



国际电气工程先进技术译丛



WILEY
www.wiley.com

柔性交流输电系统 在电网中的建模与仿真

**FACTS Modelling and
Simulation in Power Networks**

(英) Enrique Acha

(墨) Claudio R. Fuerte-Esquivel

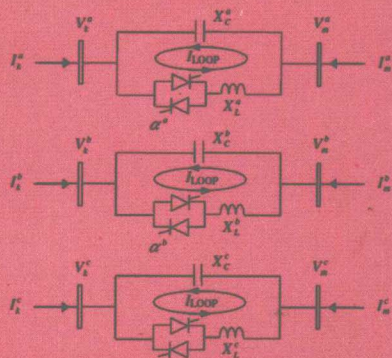
(墨) Hugo Ambriz-Pérez

(英) César Angeles-Camacho

程新功 张勇 王中华 申涛

著

译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

柔性交流输电系统在电网中的建模与仿真

(英) Enrique Acha

(墨) Claudio R. Fuerte-Esquivel 著

(墨) Hugo Ambriz-Pérez

(英) César Angeles-Camacho

程新功 张 勇 王中华 申 涛 译



机械工业出版社

译者的话

最近几年一直比较关注柔性交流输电系统 (Flexible AC Transmission System, FACTS) 的发展, 因为 FACTS 设备能够降低损耗, 提高供电可靠性, 增加同等容量下的输电能力。FACTS 的使用, 将电力系统的可控性提升到了一个新的高度。相信在不远的将来, 我们的电网会引入大量的 FACTS 设备。

但有一个问题困扰了我们很久, 即如何评估 FACTS 设备对电力系统的影响。我们不仅需要进行理论论证, 还需要寻找一种源代码开放的电网运行仿真程序, 并以我们能够理解的方式修改程序, 以将 FACTS 模型加入其中, 最终得到较为通用、灵活的仿真程序。在此基础上, 我们可以从仿真结果上观察以下方面: (1) FACTS 设备是如何降低损耗、提高输电能力的; (2) 引入 FACTS 设备前的电网与引入 FACTS 设备后的电网究竟有哪些不同; (3) 不同的 FACTS 设备对电网带来的影响有哪些不同; (4) 同一种 FACTS 设备如果采用不同的控制算法, 其控制效果是否相同; (5) 如何正确地控制 FACTS 设备, 才能使电网更优化地运行等。

幸运的是, 我们发现了 Enrique Acha 教授等写的这本书。本书的优势在于, 它不仅使我们更好地了解 FACTS 设备的运行机理, 更为重要的是, 它本身就是自成体系的电力系统稳态分析。从传统的电网元件建模、潮流 (Power Flow) 计算、三相潮流 (Three-Phase Power Flow) 计算到最优潮流 (Optimal Power Flow) 和潮流跟踪 (Power Flow Tracing), 本书都进行了详细的阐述, 并给出了大量 MATLAB 仿真程序源代码。可以说, 即使不研究 FACTS 设备对电网的影响, 本书的程序也足以使读者对传统电力系统建立更深入的了解。在此基础上, 每加入一种 FACTS 设备, 都会给出其模型, 并讨论它对潮流、三相潮流、最优潮流和潮流跟踪模型带来的变化, 以及这些变化怎样在程序中体现。书中对所有传统方法和引入 FACTS 设备后的方法都进行了算例仿真和比较, 以说明其优缺点。

在翻译的过程中, 我对 FACTS 的理解也在不断地深入, 也尝试着使用书中提到的方法来指导自己的研究工作, 通过借鉴书中的理论、算例和仿真代码, 开始了我们自己的 FACTS——电力系统之旅。在此也对原书的作者们表示感谢。

本书第 1、2 章由王中华教授翻译, 第 3~6 章由程新功翻译, 第 7 章由申涛博士翻译, 第 8 章由张勇教授翻译, 全书由程新功和张勇教授统稿。感谢机械工业出版社, 让我们能够有机会翻译此书。

由于水平所限, 直到定稿前我们又发现了若干不足之处, 相信细心的读者会发现更多问题。若您对此书的翻译有任何意见或建议, 还望能及时指出, 不胜感激!

