

文章编号: 1005-0523(2001) 01-0009-04

# 柔性交流输电系统与用户电力技术

何人望<sup>1</sup>, 文灵华<sup>2</sup>, 邱万英<sup>1</sup>

(1. 华东交通大学 电信工程学院, 江西 南昌 330013; 2. 赣南师范学院 物理系, 江西 赣州 341000)

**摘要:** 介绍了柔性交流输电系统与用户电力技术的定义、内容、主要功能和产生背景, 指出了它们对输电和配电系统的重大影响<sup>19</sup>。

**关键词:** FACTS; 用户电力技术; 电力系统

**中图分类号:** TM7 **文献标识码:** A

## 1 柔性交流输电系统与用户电力技术

柔性交流输电系统(FACTS) 和用户电力技术(Custom Power) 是美国学者 N·G·Hingorani 于 80 年代中后期(86 年和 88 年) 创建的两项新技术概念<sup>19</sup>。按照 Hingorani 本人的定义: 柔性交流输电系统是一种技术, 这种技术包含了电力电子学在输电领域除直流输电(HVDC) 之外的所有应用<sup>19</sup>。这样, FACTS 与 HVDC 是并行的; FACTS 和 HVDC 包括了电力电子学在输电系统中的一切应用<sup>19</sup>。而用户电力技术包含了两层意思, 第一层意思指的是未来的电力公司或其它组织将为它们的用户提供增值的电能, 即以较少的供电中断和电压变动为用户提供高质量的电能; 第二层意思指的是为了达到此目的, 必须对目前遇到的各种问题采用综合性的解决办法, 而这些解决办法的一个突出特点是在配电系统供电端使用电力电子控制器<sup>19</sup>。

图 1 展示了发电厂如何与互联输电系统相联接, 发电厂的容量和控制手段也许可以通过柔性交流输电系统(FACTS) 这种概念得到加强<sup>19</sup>。在配电系统中, 用户电力技术(Custom Power) 的应用, 可以帮助电力公司提供增值的、高可靠性的、高质量的电能<sup>19</sup>。

如图 1 所示, 柔性交流输电系统和用户技术将分别被用于输电系统和配电系统<sup>19</sup>。它们的共同技术基础是电力电子学, 但它们服务于不同的目的并有不同的经济合理性<sup>19</sup>。因此, 可以这么说, 直流输电, 柔

性交流输电和用户电力技术包含了电力电子技术的整个电力系统中的应用<sup>19</sup>。

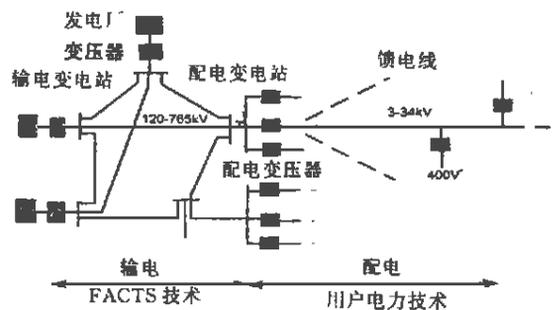


图 1 FACTS & Custom Power 电力系统的简化单线图

## 2 柔性交流输电系统与用户电力技术的内容和功能

FACTS 技术不是一个单独的大功率控制器, 而是用于控制电压、阻抗、相角、电流、无功和有功等相互关联的电气参数的一群控制器, 它们可以独立使用, 也可以分阶段集合使用<sup>19</sup>。表 1 列出了目前已提出的并已被接受的一些 FACTS 控制器<sup>19</sup>。从表 1 可见, 它们的功能是相互交叠的, 因此在使用 FACTS 控制器时, 应根据实际需要作出适当的选择<sup>19</sup>。一般来说, 串联型控制器具有强大的功率控制能力, 被控功率大部分为有功, 少部分为无功; 而并联型控制器对电压和无功功率具有很强的控制能力<sup>19</sup>。

