或无功电源以及电网的一次设备等, 以实现了对输电系统的电压、阻抗、相位角、功率、潮流等的灵活控制。这使得原本基本不可控的电网变得可以全面控制, 从而大大提高电力系统的高度灵活性和安全稳定性, 使得现有输电线路的输送能力大大提高。

可以看出, FACTS 技术最主要的作用是使不可控的电网变得可控, 使原本不容易控制的参数变得更加容易控制。客观上讲, FACTS 技术的产生是现代电网发展的需要, 是解决电网运行和发展中各种困难的需要。现代电网规模越来越大, 结构越来越复杂, 对电能质量的要求越来越高, 同时对清洁能源和低碳能源的要求也越来越高。在这种情况下, 对电网可靠、经济、稳定运行的要求也越来越高, 传统的机械控制方法越来越不适应电网的发展需要。而 FACTS 技术在控制电网潮流、提高系统稳定性方面具有独特的优点, 因此得到了迅速发展。FACTS 技术 (技术系统应用技术及其控制器技术) 已被国内外一些权威的输电工作者预测确定为“未来输电系统新时代的三项支持技术 (柔性交流输电技术、先进的控制中心技术和综合自动化技术) 之一”。

采用 FACTS 技术主要有以下几个优点:

(1) 在较大范围有效地控制潮流。潮流控制是电网控制调节的重要内容。除了线路载流能力有限需要进行潮流控制外, 实现最优潮流、降低电网损耗、系统运行的稳定及电力市场人为需要等, 都需要对电网中的潮流

分布进行有效的控制调节。一般而言,电力系统潮流是由电源、负荷及输电网决定的,而其中电源及负荷都不能很好的实现潮流的控制调节,因此通常都是通过对输电网的调节来实现潮流控制的。最常用的控制方法是通过串联阻抗补偿及并联无功补偿实现,而这些都属于 FACTS 技术的应用范畴。

(2) 提高系统的稳定性,提高电网传输容量。影响电网传输容量的因素很多,如热稳定极限、电力系统稳定性限制及绝缘限制等。但一般而言,电力系统稳定性限制决定的传输容量极限小于其他如热稳定和绝缘限制等。如常规 500kV 交流输电线路,其自然功率安全送电极限为 1000MW,线路的热极限为 3000MW,而受电力系统稳定性约束的功率为 600~1700MW。因此,要提高线路的传输容量,首要目标是提高电力系统稳定性,最终目标是将电网传输容量提高到热稳定极限。对于已建成的电网,提高其稳定性极限的方法是在运行过程中采用各种控制手段来提高其稳定性,而对 FACTS 技术的应用,则是目前提高系统运行稳定性的主要方法。一条 500kV 线路采用 FACTS 技术后,可使其输送能力提高 50%~100%;备用发电机组容量可从典型的 18%减少到 15%,甚至更少。

(3) 优化整个电网的运行情况。在电网中应用 FACTS 技术,有助于建立全国统一的实时控制中心,实现全系统的优化控制,以提高全系统运行的安全性和经济性。

(4) 改变交流输电的传统应用范围。成套应用并协调控制的 FACTS 技术将使常规交流输电柔性化,改变交流输电的功能范围,使其在更多方面发挥作用。为提高现有输电线路的输送能力,应用 FACTS 技术的方案往往比新增建一条线路更便宜,它甚至可以扩大到原本属于直流输电专用的应用范围,如定向传输电能、功率调节、延长水下或地下交流输电距离等。

自 1986 年 N.G.Hingoran 博士提出 FACTS 概念之后,FACTS 技术得到了迅速发展。1992 年德国西门子公司研制出第一台晶闸管控制串联电容器 (TCSC) 装置,并在美国西部电力公司得到应用;1997 年美国电力公司、西屋公司和美国电力科学研究院联合研制出容量为 ± 320 MVA 的统一潮流控制器 (UPFC);1997 年,IEEE/PES 委员会成立 DC&FACTS 分委会,对 FACTS 技术的术语和应用标准进行了规范。目前,在我国电网中,FACTS