程新功

2011 年 4 月于济南

前 言

柔性交流输电系统 (Flexible Alternating-Current Transmission Systems, FACTS) 是电力系统近几年发展起来的新技术, 是建立在大量其他前沿技术之上的, 包括高电压、大电流半导体器件技术, 数字控制和信号处理技术等。从电力系统工程师的角度看, 近几十年来在全球范围内在对高压直流输电系统和静止无功补偿器 (Static VAR Compensator) 的管理和运行中获得的经验财富, 为人们对电力电子装备和技术的使用进行更深入地探索提供了驱动力, 以解决在高压输电和低压配电系统中困扰人们多年的很多问题。大量研究人员的工作为 FACTS 技术的迅猛发展做出了贡献, 但其中最为突出的是 N. G. Hingorani 和 L. Gyugyi。他们对 FACTS 所做的工作体现在《*Understanding FACT-Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*》(Institute of Electronic and Engineerings, New York, 2000) 一书中, 这也是我们学习 FACTS 和带来灵感的源泉。

随着人们对 FACTS 技术的认可, 以及越来越多的 FACTS 设备在高压输电和低压配电系统中得到应用, 人们的注意力逐渐转向了研究 FACTS 控制器对电网暂态和稳态的影响。研究人员在此领域异常活跃, 给出了大量先进的模型, 并提供了高质量的仿真和算例。目前绝大多数 FACTS 控制器稳态建模和仿真的结果都是一致的。而本书将以清楚易懂、系统连贯的方式介绍 FACTS 建模、它们与电网之间的相互作用以及它们的稳态运行特性。

本书第 1 章将概述 FACTS 的目标和任务, 并以高压输电系统的固有局限性为背景, 解释 FACTS 技术的引入和发展。其中最前景的 FACTS 控制器以及它们在稳态控制中的应用范围, 也在本章中得到了阐述。

第 2、3 章给出了大多数常见的 FACTS 控制器和传统电网元件的数学表达式。建模时采用第一原则, 即把稳态运行特性和实际设备的物理结构封装在一起, 从而得到了相坐标系下的先进电力系统模型, 其中也包括局限性更强的、适用于正序分析的模型。对大多数所涉及的电网元件的建模 (如输电线路参数计算), 都在本章中给出了 MATLAB 源代码。

电力系统潮流是最为基本的系统分析工具, 可用于评估电网的稳态运行状况。它已存在了近半个世纪, 不论是在计算效率上还是在建模的灵活性上, 它都已发展到了一个很高的水平。牛顿法是求解非线性潮流方程的标准方法, 具有良好的收敛特性。第 4 章详细讲述了正序潮流计算的理论, 并用带有两个传统控制器的算例对其进行了扩展。该算例将作为后续章节的基础算例。在第 5 章将得到带有不同

FACTS 控制器的正序潮流模型。对每一种控制器都会给出算例和 MATLAB 源代码, 以使读者获得丰富的经验。而且, 如果采用由附录 A 给出的雅可比矩阵元素, 还可以得到比第 5 章中更为通用的 FACTS 潮流程序源代码。

第 6 章将第 4、5 章中介绍的正序潮流模型扩展应用到了三相潮流计算中。其中第一部分涉及对传统电网元件的简化表达式在相坐标系下应用牛顿-拉夫逊法进行求解。该部分提供的 MATLAB 程序代码可适用于中、小型三相电力系统求解。虽然本章所提供的 MATLAB 程序都没有考虑更复杂的传统电网元件模型, 但要想加入这样的模型也是非常容易实现的。第 6 章第 2 部分涉及在牛顿-拉夫逊法中对三相控制器建模, 并探讨了各种串、并联 FACTS 控制器对电压和潮流平衡的控制能力。

第 7 章深入讨论了最优潮流。在第 4、5 章的基础上, 将正序潮流理论与最优化技术相结合, 以实现电力系统的安全、经济运行。本章所用的最优化方法是牛顿法。它具有很强的收敛特性, 并能够与本书中的建模方法很好地融合。不管是传统电网元件还是 FACTS 控制器, 都能较为容易地加入到牛顿法表达式中。为扩展传统的最优潮流计算程序, 使之包含 FACTS 设备, 附录 B 中给出了所有第 7 章涉及的 FACTS 控制器的海森矩阵和梯度矩阵项。附录 C 提供了可用于中、小型电网的不含 FACTS 的最优潮流 MATLAB 程序。