用户电力技术采用的半导体装置及换流器控制

表1 FACTS 控制器及其特征

FACTS 控制器	功能特征
Hingorani 次同步振荡阻尼器 (NGHSSR Damper)	阻尼振荡, 串联阻抗控制, 提高暂态稳定性
静止无功补偿器 (SVC) 包括可控硅投切电容器 (TSC) 和可控硅控制电抗器 (TCR)	电压控制, 无功补偿, 阻尼振荡
可控硅控制串联电容器 (TCSC, CSC, ASC)	功率控制, 串联阻抗补偿, 阻尼振荡, 提高暂态稳定性
静止调相机 (STATCON 或 STATCOM)	电压控制, 无功补偿, 阻尼振荡, 提高暂态稳定性
可控硅控制相角调节器 (TCPAR, PST)	功率控制, 相角控制, 阻尼振荡, 提高暂态稳定性
统一潮流控制器 (UPFC)	功率控制, 无功补偿, 电压控制, 相角控制, 阻尼振荡, 提高暂态稳定性
可控硅控制动态制动器 (TCDB)	阻尼振荡, 提高暂态稳定性

方案尽管与 FACTS 控制器不同, 但从技术本身来讲, 它们有很强的相通性, 有些 FACTS 控制器本身就是用户电力技术装置, 如静止调相机和静止无功补偿器等, 只不过用在较低的电压等级上, 功能侧重有所不同<sup>19</sup>。表 2 列出一些目前已提出的用户电力技术装置<sup>19</sup>。

表2 用户电力技术装置及其特征

用户电力技术装置	功能特征
动态电压恢复器 (DVR)	精确补偿配电母线上的电压扰动和畸变
静止调相机 (STATCON)	调整电压, 控制有功和无功
静止无功补偿器 (SVC)	调整电压, 控制无功
超导磁储能 (SMES)	供电中断时短时提供很大的功率
有源滤波器 (AF)	滤除谐波
固体断路器 (SSB)	在几毫秒的时延内开断线路
故障电流限制器 (FCL)	限制故障电流

### 3 柔性交流输电系统与用户电力技术产生的技术背景

#### 3.1 电力系统的客观需要

FACTS 技术的产生是解决输电系统运行和发展中遇到的各种困难的客观需要<sup>19</sup>。运行方面的主要困难有如下几项:

1) 输电的可控性很差(与发电、配电和用电相比其可控性能是最差的), 功率分布中的自由潮流变化很大<sup>19</sup>。如在美国东西两个大互联网中的大环流高

达几十万千瓦, 前苏联全国统一电力系统中不可控的联络线功率振荡达 60 至 70 万千瓦<sup>19</sup>。大电网运行中的这一类问题长期困扰着运行调度人员, 并且在电网中造成大量电能损耗或被迫降低输送能力<sup>19</sup>。

2) 输电网缺少快速控制手段, 在功率输送过程中常造成功率绕送(即走远道不走近路)和功率倒流(即主输送方向中存在着逆向输送)情况<sup>19</sup>。此外, 还有大量输电受限制的“瓶颈”环节<sup>19</sup>。

3) 开关动作速度慢, 交流输电线需要经常投切, 以改变网络结构或断开故障, 但目前只能依靠机械型断路器<sup>19</sup>。而这处断路器速度慢、维修量大, 是形成暂态稳定问题严重的重要因素<sup>19</sup>。这也是输电可控性差的主要原因之一<sup>19</sup>。

输电系统发展方面的主要困难概括起来有如下几项:

1) 由于环境因素, 很多国家建造新的架空线路已很难获得批准, 因此电力公司不得不将现有电网运行在更高的负荷水平上<sup>19</sup>。但是, 更高的负荷水平增加了功率损耗并降低了可靠性, 使运行更加困难<sup>19</sup>。

2) 在有些国家, 从长远看发电模式是不确定的, 导致了对输电设施投资的困难<sup>19</sup>。使用可延拓现有网络容量并可易地重新安装的设备, 以较少的成本增加了网络的容量, 还避免了冒建造 5 到 10 年后不再需要的输电设施的风险<sup>19</sup>。