技术也得到了广泛的应用，广东江门、郑州小刘、东北沙窝、湖南云田鸡、武汉凤凰山等 500kV 变电站有多台 SVC 投运。1999 年，清华大学和河南省电力公司合作研制出我国首台工业化容量为 $\pm 20\text{Mvar}$ 的 STATCOM 装置，2000 年 6 月， $\pm 20\text{Mvar}$ STATCOM 装置在并网试运行 1 年后，通过当时国家电力公司组织的科技成果鉴定。2003 年清华大学与上海市电力公司联合承担上海电网黄渡分区 $\pm 50\text{Mvar}$ STATCOM 示范工程，该工程已于 2005 年底投入运行。2004 年底分别投入运行的国家电网示范工程——甘肃碧成 220kV TCSC 和辽宁鞍山红一变 SVC，为我国 TCSC 和 SVC 工业化打下基础，标志着国内可以独立设计制造串补、可控串补和 SVC 成套设备。2008 年，我国东北电力系统首次在伊敏—冯屯输电线路冯屯侧安装 TCSC，以解决伊敏电厂两台 500MW 和两台 600MW 发电机经双回 500kV 线路向东北电网主网送电时存在严重暂态稳定问题。目前“西电东送”的主交流通道——天生桥—平果双回线装设了 40% 固定串补和 10% 可控串补 TCSC 设备，以充分利用已有的交流线路，尽可能输送更多的功率。此外华东电网及江西电网中一些 FACTS 技术也得到了应用。随着 FACTS 技术的不断发展，新器件的不断应用，高压大容量设备的不断出现，FACTS 技术将会越来越受到重视和应用。

目前，在我国部分高等院校、电力生产和设计部门及一些电气设备制造厂家都已开始 FACTS 技术方面的规划和研究试制工作。如在静止无功补偿器（SVC）、静止无功发生器（ASVG）、统一潮流控制器（UPFC）和晶闸管控制串联电容器（TCSC）等方面均已有较深入的研究。国内多个省网电力系统已在 500kV 电网采用中 SVC，效果良好。FACTS 设备的典型应用实例见表 1-1。

表 1-1 FACTS 设备典型应用实例

设备名称	单机参数	投运年份	制造单位
STATCOM	1MVA	1986	WH、EPR1
	10MVA	1988	GE
	80MVA	1991	三菱
	50MVA	1992	东芝、日立

续表

设备名称	单机参数	投运年份	制造单位
STATCOM	100MVA	1996	WH、EPRI
	20MVA	1999	河南省电力公司、清华大学
TCSC	250kV、500MVA	1992	SMENS
	250kV、267MVA	1993	GE、EPRI
UPFC	138kV 系统	1998	WH、EPRI
	SSSC: 160MVA		
	STATCOM: 160MVA		
CSC	345kV 系统	2002	NYPC、EPRI
	SSSC: 180MVA		
	STATCOM: 200MVA		

在 FACTS 概念提出之前, 诸如 SVC 等设备已经开始得到了应用, 从 SVC 出现开始, FACTS 技术的发展历经了 30 多年。按照是否含有如电容器和电抗器等常规电力器件, 可以将 FACTS 技术的发展分为三个阶段。

(1) 第一代 FACTS 技术。从最早出现的 SVC 开始, 主要是由晶闸管开关快速控制的电容器和电抗器组成的装置来提供动态电压支持。其技术基础是常规晶闸管整流器 (SCR)。第一代 FACTS 装置是晶闸管控制的串联电容器, 它利用 SCR 控制串联在输电线路中的电容器组来控制线路阻抗, 从而提高电能输送能力。