第 8 章介绍了目前正流行的潮流跟踪问题。采用按比例分配原则, 可明确计算出各发电机对各支路潮流和负载所做的贡献。同时该章也给出了几个应用算例。

致 谢

本书是国际交流与合作的结晶，克服了诸如分工协作、跨越洲际距离和完全不同的时区等困难，最终得以完成。感谢我们的家人，感谢他们在我们写作期间为我们的无私付出。感谢 Glasgow 大学电气组的同事们的大力支持。本书中的绝大多数建模方法和概念都是作者们用超过 10 年的时间研究取得的。我们还要感谢 Colin Tan Soon Guan 和 Jesus Rico Melgoza 博士，他们在前期为我们的研究工作做出了很大的贡献。另外，如果没有墨西哥科技协会（CONACYT）的慷慨支持，本书作者的梦想也不可能实现，感谢 CONACYT。

最后，我还要向 John Wiley & Sons 的员工，特别是 Kathryn Sharples、Simone Taylor 和 Susan Barclay 致以敬意。他们在本书稿的编辑过程中表现出了极大的耐心，并给予了我们持续的鼓励。

目 录

译者的话

前言

致谢

第 1 章 概述	1
1.1 背景	1
1.2 柔性交流输电系统	1
1.3 输电系统的内在局限性	2
1.4 FACTS 控制器	3
1.5 稳态电力系统分析	5
参考文献	5
第 2 章 FACTS 控制器建模	6
2.1 引言	6
2.2 建模思想	7
2.3 基于传统晶闸管的控制器	8
2.3.1 晶闸管控制电抗器 (TCR)	8
2.3.2 静止无功补偿器 (SVC)	12
2.3.3 晶闸管控制串联补偿器 (TCSC)	14
2.4 基于全控半导体器件的电力电子控制器	22
2.4.1 电压源变流器 (VSC)	23
2.4.2 静止同步补偿器 (STATCOM)	28
2.4.3 静止同步串联补偿器 (SSSC)	29
2.4.4 统一潮流控制器 (UPFC)	30
2.4.5 基于电压源变流器的高压直流输电 (HVDC-VSC)	31
2.5 基于电压源变流器的控制器的控制性能	33
2.6 小结	34
参考文献	34
第 3 章 传统电力系统建模	36
3.1 引言	36
3.2 输电线模型	37
3.2.1 电压降等式	37
3.2.2 地线	42

3.2.3	导线束	43
3.2.4	双回路输电线	45
3.2.5	标么值	46
3.2.6	输电线程序: 基本参数	47
3.2.7	计算输电线参数的算例	50
3.2.8	长线效应	51
3.2.9	输电线换位	53
3.2.10	输电线程序: 分布参数	54
3.2.11	长线参数计算的数值算例	56
3.2.12	对称分量和序坐标参数	57
3.2.13	输电线程序: 序分量参数	59
3.2.14	序分量参数计算的数值算例	60
3.3	电力变压器模型	60
3.3.1	单相变压器	61
3.3.2	简单的分接头调压变压器	62
3.3.3	复杂的分接头调压变压器	63
3.3.4	三相变压器	65
3.3.5	序坐标参数	69
3.4	旋转电机建模	71
3.4.1	发电机电压方程	73
3.5	系统负载	76
3.6	小结	79
	参考文献	80
第4章	传统潮流计算	81
4.1	引言	81
4.2	潮流的概念	81
4.2.1	基本公式	82
4.2.2	变量和母线分类	84
4.3	潮流计算方法	85
4.3.1	早期的潮流算法	85
4.3.2	牛顿-拉夫逊算法	85
4.3.3	状态变量的初值	88
4.3.4	发电机无功功率限值	89
4.3.5	线性化的参考坐标系	89
4.3.6	用 MATLAB 编写的牛顿-拉夫逊方法计算程序	91
4.3.7	快速解耦算法	98
4.3.8	MATLAB 下快速解耦算法程序	99

