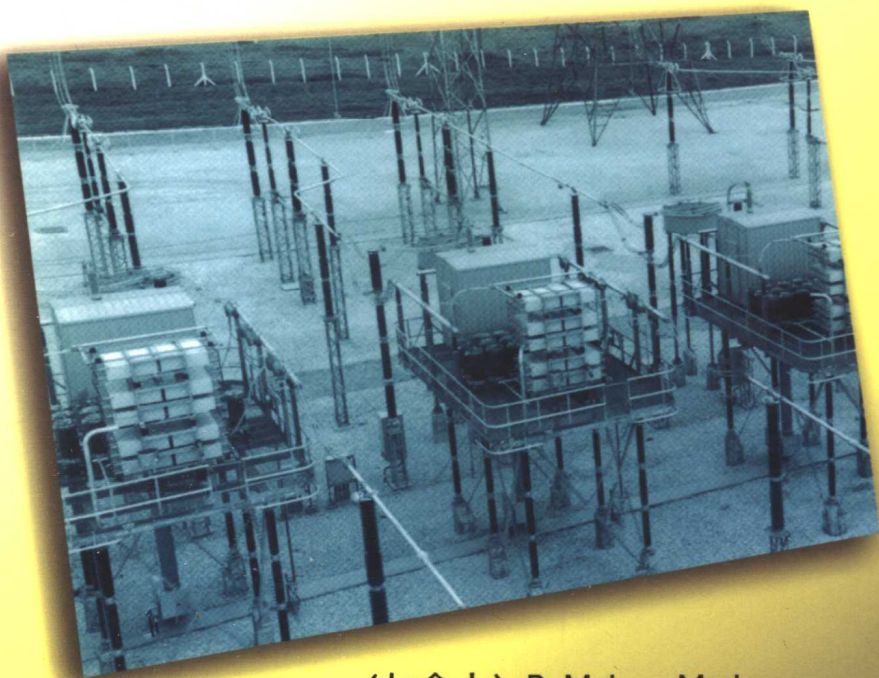


国外电气工程名著译丛

基于晶闸管的柔性 交流输电控制装置

THYRISTOR-BASED FACTS
CONTROLLERS FOR ELECTRICAL
TRANSMISSION SYSTEMS



(加拿大) R. Mohan Mathur 著
(印度) Rajiv K. Varma 译
徐政

TM721.2

1

国外电气工程名著译丛

基于晶闸管的柔性交流 输电控制装置

(加拿大) R. Mohan Mathur 著
(印度) Rajiv K. Varma

徐 政 译



机械工业出版社

本书重点阐述静止无功补偿器(SVC)和晶闸管控制串联电容器(TC-SC)两种柔性交流输电系统(FACTS)控制装置的结构、运行原理、控制器设计方法、仿真模型及在电力系统中的各种应用;讨论了电力系统中多个 FACTS 控制装置之间的相互作用特性及其协调问题;介绍了基于电压源变流器(VSC)技术的新一代 FACTS 控制装置静止无功补偿器(STATCOM)、静止同步串联补偿器(SSSC)和统一潮流控制器(UPFC)等;详细描述了多个 FACTS 装置实际应用的工程。本书适合于从事 FACTS 技术研究、开发、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力系统专业的教师和研究生阅读。

R. Mohan Mathur, Rajiv K. Varma: Thyristor-based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems

All Rights Reserved. Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Inc."

本书中文简体字版由机械工业出版社出版。未经出版者书面允许,本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有,翻印必究。

图字:01-2004-3287

图书在版编目(CIP)数据

基于晶闸管的柔性交流输电控制装置/(加)马思尔(Mathur, R.M.), (印度)瓦马(Varma, R.K.)著;徐政译. —北京:机械工业出版社, 2005.2

(国外电气工程名著译丛)

书名原文: Thyristor-based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems
ISBN 7-111-16012-6

I. 基... II. ①马...②瓦...③徐... III. 电力系统-交流-
输电-控制系统 IV. TM721.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 004156 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:牛新国 责任编辑:王 玫 版式设计:冉晓华