(2) 第二代 FACTS 技术。第二代 FACTS 技术同样具有支持电压和控制功率等功能, 在负荷外部回路中不需要加设大型电力设备 (如电容器和电抗器组或者移相变压器等)。这些新装置, 如静止同步补偿器 (STATCOM) 和静止同步串联补偿器 (SSSC) 等采用了门极可关断设备 (GTO、IGBT) 等全控型器件, 用电子回路模拟出电容器和电抗器组的作用, 因而装置造价大大降低, 性能却明显提高。

(3) 第三代 FACTS 技术。这一代 FACTS 技术将两台或多台控制器复合成一组 FACTS 装置, 并使其具有一个共同的、统一的控制系统。如由一台 STATCOM 和一台 SSSC 复合而成的统一潮流控制器 (UPFC), 它在控制线

路阻抗、电压或功率角的同时，还可以控制输电线路的有功和无功潮流。其他的复合控制器，如线间潮流控制器（IFPC）和可控移相器（TCPR）等都属于第三代 FACTS 技术。

此外，FACTS 技术在配电领域的应用也取得了显著成效，在改善配网电压和电流质量，进行有功、无功电压及电流的控制，消除高次谐波和储能等领域都得到了应用。这些技术统称为 DFACTS 技术。

1.2 FACTS 控制器

N.G.Hingorani 博士对 FACTS 的定义是“柔性交流输电系统（FACTS）是基于晶闸管的控制器的合集，控制器包括移相器、先进的静止无功补偿器、动态制动器、可控串联电容器、带载调压器、故障电流限制器及其他可能发明的控制器。”然而，随着 FACTS 技术的快速发展，新的 FACTS 设备层出不穷，很多设备不仅仅局限在 N.G.Hingorani 博士最初的定义上，因此对其命名也愈加混乱。1997 年，IEEE/PES 的 DC&FACTS 分委会 FACTS 工作组发布了“FACTS 的推荐术语和定义”，对 FACTS 的相关概念进行了明确和解释。本书以此为标准对 FACTS 相关名词进行定义和解释。

（1）电力传输的柔性（Flexibility of Electric Power Transmission）。电力传输系统或者运行方式在维持足够稳态和暂态稳定裕度下适应变动的能力。

从该定义可以看出，“柔性”主要指的是系统适应变动的能力，且该能力应在系统稳态和暂态下均具备。

（2）柔性交流输电系统（Flexible AC Transmission Systems, FACTS）。基于电力电子技术和其他静态控制器，以增强可控性和提高传输容量的交流输电系统。

从该定义可以看出，通过控制器具有可控性，具有高传输容量的交流输电系统称为柔性交流输电系统。

（3）FACTS 控制器（FACTS Controller）。对一个或多个交流输电系统参数进行控制的，基于电力电子技术和其他静态设备的控制设备。

从该定义可以看出，所谓的“控制器”，应是可以对输电系统参数进行控制的设备，而且该种设备不仅仅局限在电力电子技术范围内，其他可能

的静态设备,只要能对一个或多个输电系统参数进行控制,都可称为 FACTS 控制器。FACTS 技术的核心是 FACTS 控制器,FACTS 控制器是输电线路柔性化的具体控制者,正是由于有了 FACTS 控制器,才能对交流电网进行控制,才有了柔性交流输电系统。

FACTS 控制器按照其安装位置的不同可分为发电型、输电线型和供电型;按其接入系统方式的不同可分为并联型、串联型和综合型。并联型 FACTS 控制器的主要代表是 SVC 和 STATCOM,主要用于电压控制和无功潮流控制;串联型 FACTS 控制器的主要代表是 TCSC 和基于 GTO 的串联补偿器 (SSSC),主要用于输电线路的有功潮流控制、系统的暂态稳定控制及抑制系统功率振荡;综合型 FACTS 控制器的主要代表是统一潮流控制器 (UPFC) 和可控移相器 (TCP),UPFC 主要用于电压控制、有功和无功潮流控制、暂态稳定和抑制系统功率振荡, TCP 主要用于系统的有功潮流控制和抑制系统功率振荡。可以看出,不同的 FACTS 控制器能对电网的不同参数进行控制,从而达到电网可控的要求。由于电网中的电压、电流、阻抗、有功和无功功率等因素是息息相关的,每一种控制器往往可以控制多种参数,如可以控制电压、潮流和提高稳态及暂态特性等。而且控制器既可以开环运行也可以闭环运行,以达到多重效果。但同时有些控制器在特定场合只能具备一种功能,而另一些控制器则可以同时具有多种功能。而且,由于不同 FACTS 控制器能控制的参数的数目及各参数对系统潮流和稳定性的重要性不同,它们的控制效果也存在差别。