3) 有些国家发现, 低水平的负荷增长率使投资建设新的输电线路变得不合算, 而能少量增加现有网络容量以满足低水平负荷增长需要的技术具有很大的优势<sup>19</sup>。

FACTS 技术正适应了上述情况<sup>19</sup>。其效果主要体现在提高了输电网潮流流向的控制能力以及输电线输送能力两个方面<sup>19</sup>。对于发达国家, 两者皆迫切需要<sup>19</sup>。对于象我国这样的发展中国家, 更迫切的是第二方面<sup>19</sup>。

用户电力技术的产生是保证供电可靠性和电能质量的客观需要<sup>19</sup>。近年来, 关于配电系统供电可靠性和电能质量的讨论越来越多, 这些问题可能比输电系统更严重:

1) 网络故障引进的供电中断<sup>19</sup>。

2) 电压波动和闪变, 主要由网络故障以及电容器组、电焊机和电弧炉等工业负荷的投切引起<sup>19</sup>。

3) 电低脉冲整流负荷(特别是由电容器平波的二极管整流器)造成的谐波电流和电压<sup>19</sup>。

4) 由于各相负荷不平衡引起的电压不对称<sup>19</sup>。

对配电系统供电可靠性和电能质量的要求是和

用户的工艺过程水平相联系的<sup>19</sup>在电力出现的早期,电力负荷主要是照明负荷,对供电可靠性和电能质量要求都不高<sup>19</sup>但当主要电力负荷为工、农业生产和商业负荷所代替后,一停电就会造成相当大的经济损失<sup>19</sup>因此就出现了双电源、备用电源、重合装置等技术措施<sup>19</sup>现代的科技进步又促进生产过程自动化和智能化,对供电提出了更高更新的要求<sup>19</sup>新型生产过程的用户,不仅对短时供电中断敏感,而且对诸如电压波动、闪变和谐波等电能质量指标十分敏感<sup>19</sup>一个计算中心失去电压 2 秒就可能破坏几十小时的数据处理结果或者损失几十万美元的产值<sup>19</sup>更严重的是在采用大型机器操作的工厂中,0.1 秒的电压突降可能造成异常生产状况和质量破坏<sup>19</sup>当今自动化设备的连续精加工生产,不论是变速拖动还是机器人、机床还是自动化生产线,柔性制造系统或计算机综合制造系统,可编程逻辑控制器还是重要计算机,它们都对供电提出了更高更严的要求<sup>19</sup>它们对配电系统中的干扰异常敏感<sup>19</sup>甚至几分之一秒的不正常就可在工厂内部造成混乱<sup>19</sup>因此,这些用户对不合格电力的容许度可严格到只有 1~2 个周波<sup>19</sup>例如,超过 2 或 3 周波的电压突降,新型拖动、机床和机器人就不能维持其对生产过程的精确控制<sup>19</sup>

### 3.2 电力电子技术的发展和已有大功率电力电子装置开发和运行经验的积累

电力电子器件是决定 FACTS 装置成本的最基本元件,它不但有能力减少阀的成本,而且有能力减少其它相关部件的成本,包括控制,保护,冷却和建筑成本<sup>19</sup>并影响给定容量下的最佳电压和电流额定值以及几个关键性的性能指标,包括过负荷能力,损耗,换相失败的恢复,和主设备的设计<sup>19</sup>70 年代以来,可控硅器件的额定值有了长足的进步<sup>19</sup>目前,可控硅的开头容量峰值已超过 20 MW<sup>19</sup>将 100 mm 可控硅的电压水平提高到 10 kV 甚至 12 kV 的工作正在进行中,120 mm 的可控硅也正在开发中<sup>19</sup>门极可关断晶闸管 GTO 的额定值也有了很大的提高,并已在 STATCON 中得到应用<sup>19</sup>从长远来看,在诸如 MOS 控制可控硅等具有有效关断能力和低损耗器件方面的进步将导致没有无功要求,没有换相失败和低谐波的换流器<sup>19</sup>性能不断改进的电力电子器件的快速发展为 FACTS 技术的发展创造了可靠的支持条件<sup>19</sup>