责任校对:申春香 责任印制:陶 湛

北京铭成印刷有限公司·新华书店北京发行所发行

2005 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

1000mm × 1400mm B5·14.375 印张·559 千字

0 001—4 000 册

定价:49.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68326294

封面无防伪标均为盗版

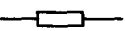
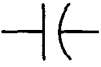
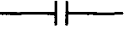
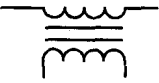
译者的话

柔性交流输电系统(Flexible AC Transmission Systems,简称 FACTS)和用户定制电力技术(Custom Power)的概念自 20 世纪 80 年代中后期被提出以来,得到了全世界电力工程界的广泛重视。两者都是电力电子技术在电力系统的应用,是电力系统在一次系统领域的主要技术增长点。FACTS 技术是针对输电系统的,其基本作用是控制输电系统中的潮流和提高输电线路的输送能力;用户定制电力技术是面向配电系统的,其主要功能是加强供电的可靠性和提高电能质量。FACTS 技术和用户定制电力技术代表了电力系统技术的一个主要发展方向,不管是在发达国家还是在发展中国家,其应用都将会越来越广泛。

目前关于 FACTS 技术的英文著作主要有 3 种,第 1 种是由 Yong Hua Song (宋永华)和 Johns A.T. 编辑的《Flexible AC Transmission Systems (FACTS)》,1999 年由 IEEE 出版社出版,该书作者有十余人,一人或几人写一章,因此基本上是介绍性的;第 2 种是由 Hinograni N.G. 和 Gyugyi Laszio 撰写的《Understanding FACTS-Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems》,2000 年由 IEEE 出版社出版,属于 FACTS 技术的入门性教材;而本书(第 3 种)则是关于 FACTS 技术的一本最新著作,在取材、深度和系统性方面都比较好。

关于 FACTS 技术和用户定制电力技术,尽管国内也研究得很热,但至今还没有看到过一本系统的中文著作。为了促进国内在 FACTS 技术和用户定制电力技术方面的实际工程应用,译者将本书翻译出来,既可供从事 FACTS 技术和用户定制电力技术开发和应用的工作者参考,也可作为电气工程领域培养研究生的教材。

原书中的部分符号不符合我国国家标准,为保持与原书一致,翻译过程中没有加以改变。差别明显的符号列出如下:

项目	原书采用的符号	国家标准符号
电阻		
电容		
变压器		
电压相量	$\bar{V}$ 或 $\mathbf{V}$	$\dot{V}$
电流相量	$\bar{I}$ 或 $\mathbf{I}$	$\dot{I}$

IV 基于晶闸管的柔性交流输电控制装置

本书的翻译得到了国家自然科学基金(项目批准号 50277034)的资助, 翻译过程中, 张帆、杨汾艳、李晓珂、潘武略、林宇锋、张旭昶、王洪梅、刁瑞盛、凌玲、卢睿、邝建荣、董仕镇等同学做了大量工作, 在此深表谢意。另外, 特别感谢我妻子封洲燕对部分译稿进行了仔细的校读并提出了许多中肯的修改意见。

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: xufeng@hzcnc.com。

徐 政

2004 年 10 月

于浙江大学求是园

序 言

电力电子装置在 20 世纪 70 年代开始用于输电系统,在高压直流输电(HVDC)系统中,晶闸管首先被用于背靠背直流非同步联络线,然后又被用于长距离直流输电线路。到了 20 世纪 70 年代末,晶闸管已成为直流输电系统的主要换流器件。

新一代具有强迫关断能力的电力电子器件,现在正开始应用于具有电压源换流器(VSC)结构的直流输电系统。这种换流器在弱系统方面具有巨大的应用潜力,预计其应用在未来的几年中将会迅速增长。