4.3.9 一个标准算例	102
4.4 受约束的潮流计算	105
4.4.1 有载调压变压器	105
4.4.2 移相变压器	117
4.5 潮流的深层概念	128
4.5.1 稀疏矩阵技术	128
4.5.2 截断调整	129
4.5.3 有载调压器的配置	131
4.6 小结	133
参考文献	134
第5章 含有 FACTS 控制器的潮流计算	135
5.1 引言	135
5.2 含有 FACTS 控制器的潮流解决方案	135
5.3 静止无功补偿器 (SVC)	136
5.3.1 传统的潮流模型	137
5.3.2 并联可调电纳模型	138
5.3.3 静止无功补偿器 MATLAB 代码程序	140
5.3.4 触发延迟角模型	143
5.3.5 静止无功补偿器触发延迟角 MATLAB 代码程序	143
5.3.6 集成变压器触发延迟角模型	147
5.3.7 应用静止无功补偿器的节点电压幅值控制	148
5.3.8 无功源的协调控制	149
5.3.9 应用单台静止无功补偿器进行电压幅值控制的算例	149
5.4 晶闸管控制串联补偿器 (TCSC)	152
5.4.1 可调串联阻抗潮流模型	152
5.4.2 晶闸管控制串联补偿器的 MATLAB 代码程序	153
5.4.3 应用单个晶闸管控制串联补偿器进行有功潮流控制的数值算例: 可调串联 补偿器模型	158
5.4.4 触发延迟角潮流模型	160
5.4.5 晶闸管控制串联补偿器触发延迟角 MATLAB 代码程序	162
5.4.6 应用单个晶闸管控制串联补偿器进行有功潮流控制的数值算例: 触发延迟角 模型	167
5.4.7 晶闸管控制串联补偿器潮流模型的数值特性	169
5.5 静止同步补偿器 (STATCOM)	170
5.5.1 潮流模型	171
5.5.2 静止同步补偿器的 MATLAB 代码程序	171
5.5.3 应用单台静止同步补偿器进行电压幅值控制的数值算例	177

5.6 统一潮流控制器 (UPFC)	178
5.6.1 潮流模型	179
5.6.2 统一潮流控制器的 MATLAB 代码程序	182
5.6.3 应用统一潮流控制器进行潮流控制的数值算例	192
5.7 基于电压源变流器的高压直流输电 (HVDC-VSC)	194
5.7.1 功率方程	195
5.7.2 基于电压源变流器的高压直流输电的 MATLAB 代码程序	196
5.7.3 应用 HVDC-VSC 进行潮流控制的数值算例	203
5.8 FACTS 控制器的有效初值设定	204
5.8.1 并联同步电压源所表示的控制器	205
5.8.2 并联电纳所表示的控制器	205
5.8.3 串联电抗所表示的控制器	205
5.8.4 串联同步电压源所表示的控制器	205
5.9 小结	206
参考文献	206
第 6 章 三相潮流	208
6.1 引言	208
6.2 三相参考坐标系中的潮流计算	209
6.2.1 潮流方程	210
6.2.2 牛顿-拉夫逊潮流算法	210
6.2.3 相坐标系下三相潮流的 MATLAB 代码程序	213
6.2.4 三相电网计算算例	221
6.3 静止无功补偿器 (SVC)	225
6.3.1 可变电纳模型	226
6.3.2 触发延迟角模型	228
6.3.3 数值算例: 静止无功补偿器使电压幅值对称的能力	229
6.4 晶闸管控制串联补偿器 (TCSC)	229
6.4.1 可变电纳模型	229
6.4.2 触发延迟角模型	231
6.4.3 数值算例: 使用单个晶闸管控制串联补偿器的控制潮流	233
6.5 静止同步补偿器 (STATCOM)	233
6.5.1 三相静止同步补偿器的数值算例	236
6.6 统一潮流控制器 (UPFC)	236
6.6.1 统一潮流控制器的潮流控制数值算例	238
6.7 小结	240
参考文献	240
第 7 章 最优潮流	242

