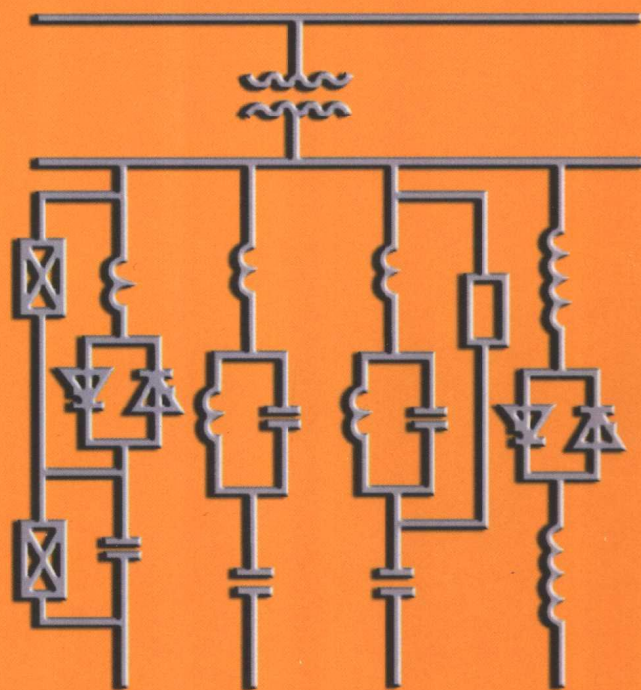


电能变换技术丛书

电力系统并联补偿—— 结构、原理、控制与应用

姜齐荣 谢小荣 陈建业 编著



电能变换技术丛书

电力系统并联补偿

——结构、原理、控制与应用

姜齐荣 谢小荣 陈建业 编著



机械工业出版社

基于电力电子技术的电力系统的并联补偿装置,由于具有控制速度快和能够连续调节的优点,可以有效地维持系统电压,提高输电系统的稳定性和改善电能质量,所以自20世纪70年代问世以来就一直得到世界各国电力公司和工业界的极大重视和广泛应用。随着我国电力工业通过“西电东送,南北互供”向全国性的互联电网发展,应用上述补偿装置的必要性日益突出。本书根据国际上的最新发展和作者自身的研究成果对并联补偿装置的结构、原理和控制进行了详细地讨论。

本书可以作为从事电力系统自动化的工程技术人员在设计、安装和调试各种补偿装置时的参考书,也可供高等院校相关专业的本科生和研究生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统并联补偿:结构、原理、控制与应用/姜齐荣等编著. —北京:机械工业出版社,2004.7

(电能变换技术丛书)

ISBN 7-111 14406-6

I. 电... II. 姜... III. 电力系统—无功补偿
IV. TN714.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第040368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 王玫 责任编辑:赵玲丽

责任印制:施红

北京忠信诚胶印厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004年8月第1版·第1次印刷

787mm×1092mm 1/16·12.25印张·298千字

0001—4000册

定价:20.00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)68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

电 能 变 换 技 术 丛 书

编 辑 委 员 会

主 任：蔡宣三

副 主 任：严仰光 牛新国 倪本来

委 员：牛新国 王 玫 王 聪 毛三可

艾多文 刘凤君 刘胜利 严仰光

何湘宁 张卫平 张 立 张占松

张志国 李厚福 杨继深 沙 斐

陆 鸣 陈 坚 陈永真 陈建业

陈道炼 区健昌 赵良炳 侯振程

倪本来 倪海东 徐德鸿 崔鼎新

黄济青 龚绍文 路秋生 蔡宣三

执行主编：倪本来

责任编辑：王 玫

序

电能是当今最重要的能源形式。很难想像失去电能支撑的文明世界如何运行。在所有的动力资源中，电能使用最方便，适用范围非常广，并且是清洁的。电能变换则是用电之门，是用好电的必由之路。

供人类使用的电能都是通过一些方法生产或收集得来的。世界上绝大部分的电能来自发电站，例如水电站、火力发电厂和核电站，发电站是交流电网的源头。燃油发电机是防备电网故障或远离电网的应急和补充。风力发电、潮汐发电等是自然能与电能之间的有效转换。太阳电池是太空最理想的发电装置。燃料电池、锂离子电池、镍氢电池、镍镉电池、铅酸蓄电池等是经过电化学反应而产生电能的固定或移动式电能载体。形形色色的干电池是一次性的微小电能载体。所有称得上“电池”的都是直流电的储蓄体。

直接从电网或电池汲取的原生态的电能（姑且称之为原电）在某种意义上都是“粗电”。在大多数情况下，使用这些“粗电”都不能尽如人意，譬如电网上的电就不一定好使。电网是共用的，宏观上有高峰期和低谷期之分，电网在高峰期和低谷期的电压存在差异；由于不同用户从电网支取电能的时机和电量的不确定性和偶然性，特别是大型设备的起动和停止，足以给邻近电网造成随机的瞬时冲击和定式落差；由于雷电、风暴、炎热等自然因素造成电网扰动甚至供电瞬时中断等，都将给敏感用户带来麻烦：设备运转失常、系统效率降低、计算机数据丢失、逻辑功能混乱，严重时还将造成系统硬件损坏，使系统工作陷于瘫痪。为此需要稳压器和 UPS 对从电网下载的粗电进行整合和修补。

由于电池自身具有的电容性，电压瞬时波动可能比电网要小。不过电池在工作中也问题不少，最常见的是电池电量随工作时间的延长或用电量的加大会逐渐衰竭；另外，电池单体的电压较低，很少以其自然形态直接拿来使用，多数是串联或串并联组合，但很难保证串联或串并联组合中的每个单体的特性一致。为此，必须实施合理的充电、放电和监控。