20 世纪 70 年代末,电力电子装置也开始应用于交流输电系统。晶闸管控制电抗器(TCR)和晶闸管投切电容器(TSC)就是出现于那个时期。它们被单独、联合或与机械式投切电容器(MSC)结合用来控制无功功率(电压)。对于这类新型装置的命名曾引起许多争议,最后确定为静止无功补偿器(SVC)。1982 年 Wiley-Interscience 出版社出版了第一本关于 SVC 的教材,《Reactive Power Control in Electric Systems》(电力系统无功功率控制)^①,由 T.J.E. Miller 和他的同事们合作撰写。以后,在 20 世纪 80 年代,与并联接法的 SVC 相应的串联接法的对偶装置,即晶闸管投切串联电容器(TCSC),首先被用来缓解区域间的低频振荡。

目前用于交流输电系统的电力电子型控制装置在它的换流桥结构中采用了门极可关断(GTO)器件,通过合适的导通和关断切换可以产生超前或滞后的电压-电流关系,从而对无功功率和电压进行控制(对于并联结构)或对潮流进行控制(对于串联结构),但并不需要使用大型无功能量储存元件。GTO 器件在 20 世纪 90 年代初首先出现于日本,然后在 20 世纪 90 年代中期出现于美国。目前我们才刚刚开始发掘这些电路元件的巨大应用潜力。

FACTS 是“柔性交流输电系统”(Flexible AC Transmission Systems)的首字母缩略词,指应用于交流输电系统的电力电子控制装置,其中的“柔性”(Flexible)是指对电压和电流的可控性。如前所述,并联结构可以对电压和无功功率进行控制,串联结构可以对电流和潮流进行控制。因此,并联结构和串联结构的联合应用可以同时两者进行控制。

本书在宽广的领域里提供了关于 FACTS 控制装置特性与应用的详细资料。读者可以在此查阅到大量的电路接线图、装置性能的评价、模块框图、传递函

① 中文译本:胡国根译,何仰赞校. 电力系统无功功率控制. 水利电力出版社,1990。

VI 基于晶闸管的柔性交流输电控制装置

数、计算机仿真、成本比较以及大量的参考文献目录。特别是关于 FACTS 控制装置协调问题的那一章，内容很吸引人。随着 FACTS 控制装置越来越多地进入我们现有的交流输电网络，对于这些装置的设计不能孤立进行，尤其是在同一个电气区域中，一个控制装置对扰动的稳定响应并不能表示其他多个控制装置的响应也是稳定的。例如，对于一个串联通道中的两个大功率控制装置，或者并接在附近的两个电压控制装置，情况就是如此。如果没有协调设计，串联的控制装置与并联的控制装置之间也会产生类似的不良相互作用。

目前，电力工业界正处于放松管制和结构重建的巨大压力之下，但同时输电系统的安全性和可靠性却提出了更高的要求。因此可以认为，复杂的控制装置在未来的系统运行中将会起到主要作用。FACTS 控制装置是这些复杂控制装置的代表，本书对了解和熟悉 FACTS 装置作出了宝贵的贡献。

Willis F. Long

美国威斯康星大学教授

(University of Wisconsin-Madison)

前 言

能源的成本在不断上升,新建输电线路对环境的影响倍受侧目,在这种形势下,寻找新的控制装置使现有的输电线路损耗最小、稳定输送容量最大势在必行。早期,这些目标是通过输电线路的无功功率控制来实现的,随着晶闸管的出现和应用,产生了一种新型的基于晶闸管的无功功率控制装置,它具有非常快的响应速度。利用这种快速响应特性可以将阻尼控制功能加入到电压和无功功率的控制中。而柔性交流输电系统(FACTS)技术是各种新型电力电子控制装置应用的集成,这些控制装置对选定的一些输电线路既可以进行有功功率控制,也可以进行无功功率控制。因此,FACTS 控制装置正在成为现代输电系统的有机组成部分。