在 FACTS 概念形成以前,直流输电技术早已成熟并得到了广泛的应用,已有多种现在属于 FACTS 家族的装置也处于研制或应用中,并已积

累了大量的开发和运行经验<sup>19</sup>这些装置主要的有:

1) 可控硅快速励磁系统<sup>19</sup>作为电力电子学最早影响电力系统的领域之一,装有可控硅换流器的快速励磁系统,其安装位置虽在发电侧,但对输电网的作用相当重要,它不仅控制电网送端的运行参数,而且对暂态稳定,动态和静态稳定,振荡品质等皆有重要影响<sup>19</sup>实际上,在其它 FACTS 控制器大量应用之前,它是电力系统快速控制的主要手段<sup>19</sup>

2) 静止无功补偿器(SVC)<sup>19</sup>第一套大型 TSC 工业装置于 1972 年由瑞典 ASEA 公司生产,容量为 60 Mvar,用于对电弧炼钢炉实现电压闪变抑制和提高经济效益,其可控硅的额定电压是 20 kV<sup>19</sup>1980 年,ASEA 公司首先把 TSC 装置用于南非的 132 kV 输电系统,共计有四组 5 Mvar 的 TSC 和两组 5 Mvar 的 TCR,可控硅阀的额定电压是 2.4 kV<sup>19</sup>1981 年,我国平顶山至武汉的 500 kV 输电系统,在凤凰山变电所从 ASEA 公司引进了两套 60 Mvar 的 TSC,分别与两套 60 Mvar 的 TCR 组成混合型动态无功补偿装置,其可控硅阀的额定电压是 8 kV<sup>19</sup>世界上已投运的输电用 SVC 已接近 180 台<sup>19</sup>我国运行于 500 kV 的也有 5 台<sup>19</sup>

3) 超导磁能存贮(SMES)<sup>19</sup>它是利用电力电子的逆变技术,将超导线圈中存贮的磁能,逆变成交流电送入系统<sup>19</sup>美国 1971 年由 Boom 和 Peterson 提出,经能源部等多年研究于 1983 年在华盛顿州大口马地方投入了一台实用装置<sup>19</sup>该装置的最大容量 10 MV,最大储能 30 MJ<sup>19</sup>设置该装置的目的有二,一是开发这项技术本身需要,另一个目的是在西美电力系统上运行,经过良好的控制以达到消除美国西海岸系统原有的 0.35 Hz 的低频振荡,它的运行是成功的<sup>19</sup>超导磁能存贮在日本,美国,和前苏联中央电力研究所都制成了多种原型和模型,并且已在设计和研制大型超导贮能装置,用于补充电力需要的峰谷<sup>19</sup>

4) Hingorani 次同步振荡阻尼器(NGH-SSR Damper)<sup>19</sup>70 年代早期在美国南加州爱迪生电力公司电网中发生过次同步谐振(SSR)现象并造成严重破坏,随后,对此现象进行了广泛研究<sup>19</sup>各种形式的反 SSR 控制器相继出现,其中由 N.G.Hingorani 本人提出的 NGH-Damper 也于 1984 年投运<sup>19</sup>其结构是将可控硅阀与一个阻尼线圈相串联,再与输电线路上的串补电容并联<sup>19</sup>并用可控硅阀来开闭这个阻尼线圈,以破坏次同步谐振的条件,运行结果表明效果良好<sup>19</sup>