7.1	引言	242
7.2	牛顿法最优潮流	242
7.2.1	通用模型	242
7.2.2	牛顿法在最优潮流中的应用	244
7.2.3	线性化系统方程	245
7.2.4	牛顿法的最优化条件	246
7.2.5	最优潮流中的常规电力设备建模	246
7.2.6	不等式约束的处理	248
7.3	利用牛顿法实现最优潮流	251
7.3.1	最优潮流求解的初始条件	252
7.3.2	有功功率调度	252
7.3.3	拉格朗日乘子	253
7.3.4	罚加权因子	253
7.3.5	共轭变量	253
7.3.6	最优潮流算例	253
7.4	最优潮流中的电力系统控制器表达式	255
7.5	有载调压变压器	255
7.5.1	有载调压拉格朗日函数	255
7.5.2	线性化系统方程组	256
7.5.3	有载调压变压器算例	257
7.6	移相变压器	258
7.6.1	拉格朗日函数	258
7.6.2	线性化系统方程组	259
7.6.3	移相变压器算例	260
7.7	静止无功补偿器 (SVC)	262
7.7.1	拉格朗日函数	262
7.7.2	线性化系统方程组	262
7.7.3	静止无功补偿器算例	263
7.8	晶闸管控制串联补偿器 (TCSC)	266
7.8.1	拉格朗日函数	266
7.8.2	线性化系统方程组	266
7.8.3	晶闸管控制串联补偿器算例	268
7.9	统一潮流控制器 (UPFC)	270
7.9.1	统一潮流控制器的拉格朗日函数	270
7.9.2	直流侧拉格朗日函数	270
7.9.3	统一潮流控制器潮流约束	270
7.9.4	线性化系统方程组	271

7.9.5 统一潮流控制器算例	273
7.9.6 统一潮流控制器运行模式	275
7.10 小结	275
参考文献	276
第8章 潮流跟踪	278
8.1 引言	278
8.2 基本假设	279
8.3 比例分配原则的数学证明	280
8.4 控制域	282
8.4.1 控制域对有功潮流的贡献	282
8.4.2 控制域对无功潮流的功率分摊	285
8.4.3 控制域对负载和节点的功率分摊	286
8.5 跟踪算法	286
8.6 算例	287
8.6.1 简单的放射形网络	287
8.6.2 简单的网孔状电网:有功功率	289
8.6.3 具有 FACTS 控制器的网孔状网络:无功功率	293
8.6.4 大型网络	294
8.6.5 风力发电机的输出功率跟踪	296
8.7 小结	301
参考文献	302
附录	304
附录 A FACTS 控制器在正序潮流中的雅可比矩阵元素	304
A.1 调压变压器	304
A.2 晶闸管控制串联补偿器	305
A.3 静止同步补偿器	306
A.4 统一潮流控制器	307
A.5 高压直流输电电压源变流器	309
附录 B 牛顿法最优潮流中的梯度和海森矩阵元素	310
B.1 输电线路的一阶和二阶偏导数	310
B.1.1 梯度矢量	310
B.1.2 W 矩阵	311
B.2 移相变压器	314
B.3 静止无功补偿器	317
B.4 晶闸管控制串联补偿器	317
B.5 统一潮流控制器	319
附录 C 牛顿法最优潮流的 MATLAB 代码程序	325

第 1 章 概 述

1.1 背景

供电企业正在经历一场具有深远意义的全球性的变革。这场变革的推动力在于市场力量、日益减少的自然资源和一度增长的用电需求。与这种快速演变的背景相对照的是，大量的关于环保、土地使用权和监管等方面的限制阻止了新的输电线路和发电厂的建立，同时也限制了电力企业的发展。人们在深入分析如何利用已有技术最大限度地发挥现有电能输送能力，同时还要保证其可靠性和稳定性后，将发展的方向指向了电力电子。普遍认为，基于机电技术的传统的解决方案因响应时间慢、维护成本高，而最终会被新型电力电子技术和设备所取代（Hingorani 和 Gyugyi, 2000; Song 和 Johns, 1999）。

电力系统可以看作是由发电厂和用户端通过输电线、变压器和辅助设备相互连接而成的。电力系统的结构会由于历史遗留的经济、政治、工程、环境等问题而存在很大差异，但大致上可分为网状系统和纵联系统。网状系统通常建在人口密集区和靠近负荷中心的变电站区域；纵联系统则建在需要从电站向负荷中心大量远距离输电的地区。