电力工业界正处在一个转折时期,经历着一个结构上的重新调整过程,以便为竞争的电力供应者提供一条通向用户的路径。发电、输电和配电部门正在成为独立的企业。在这种新的形势下,输电公司必须对电力转运的需求作出响应,即在任何节点接收功率的注入,并在任何节点与负荷连接;在较小的范围里,配电公司也应与输电公司一样对电力转运的需求作出响应。此外,这些公司决不允许在任何输电通道上发生功率阻塞,造成对可传输容量的限制,从而丧失新的商业机会。在选定的某些输电线路控制潮流并获得最大的稳定裕度,可以协调解决这些问题,因此,为了达到上述目标,FACTS 控制装置已经变得越来越重要。

目前使用的大多数 FACTS 控制装置是基于晶闸管的,因为晶闸管技术已很成熟,大功率的晶闸管已很容易得到。

静止无功补偿器(SVC)构成了第一代 FACTS 控制装置,自 20 世纪 70 年代起在全世界得到了广泛的应用。最近十年又产生了许多新型的输电用 FACTS 控制装置。在这些装置中,最著名的有基于普通晶闸管的晶闸管控制串联补偿器(TC-SC)以及基于 GTO 晶闸管的静止同步补偿器(STATCOM)、静止同步串联补偿器(SSSC)和统一潮流控制器(UPFC)。新型的大功率半导体器件,如 IGBT 和 MTO 等,不久就会用来开发出高性能的改进型 FACTS 控制装置。

在过去的 30 年中,有关 FACTS 的文献资料大量面世,它们出自全世界本领域的学者、研究人员和电力公司的工程师。但是,这些文献比较零散,有时难以得到。为此,在本书中,作者结合基本概念和应用实例,将输电用 FACTS 控制装置系统地呈现给读者。虽然只讨论了输电方面的应用,但这些资料也同样适用于配电系统。

VII 基于晶闸管的柔性交流输电控制装置

本书主要描述基于晶闸管的 FACTS 控制装置——SVC 和 TCSC, 因为这些控制装置目前正在被使用, 并很可能有新的用途。本书重点阐述这两种装置的运行原理和对应不同应用目标的控制技术。这些应用目标包括增强系统的稳定性, 提高系统的阻尼, 缓解次同步谐振(SSR), 预防电压不稳定以及改进直流输电系统的终端特性。

本书对控制问题十分重视, 因为在选择和设计具体的 FACTS 控制装置时, 必然会涉及到控制。本书通过对实例的研究来阐明控制设计的技巧, 对同类型和不同类型的多个 FACTS 控制装置的协调问题, 本书同样采用实际的例子来加以说明。本书引用了许多参考文献以方便读者进一步了解细节问题和开展更深入的研究工作。

本书的内容是按照相量和线性分析方法来组建的, 对数学知识的要求只限于能够理解系统设计概念即可。本书既不追求严格的数学推导, 也不大量罗列实际工程的细节数据。采取这种折中路线, 是期望此书既能被电力公司的工程师所接受, 也能被学术界的同行所接受。

本书是从大学研究生课程以及面向电力工程师的大量短期培训班教材中整理产生, 两位作者近几年在加拿大、巴西和印度独立讲授了这些课程。

本书分为 10 章, 分别为:

第 1 章描述输电系统中的传统控制原理。简略介绍大功率半导体器件和 FACTS 技术的基本概念以及新兴的输电系统。

第 2 章阐明无功控制的原理, 并对输电线路在有无串并联补偿情况下的性能作比较。

第 3 章描述一系列无功补偿器的运行原理, 包括同步调相机、饱和电抗器(SR)、晶闸管控制电抗器(TCR)、晶闸管投切电容器(TSC)和 TSC-TCR。此外, 还给出了对不同补偿器的比较、评价。

第 4 章描述 SVC 控制和保护系统中各个部件的细节, 给出用于不同系统分析目的的 SVC 模型。本章最精彩的部分是讨论不同测量技术的解调制效应, 这种解调制效应可以对不同种类的谐波不稳定和网络谐振产生影响。

第 5 章讨论 SVC 的电压控制功能并展示了设计 SVC 电压控制器的基本过程, 详细分析了网络谐振以及 2 次和 3 次谐波对 SVC 性能的影响。此外, 还描述了当串联补偿系统中存在多个谐振模式时 SVC 的行为。