## 4 柔性交流输电系统与用户电力技术的意义

FACTS 技术是根据如下情况而提出的:除基本的热力、机械和电介质方面的限制外,以电力系统的限制是由于对电气上相互关联的参数缺少快速控制手段而造成的,这些相互关联的参数包括电压、阻抗、相角、电流、无功和有功<sup>19</sup>用高速电力电子装置快速控制这些参数中的一个或多个为提高交流输电系统资产的价值开辟了一条道路<sup>19</sup>而这只是出现 FACTS 技术的一个基本原因,它的潜在的价值由于输电系统开放(Transmission Access)这个新的热点已经得到提高,输电系统开发为电力系统做原先设计时并不打算做的事情开创了机会<sup>19</sup>FACTS 是一种赋能的技术,它可以提供新的方法创造出不同于常规的东西<sup>19</sup>对电力公司和制造厂家来说,FACTS 概念是一种具有巨大商业价值的发现<sup>19</sup>尽管 SVC 早已使用,但 FACTS 作为一种高值的技术是在 80 年代中期酝酿并提出的,现在已迎来了它的大发展时期<sup>19</sup>全世界很多电力公司认为在将来竞争激烈的商业环境中,FACTS 技术是必不可少的<sup>19</sup>FACTS 技术具有如下的作用:

- 1) 对功率进行控制以使所需要的功率通过指定的路线<sup>19</sup>这可以按照所有权,通道合同,或者将过载线路上的负荷转移到非过载线路上等原则来实施<sup>19</sup>.
- 2) 保障输电线路的负荷率接近静态或动态极限<sup>19</sup>适应各种紧急状态,从而增加输电系统资产的价值<sup>19</sup>.
- 3) 保障用于紧急功率支持的与邻近电力系统

相联的输电线路的安全,从而减少发电备用容量<sup>19</sup>.

4) 通过限制导致大停电事故的多重故障的影响,抑制转递性跳闸的扩展<sup>19</sup>.

5) 通过提高电压或电流额定值参与并有效地利用输电线路的升级<sup>19</sup>粗略地说,为了适应将来负荷增加的需要而建造更高电压等级网络的概念应作调整,电流升级也是一种有价值的替代方案<sup>19</sup>.

### 参考文献:

- [1] Hingorani N G. Power Electronic Equipment: HVDC and FACTS[C]. CIGRE Session Panel 2-02. Paris France. 28 Aug. to 3 Sep. 1994<sup>19</sup>.
- [2] Hingorani N G. Introducing Custom Power[C]<sup>19</sup>IEEE Spectrum, 1995(6):41-48<sup>19</sup>.
- [3] Miller T J E. Reactive Power Control in Electric Systems. USA[M]<sup>19</sup>John Wiley & Sons, 1982<sup>19</sup>.
- [4] Zhuang Y, Menzies R W. Factors Affecting The Dynamic Performance of A Statcom at a Weak HVDC Terminal[C]<sup>19</sup>CIGRE Session 14-301. Paris France. Sep. 1996<sup>19</sup>.
- [5] Schauder C, et al. TVA STATCON Project: Design, Installation and Commissioning[C]<sup>19</sup>CIGRE Session 14-106. Paris France. Sep. 1996<sup>19</sup>.
- [6] Gyugyi L, et al. Advanced Static Var Compensator Using Gate Turn-off Thyristors for Utility Applications[C]<sup>19</sup>CIGRE Session 23-203. Paris France. Aug. 28 to Sep. 1990, 1<sup>19</sup>.
- [7] B Ooi, M Kazerani, voltage-Source Matrix Converter as a Controller in Flexible AC Transmission Systems[C]<sup>19</sup>IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 13, Number 1, Jan. 1998<sup>19</sup>.

## FACTS and Custom Power Technology

HE Ren-wang<sup>1</sup>, WEN Ling-hua<sup>2</sup>, QIU Wan-ying<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>.School of Electrical and Information Eng. East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; <sup>2</sup>.Physics Dept. South Jiangxi Normal College, Ganzhou 341000, China)

**Abstract:** This paper introduces the definition, contents, main functions and development background of FACTS and custom power technology. Moreover, it points out their far-reaching influences on power systems.

**Key words:** FACTS; custom power; power system