与电网结构无关，电网中的功率大致按输电线路的阻抗函数分布。低阻抗输电线比高阻抗输电线允许流过的功率大。但这种自然形成的功率分布通常不是人们所希望的，因为它会带来种种问题。系统操作人员的任务就是干预潮流的重新分配，但迄今为止，任务的实现还受到很大的限制。不受调控的有功功率流动可能引起一系列运行方面的问题，如：系统稳定性被破坏、产生环流、传输损耗大、电压越限、输送能力不足和逐级跳闸等。

长期以来，人们依靠新建电厂和输电线路来解决上述问题。这些解决方法成本高，建设时间长，也会招致很多反对。而新的解决方案是采用最新的电力电子技术和设备升级改造现有的输电通道，而不是新建通道。这种技术新思路就来自于 FACTS——柔性交流输电系统。

1.2 柔性交流输电系统

FACTS 最通用的定义是把电力电子设备及其控制规律运用到电网高压侧，使

电网具备电子可控性 (IEEE/CIGRÉ, 1995)。

FACTS 创立所立足的许多思想已历经了几十年时间的变革。然而作为一门完整的科学体系, FACTS 仍是一个全新的概念。20 世纪 80 年代, 北美电力科学研究院 (EPRI) 最早给出了 FACTS 的定义 (Hingorani 和 Gyugyi, 2000)。FACTS 在高电压强电流电力电子技术领域取得的突破, 使得它不论是在稳态还是暂态的条件下, 对电网高压侧潮流的控制能力加强。同时, 由于 FACTS 可实现对能量流通通道的快速控制, 因此能够有效地改进能量交易的方式。正是由于 FACTS 将会在经济和技术上带来许多效益, 它得到了世界各地电子制造业和研究机构的全力支持 (Song 和 Johns, 1999)。

目前有几种 FACTS 控制器已在世界各地得到了应用, 最常见的有: 变压器有载调压器、调相器、静止无功补偿器、晶闸管控制的串联补偿器、相间功率控制器、静止补偿装置以及统一潮流控制器 (IEEE/CIGRÉ, 1995)。

在 FACTS 的技术发展中, 人们早就认识到, 为了判断 FACTS 是否在电网内有效运行, 还必须改进现有的系统分析工具。借助这些工具, 电力工程师可以更好地规划和控制电网。目前已受到研究人员的注意, 并在一定程度建立了复杂模型的应用领域包括: 正序潮流、三相潮流、最优潮流、状态估计、暂态稳定性、动态稳定性、电磁暂态过程和电能质量分析。

本书详述了带有 FACTS 控制器的电力系统静态运行所需的建模仿真方法, 讨论了上述领域中被明确定义为稳态运行领域的前三个应用领域。FACTS 状态估计领域仍在研究中, 目前还没有确切的模型或仿真方法。虽然在暂态和动态稳定性、电磁暂态和电能质量等研究领域, FACTS 控制器的建模和仿真也取得了很大进展, 但由于针对这些应用领域的仿真工具不适合进行电力系统稳态分析, 因此本书没有涉及相关内容。

1.3 输电系统的内在局限性

一个给定系统的特性通常是随时间变化的, 如负荷和发电量都会随时间的推移而不断增长。若不能有效地改善输电设备, 系统会逐渐面临诸如稳定性变差等稳态和暂态稳定问题。

输电系统输送能力的大小会受到以下因素的限制: 相角稳定性, 电压幅值, 热稳定性, 暂态稳定性, 动态稳定性。

这些限制条件限定了在没有造成输电线和电气设备损坏情况下的最大传输功率。原则上, 通过增加新的传输设备和发电设备可以减少对电能传输的限制条件。而 FACTS 控制不必对系统结构做大的改变就可以实现相同的目标。FACTS 控制可以带来以下好处: 减少运行和传输的投资成本, 增强系统的安全性和可靠性, 提高