第 6 章讨论 SVC 在输电系统中的种种应用, 包括加强静态稳定性和暂态稳定性、改善阻尼、抑制次同步振荡、预防电压不稳定以及对直流输电终端的动态无功支持。本章通过实际例子对 SVC 控制器的设计, 特别是针对上述应用的带有辅助信号的控制器设计, 进行了讨论。

第 7 章介绍 TCSC 的运行原理、调节能力以及不同种类的相关模型。

第8章描述 TCSC 的不同控制方法以及 TCSC 在电力系统中的种种应用。这些应用包括提高系统的稳定性、缓解 SSR、消除电压不稳定。本章的一个特色是描述了最近两个 TCSC 工程的性能，其中一个工程在巴西，另一个工程在瑞典。

第9章讨论不同 FACTS 装置之间的协调问题。描述了不同控制装置相互作用的本质，展示了不同种类控制装置之间的相互作用特性，例如 SVC 与 SVC、SVC 与 TCSC、TCSC 与 TCSC 以及 SVC 与 HVDC 之间的相互作用特性。

为了本书的完整性，第10章讨论新出现的 FACTS 控制装置。这些装置不是基于普通晶闸管的，而是基于由 GTO 晶闸管构成的电压源变流器技术的，如 STATCOM、SSSC 和 UPFC 等。另外，按照其成本和性能，本章对不同种类的 FACTS 控制装置进行了比较，并讨论了未来电力系统中 FACTS 技术可能的发展方向。

致 谢

感谢电气与电子工程师学会(IEEE)、IEEE 电力工程学会(PES)、国际大电网会议(CIGRE)、电气工程师学会(IEE)和美国电力研究院(EPRI),在我们写作本书的过程中使用了上述机构的大量珍贵文献。同时感谢加拿大电气协会(即现在的 CEA 技术公司)和位于美国波士顿的 Kluwer 出版社允许我们使用他们出版物中的部分材料。

感谢 Gino Romegialli 允许我们使用他在加拿大 Manitoba 大学讲课时所用的有关静止补偿器讲义中的部分材料,同时感谢 Krishnat Patil 允许我们采用他博士论文中关于 STATCOM 的研究结果,作为本书第 10 章的讨论材料。

感谢美国威斯康星大学的 Willis F. Long 教授为本书作序。感谢所有审稿人给予本书的指导和所提出的许多建设性意见。特别地,感谢西门子公司的 Sasan Jalali 博士审阅了本书中关于 TCSC 的两章,感谢印度新德里 ABB 公司的 C.G. Carlsson 和 R.S. Moni 提供了巴西 TCSC 工程的照片,本书的封面设计采用了该照片。

十分感谢印度理工学院和加拿大 Western Ontario 大学对我们的支持和所提供的方便,如果没有这些支持和帮助,本书难以达到现在的水平。特别感谢 Ajay Srivastava 仔细地打印本书的手稿,感谢 Sandhya Agnihotri 在十分紧迫的时间内绘制本书的插图。

真诚感谢 IEEE 出版社的官员 John Griffin、Marilyn G Catis、Robert Bedford 和 Anthony VenGraitis 对于我们的一再拖延所表现的耐心和理解。

我们两位作者以前并没有合作过,在 Rajiv K. Varma 利用学术假期来到加拿大 Western Ontario 大学进行合作研究期间,一次偶然的机会,我们谈论起有关共同整理静止补偿器材料的事,激发了双方的兴趣和热情,并最终完成了本书。因此,这里还要感谢与我们相关的两个独立研究小组的成员。

R. Mohan Mathur 的单独致谢:

在已过去的大约 25 年中,随着对于直流输电系统兴趣的自然发展,我一直在跟踪现在被称为 FACTS 技术的有关研究工作。真诚感谢加拿大自然科学与工程研究委员会以往所给予我的研究基金资助,这些基金的一部分用于研究生和其他研究人员对 FACTS 的研究。也感谢 Manitoba 大学、Western Ontario 大学、BBC 公司(即现在的 ABB 公司)为我提供的研究、开发和教学的机会。