FACTS 技术由于采用具有单独或者综合功能的电力电子控制装置,因此比常规的输电控制技术具有优越的快速性能和灵活的控制能力,同时还具有良好的适应性。由于 FACTS 技术与现有的交流输电系统是并行发展的,并完全兼容,能在现有设备不做重大改动的条件下采用适合的 FACTS 技术,就能充分发挥现有电网的潜力,因此,FACTS 技术在电力系统中具有广泛而良好的应用前景。然而,虽然近年来 FACTS 技术已经在中国、美国、日本、瑞典、巴西等国家重要的超高压输电工程中得到应用,但其应用还仅局限于个别工程,如果想大规模应用 FACTS 装置,还要解决一些全局性的技术问题,如多个 FACTS 装置控制系统的协调配合问题,FACTS 装置与已有的常规控制、继电保护的衔接问题,FACTS 控制纳入现有电网调度控制

系统问题等。

与常规的补偿电容器电抗器相比，目前的 FACTS 设备设计制造复杂，成本也较高。即使相对于采用常规电容器和电抗器的 SVC 和 TCSC 来说，其制造成本也略高。根据加拿大 Manitoba 高压直流研究中心提供的信息看，以常规并联电容器造价为基准单位，则常规串联电容器造价是其 2.5 倍，SVC、TCSC 是其 5 倍，STATCOM 是其 6.25 倍。可见，各种设备的单位容量造价差距明显。但是，随着电力电子器件的性能提高和造价降低，以电力电子器件为核心部件的 FACTS 装置的造价也会随着降低，在不久的将来必将会比常规的输配电方案更具竞争力。

电力电子技术与电力电子器件

2.1 概 述

从前面的描述可以看出,目前来说,FACTS技术的基础是电力电子技术,是电力电子技术在电力系统中的应用。FACTS技术的核心是具有各种调节功能的FACTS控制器,而FACTS控制器则是由电力电子技术形成的,电力电子技术组成部分是各种电力电子元器件。可以说,没有

电力电子技术的发展,就没有FACTS技术的应用,反过来FACTS技术的应用又推动了电力电子技术的发展。FACTS技术和电力电子技术的联系可用图2-1进行描述。

从图2-1可以看出,FACTS技术应用的基础是电力电子技术,电力电子技术所形成的FACTS控制器应用在电力系统中,就是FACTS技术的应用,而电力电子器件又是电力电子技术的基础,没有电力电子器件的发展和应用,就没有电力电子技术的发展的应用。电力电子器件的性能很大程度上决定了FACTS控制器的性能和功能。

2.2 电力电子技术

电力电子学 (Power Electronics) 这一名称出现在 20 世纪 60 年代。在

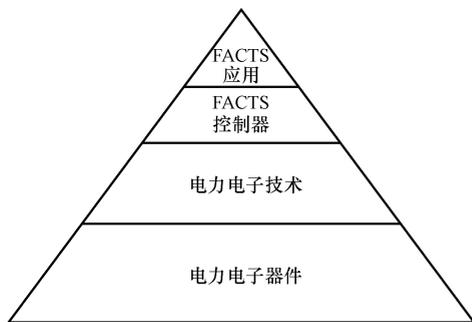


图 2-1 FACTS技术与电力电子技术的联系