功率传输能力,全面提高输送到用户的电能质量 (IEEE/CIGRÉ, 1995)。

1.4 FACTS 控制器

人们对潮流的控制历来是靠控制发电机出力、调节电压和无功补偿来实现的。通过改变移相变压器的分接开关可以实现对电压的调节。目前,人们仍在使用移相变压器来调节电网中的有功功率。有些移相变压器以固定角度长期运行,但大多数情况下是利用它们的分接头可调装置实现移相运行。

串联电抗器可用来降低线路的潮流和短路水平,而串联电容器则用来缩短线路的电气长度,由此增加潮流。通常,串联补偿要根据负荷和电压条件开通和关断。例如在纵联系统中,为了避免因系统过电容效应产生的输电线路过电压,最小负荷时应避免使用串联电容补偿,而在最大负荷时应充分利用串联电容补偿,以增加电能传输量,防止线路过负荷。

直到最近,上述解决方案还非常适合供电产业的需求。然而,电力产业的改制为采用基于高电压、高电流固态控制器的新科技提供了动力 (Hingorani 和 Gyugyi, 2000)。供电企业通过与设备生产厂家和研究机构合作,制定了研制新一代电力电子元件的计划 (Song 和 Johns, 1999)。目前,电力电子技术的发展已影响到了包括发、输、配在内的所有电力领域。

FACTS 技术的发展最早是从分接头切换变压器和移相变压器开始的。这些控制器连同电子串联补偿装置可以看作第一代的 FACTS 设备。统一潮流控制器、静止补偿装置和相间功率控制器则是最近的发展形态,不论是控制能力还是功能上都比早期的 FACTS 控制器优越很多。某些已存在多年的控制器,如并联连接的晶闸管投切电容器、晶闸管相控电抗器和高压直流 (DC) 的功率变换器等,尽管它们的运行特点类似于 FACTS 控制器,却不属于真正的 FACTS 控制器。

在目前已运行的诸多 FACTS 控制器中,大部分控制器在稳态和瞬态时都可以正常运行,但有些特殊制造的只在瞬态条件下工作,如 Hingorani 的次同步谐振 (SSR) 减振器。

用于稳态运行的 FACTS 控制器有 (IEEE/CIGRÉ, 1995):

- 晶闸管控制移相器 (PS): 此控制器是一种电子移相变压器,用晶闸管调节以提供一个迅速变化的相位。
- 有载调压器分接头 (LTC): 如果分接头的变化是受晶闸管开关的控制,则 LTC 可以看做一个 FACTS 控制器。
- 晶闸管控制电抗器 (TCR): 一种并联型晶闸管相控电抗器,通过控制晶闸管阀的导通时间,它的有效电抗可以连续变化。
- 晶闸管控制的串联电容器 (TCSC): 此控制器由一个串联电容器组并上晶闸

管相控电抗器组成,用以提供平稳变化的串联感性电抗。

- 相间功率控制器 (IPC): 这是一种串联型控制器,它的每一相由分别受独立移相电压幅值控制的感性和容性支路组成。有功功率控制是独立设置或由两个移相器和两个可变电抗器调谐设置的。无功功率控制与有功功率无关。
- 静止同步补偿器 (STATCOM): 这是一个同步调相机,与交流系统并联。通过调整输出电流可以控制节点电压幅值或者母线中的无功功率大小。
- 静止同步串联补偿器 (SSSC): 此控制器同 STATCOM 相似,但它与交流系统是串联的。通过调整输出电流可以控制节点电压幅值或者串联变压器终端的无功功率大小。
- 统一潮流控制器 (UPFC): 一个静止同步串联补偿器 (SSSC) 和一个静止同步补偿器 (STATCOM) 通过共同的直流电容器连接起来就构成了统一潮流控制器 (UPFC)。UPFC 通过相位不受限制的串联电压注入,可以同时或选择性地控制输电线路的阻抗、节点电压幅值,以及流经的有功、无功潮流。它还可独立地提供可控的并联无功功率补偿。

电力电子及其控制在电力系统中的应用已经有几十年历史了,其中高压直流输电和静止无功补偿技术是其中比较成熟的两个方面。

- 静止无功补偿器 (SVC): 是一种并联型的静止无功发送或吸收器。
- 高压直流 (HVDC) 输电: 由一个整流器站和一个逆变器站组成的控制器,整流站和逆变站通过背靠背方式或通过直流电缆连接。功率变换器件可选用普通晶闸管或新一代的半导体设备,如门极关断 (GTO) 晶闸管、绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 等。