在我做研究的过程中,我从我的学生和助手那里获益匪浅。特别感谢我以前的学生 Adel Hammad、Reza Iravani、Raghuveer Basati、David Flueckigar、Sandeep Nyati、Sumrit Hungsasutra、Sainath Moorthy、Xuegong Wang、Xiaokang Xu、Krishnat Patil 和 Christina Terek,以及我的研究助理 Gino Romegialli、J. Senthil、S.H. Hosseini,当然还有本书的合作作者 Rajiv K. Varma。另外,还要感谢我的前同事 Robert Menzies、Anir Gole 和 Jin Jiang,他们所从事的研究工作涉及许多领域,有串联和并联补偿器,移相器,VSC 应用于实现 STATCOM、SSSC 和 UPFC,感谢他们给予我的帮助和有益的讨论。

感谢 Hermann Hoedle、H. Stemmler 和 Lucien Terens 在我的 4 次学术假期期间(每次 1 年),提供给我在 BBC (ABB)公司工作的机会,从而使我参加了 TCR 和 TSC 的研究。

真诚感谢我的妻子 Aruna 及我的孩子 Tinu 和 Shikha 对我工作一贯的鼓励和支持。

Rajiv K. Varma 的单独致谢:

首先,十分感谢我的博士生导师,印度科学院(位于 Bangalore)教授 K.R.Padiyar 博士,他在印度理工学院(缩写 IIT)(位于 Kanpur)期间,鼓励和引导我进入了 FACTS 技术和电力系统的研究领域。衷心感谢美国 BPA 公司的 Wayne Litzenberger 先生接受我帮助整理“直流输电和 FACTS 文献目录”1994~1995 年版和 1996~1997 年版,这些文献目录对本书的写作起到了十分重要的作用。

在 IIT,我要感谢 S.S.Prabhu 教授给予我和他一起工作的机会,并讲授“电力系统中的无功补偿”课程多年。感谢 V.Sinha 博士、Surendra Gupta 博士、G.K.Dubey 博士、Ashwini Kumar 博士、Sachchidanand 博士、Arindam Ghosh 博士、K.R.Srivathsan 博士、S.C.Srivastava 博士(电机系主任)和 K.A.Padmanabhan 教授(IIT 前院长)对我的鼓励。

深深感谢美国伊利诺斯大学(位于 Urbana-Champaign)教授 M.A.Pai 博士、加拿大 Powertech Labs. 公司总裁兼 CEO Prabha Kunder 博士和美国电力研究院的 Rambabu Adapa 博士在本书写作过程中给予我的支持和指导。真诚感谢印度电网公司顾问及 ABB 公司(位于新德里)前顾问 Mata Prasad 先生为我提供了大量的书籍和研究报告,这些书籍和研究报告对本书的写作是极其有用的。

感谢 Western Ontario 大学(缩写为 UWO)提供了我多次机会在电力工程分析与研究实验室(缩写为 PERAL)作研究。在 UWO,我要衷心感谢 G.S.P.Castle 博士、A.R.Webster 博士、T.Bonnema 博士和 R.V.Patel 博士(电气与计算机工程系现任主任)在本书写作过程中所给予的支持和提供的方便。特别感谢 Jin Jiang 博士一贯的支持和对本书写作的鼓励,与他的相处非常愉快。

XII 基于晶闸管的柔性交流输电控制装置

深深感谢 Xiao Kang Xu 博士、Andrew Cullen、Qihua Zhao 博士以及在 PEARL 的每一位同事所给予我的帮助。感谢 Jacquie Taylor 和 Sharon Ling 简化了我在 UWO 期间的所有烦琐事务。

衷心感谢我的朋友 T.Sadagopan、J.Senthil 博士和 Narendar Sumukadas 博士，他们在关键时刻所给予的帮助我永远不会忘记。感谢 Krishnat Patil 博士、Nilesh Hiremath、Manoj Kumar 和 Sujit Mandal 给予我的无保留的帮助。感谢我的博士研究生 N.K.Sharma 博士、C.P.Gupta 博士和 Ram Prakash Gupta 帮助我搜集文献资料。

感谢 P.V.K.Reddy、Gopesh Tiwari、Manoj Gupta、Varada Rajan、Sony Farmer、Sharabh Pradhan、Himanshu Singh 以及 IIT 技术开发计划项目中的所有工作人员。特别感谢听我讲授电力系统 EE330 课程的所有研究生和本科生，我在 IIT 时曾多年讲授该课程，在我写作本书时，他们的热情一直鼓舞着我。

生活中的成功不仅要靠个人的努力，它与老师和父母的祝福也是分不开的。Sri Jagat Narain 的指导和无私的爱心以及 Sri Mahesh Dwivedi 的鼓励给予了我写作本书的力量。我深深地感激我的父母 Satish Chandra Varma 先生和 Saroj Varma 女士以及我的岳父母 Avadhesh Chandra Srivastava 先生和 Anil Srivastava 女士。

真诚感谢我妻子的家庭和我兄弟姐妹的家庭所给予我的鼓励。十分感谢我的亲戚 Ajay 全家所给予我的支持。

感谢 Aruna Mathur 博士以及她全家对我的深情支持，这种支持是我力量的源泉。

我无限喜爱的“小宝贝”Sarvesh 和 Ratna 献出了他们与爸爸在一起的时间，以便让他写作本书。本书的完成应归功于我最严厉的批评者、最真诚的祝福者和人生最好的朋友——我的妻子 Malini。

本书只是进入巨大的 FACTS 王国的一块垫脚石。如果本书能够成为刚开始从事 FACTS 技术研究的学术界同行和电力工程师的有用的入门书，我们将心满意足。欢迎提供改进意见。

R. Mohan Mathur

Rajiv K. Varma

目 录

译者的话

序言

前言

致谢

第 1 章 引言	1
1.1 背景知识	1
1.2 输电网络	1
1.3 传统的控制方法	2
1.3.1 自动发电控制(AGC)	2
1.3.2 励磁控制	4
1.3.3 变压器分接头切换控制	4
1.3.4 移相变压器	5
1.4 柔性交流输电系统(FACTS)	6
1.4.1 电力电子开关器件的进展	7
1.4.2 半导体开关器件的原理与应用	7
1.5 新兴输电网络	11
参考文献	12
第 2 章 输电系统中的无功功率控制	14
2.1 无功功率	14
2.2 无补偿输电线路	15
2.2.1 一个简单实例	15
2.2.1.1 负荷补偿	16
2.2.1.2 系统补偿	16
2.2.2 无损分布参数线路	17
2.2.2.1 对称线路	18
2.2.2.2 对称线路的中点条件	19
2.2.2.3 实例研究	20
2.3 无源补偿	28
2.3.1 并联补偿	28
2.3.2 串联补偿	29

2.3.3 对功率输送能力的影响	30
2.3.3.1 串联补偿	30
2.3.3.2 并联补偿	31
2.4 小结	32
参考文献	32

第3章 传统无功补偿器原理

3.1 引言	34
3.2 同步调相机	35
3.2.1 结构	35
3.2.2 应用	36
3.2.2.1 控制电压的大幅偏移	36
3.2.2.2 直流输电终端的动态无功支持	36
3.3 饱和电抗器(SR)	36
3.3.1 结构	36
3.3.2 运行特性	38
3.4 晶闸管控制电抗器(TCR)	39
3.4.1 单相 TCR	39
3.4.2 三相 TCR	44
3.4.3 晶闸管投切电抗器(TSR)	47
3.4.4 分段 TCR	47
3.4.5 12 脉波 TCR	48
3.4.6 TCR 的运行特性	48
3.4.6.1 无电压控制时的运行特性	48
3.4.6.2 有电压控制时的运行特性	51
3.5 晶闸管控制变压器(TCT)	52
3.6 固定电容器-晶闸管控制电抗器(FC-TCR)	54
3.6.1 结构	54
3.6.2 运行特性	55
3.6.2.1 无降压变压器时	55
3.6.2.2 有降压变压器时	55
3.7 机械式投切电容器-晶闸管控制电抗器(MSC-TCR)	59
3.8 晶闸管投切电容器(TSC)	60
3.8.1 将电容器投入电源	60
3.8.2 串联连接的电容器与电抗器的投切	61
3.8.2.1 与基频 ω_0 相关的项	62
3.8.2.2 与自然谐振频率 ω_n 相关的项	62
3.8.2.3 实际的投切方案	63