FACTS 控制器在稳态运行中的应用,概括在表 1-1 中。

表 1-1 FACTS (柔性交流输电系统) 控制器在电力系统运行中的作用

运行中的问题	FACTS 控制器的作用	FACTS 控制器类型
电压限制: 重负荷时电压低 轻负荷时电压高 高压引起停运 低压引起停运	提供无功功率 吸收无功功率 吸收无功功率,防止过载 提供无功功率,防止过载	STATCOM,SVC STATCOM,SVC,TCR STATCOM,SVC,TCR STATCOM,SVC
温升极限: 输电电路过载 并联电路跳闸	减小过负荷 限制电路负荷	TCSC,SSSC,UPFC,IPC,PS TCSC,SSSC,UPFC,IPC,PS
环流: 并联线路负荷分配 故障潮流分配 潮流反向	调整串联电抗 重新整理网络或使用温升极限措施 调整相角	IPC,SSSC,UPFC,TCSC,PS IPC,TCSC,SSSC,UPFC,PS IPC,SSSC,UPC,PS

1.5 稳态电力系统分析

为帮助系统工程师评估 FACTS 设备对输电系统性能的影响,有必要开发新的电力系统软件或更新现有软件 (Ambriz-Pérez, 1998; Fuerte-Esquivel, 1997), 建立新的输电系统和 FACTS 控制器的数学模型, 并将它们融合、编码, 进行广泛的验证。该领域作为研究的重点, 目前已有大量的相关文献。由于 FACTS 建模和仿真的许多方面已趋于完善, 我们认为把这些重要的大量的信息以连贯的、系统的方式集合起来的时机已经成熟。本书的目的就在于此。

从运行的角度来看, FACTS 技术是与以自适应的方式控制电网中潮流路径的能力相关的。而在 FACTS 出现之前, 要实现快速控制是非常困难的。在主要输电线路的始端和末端无延迟地控制线路阻抗、节点电压幅值和相角, 可以大大提高网络的传输能力, 同时也可显著增强系统的安全性。因此具备 FACTS 控制器建模能力的潮流计算机程序成为系统规划人员和系统运行人员评估 FACTS 控制器所带来的技术和经济效益的有用工具。

潮流分析, 又称负荷分析, 是目前系统规划和运行工程师用来评估稳态电力系统的应用最广泛的分析工具。可靠地求解现实中的输配电网问题是一件繁琐的事, 具有强烈收敛特性的牛顿-拉夫逊 (Newton-Raphson) 迭代法是目前最成功的解决方法 (Fuerte-Esquivel, 1997)。在过去的十年里, 为了在牛顿-拉夫逊潮流计算程序中加入 FACTS 模型, 人们做了大量的研究。本书为研究正序潮流和三相潮流提供了理论和实践上的较为全面的基础。另外, 在很多情况下, 我们希望把经济因素和运行因素都考虑到潮流计算中去, 这就产生了在受限域内的优化解的问题, 即最优潮流问题 (Ambriz-Pérez, 1998)。本书也包含了这一主题。

参考文献

- Ambriz-Pérez, H., 1998, *Flexible AC Transmission Systems Modelling in Optimal Power Flows Using Newton's Method*, PhD thesis, Department of Electronics and Electrical Engineering, University of Glasgow, Glasgow.
- Fuerte-Esquivel, C.R., 1997, *Steady State Modelling and Analysis of Flexible AC Transmission Systems*, PhD thesis, Department of Electronics and Electrical Engineering, University of Glasgow, Glasgow.
- Hingorani, N.G., Gyugyi, L., 2000, *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*, Institute of Electrical and Electronic Engineers, New York.
- IEEE/CIGRÉ (Institute of Electrical and Electronic Engineers/Conseil International des Grands Réseaux Electriques), 1995, *FACTS Overview*, special issue, 95TP108, IEEE Service Centre, Piscataway, NJ.
- Song, Y.H., Johns, A.T., 1999, *Flexible AC Transmission Systems (FACTS)*, Institution of Electrical Engineers, London.