3.8.3 TSC 阀的关断	66
3.8.4 TSC 的结构	66
3.8.5 运行特性	68
3.9 晶闸管投切电容器-晶闸管控制电抗器(TSC-TCR)	69
3.9.1 结构	69
3.9.2 运行特性	70
3.9.3 电流特性	72
3.9.4 电纳特性	73
3.9.5 失配的 TSC-TCR	73
3.10 不同 SVC 装置的比较	75
3.10.1 损耗	75
3.10.2 性能	76
3.11 小结	77
参考文献	78
第 4 章 SVC 的控制部件和模型	79
4.1 引言	79
4.2 测量系统	79
4.2.1 电压测量	81
4.2.1.1 交流到直流的整流	81
4.2.1.2 坐标变换	81
4.2.1.3 傅里叶分析	81
4.2.1.4 电压二次方的测量	83
4.2.2 SVC 电压测量系统的解调制效应	83
4.2.2.1 相加	83
4.2.2.2 调制	84
4.2.2.3 基于傅里叶分析的测量系统	86
4.2.2.4 基于坐标变换的测量系统	87
4.2.2.5 基于交流-直流整流的测量系统	88
4.2.2.6 对滤波的要求	88
4.2.3 电流的测量	90
4.2.4 功率的测量	92
4.2.5 对测量系统的要求	93
4.2.5.1 相量传感器	93
4.2.5.2 光学传感器	94
4.3 电压调节器	95
4.3.1 基本调节器	95
4.3.2 基于锁相振荡器(PLO)的电压调节器	98

4.3.2.1 基本的单相振荡器	100
4.3.2.2 三相振荡器	101
4.3.3 电压调节器的数字化实现	102
4.4 触发脉冲发生器	103
4.4.1 线性化函数	104
4.4.2 触发系统中的延迟	105
4.4.2.1 晶闸管的死区时间	105
4.4.2.2 晶闸管的触发延迟	105
4.5 同步系统	107
4.6 附加控制和保护功能	108
4.6.1 阻尼机电振荡	108
4.6.2 电纳(无功)调节器	108
4.6.3 相邻无功装置的控制	110
4.6.4 低电压方案	111
4.6.5 二次侧过电压限制器	112
4.6.6 TCR 的过电流限制器	112
4.6.7 TCR 的平衡控制	112
4.6.8 非线性增益和增益监视器	112
4.7 用于电力系统分析的 SVC 模拟方法	113
4.7.1 潮流计算时的模拟方法	113
4.7.1.1 SVC 在控制范围内运行	113
4.7.1.2 SVC 在控制范围外运行	114
4.7.2 小扰动和大扰动研究时的模拟方法	114
4.7.3 次同步谐振(SSR)研究时的模拟方法	115
4.7.4 电磁暂态分析时的模拟方法	115
4.7.5 谐波分析时的模拟方法	116
4.8 小结	116
参考文献	116

第 5 章 SVC 电压控制的概念 120

5.1 引言	120
5.2 电压控制	120
5.2.1 SVC 的 $V-I$ 特性	120
5.2.1.1 动态特性	120
5.2.1.2 稳态特性	122
5.2.2 用 SVC 进行电压控制	123
5.2.3 SVC 动态特性中斜率的优点	124
5.2.3.1 减小 SVC 的额定值	124