太阳电池用来将阳光转换成电能，但阳光的照射会因向背、阴晴、昼夜、四季而不均衡，为此，需要对转换的电能进行收集储存，再经 DC-DC 或 DC-AC 变换，获得稳定的直流电和交流电；风力等自然能发电同样受自然因素牵制，借助风力等自然力传动的发电机输出的电力经常处于不稳定状态，也必须实行调整控制。

不管是电网、电池还是相对独立的供电系统，都存在电磁环境问题。即在运行中因环境电磁干扰（如雷电、汽车点火引发），或共享电源母线的“惹事”负载设备的电磁干扰，或 DC-DC、DC-AC 变换装置自身的电磁干扰，都能搅得“四邻不安”。

今天的电网面临的承载非常严酷。由于功率半导体开关器件的长足进步、控制技术日益先进，变流设备的功率等级提升极快；又由于采用变流举措的负载设备日益增多，其复杂的负载性质带来的负面影响突出。基于这些因素的电网存在功率因数低下、波形畸变、浪涌、相位丢失等不良境况。因此，电能质量控制刻不容缓，电力补偿、有源滤波、柔性输配电等电能变换技术在电网和用户之间能起到较佳的缓冲匹配作用。

能源问题在本世纪仍占据瞩目位置,人们追求在节约电能方面有卓越贡献的高效能供电设备和用电方法。在现实中,相当一部分电能消费是以驱动电动机的形式进行的,如机床、电动工具、电动汽车、城市轻轨、传动系统、机器人、风机、水泵、纺机、空调等等。直接用粗放的原电驱动,免不了要引入串联阻抗或并联阻抗,以控制和调节电动机的运行状态,而这些不得已介入的阻抗会白白消耗电能。为了将这些浪费掉的非常可观的电能拣回来,利用现代电能变换技术对电动机实行变频调速控制,具有很好的节电潜力。

照明用电据称占全球总体用电的20%,节电潜力巨大,起源于欧美的绿色照明浪潮大有席卷全球之势。绿色照明的主题词:最小耗电产生最大流明。除了新型电光源和新型发光介质外,以全新的电能变换技术装备的电子镇流器将是实现绿色照明的主要角色。

生产力越发展,技术越进步,环境问题越加突出。电能的生产、变换、使用在很大程度上影响到环境。电能的生产一般伴随二氧化碳、二氧化硫气体排放,前者是地球温室效应的参与者,后者是酸雨的成因,两者对环境危害都很大。少一点电能生产却能换得环境少一点恶化。生产发展必然要增加电力的需求,关键在于节约电力,减少电力的浪费。这要求我们的电源装置、电能变换系统提高效率。另外,干净的电磁环境也要求电能变换设备在电磁兼容性方面达标。节约电能、电磁兼容、无环境污染的绿色供电势在必行。

21世纪将是科学技术突飞猛进的时代,技术进步定会牵动电能变换技术需求急速膨胀。“电能变换技术丛书”在这一时刻呈献给读者,意在诠释电能变换技术的最新应用。但是电能变换技术是实用性极强的技术,服务于各种领域,内容异常丰富,丛书限于规模实难尽述。不过,我们仍然企望借助几个具有典型意义的层面,如高频功率变换、变频传动、电能质量控制等在学术、产业都呈热点的几个方面展示多彩的电能变换技术应用。丛书主要供中等技术水平的科技人员阅读,在概念和应用实例方面照顾到其他层面的科技人员。丛书的读者定位为电源技术、运动控制、电力电子、电子技术、信息技术、能源转换、过程控制等应用领域的工程技术人员,以及科技爱好者们。读者如能从“电能变换技术丛书”中得到启示,并能在自己的工作实践中获得应用,编者将足以自慰。本丛书从立意到选题到写作内容,定有不足之处,欢迎读者批评斧正。

“电能变换技术丛书”编辑委员会

前言

电力工业是国民经济和社会发展的基础产业,计算机、信息等高新技术的迅速发展和人民生活水平的不断提高,使得整个社会对电力的依赖程度日益增高,一个国家的电气化程度已成为衡量其现代化水平的一个重要标志。近年来,在国民经济持续高速发展的拉动下,我国的电力建设已进入了历史上发展最快的时期,2003年全国共新增大中型发电装机容量2793万kW,到年底我国发电装机总容量已达3.845亿kW。而到2004年底全国发电装机总容量将突破4亿kW大关。尽管如此,我国城乡居民人均用电水平仍是很低,只相当于发达国家的1/10~1/6,与富裕的小康生活水平对电力的要求相差甚远。此外,由于我国电网结构薄弱,再加上电网调峰容量不足,损耗大,供电质量差,远不能满足21世纪对电力供应数量和质量的要求,2003年部分地区出现的严重缺电现象就是一个证明。因此,近若干年内我国电力仍需以较高的速度和更大的规模加以发展。

我国西部十省市水力资源的理论储量和可开发量分别为全国的82%和72%,煤炭保有储量为全国的39%,但这一地区国内生产总值却仅为全国的15%。这种资源与消耗的分布状况决定了我国电力开发与电网网架建设只能依据“西电东送,南北互供”的基本思路,以三峡水电站为核心进行辐射,逐步形成全国互联电网的格局。而为了适应大规模“西电东送”和复杂联网工程的需要,必须进一步提高线路的电力输送能力和输电系统的可靠性,这就使得采用具有优良的电压维持功能的无功功率补偿装置的必要性也变得越来越突出,这也为电力电子技术在我国电力系统中的应用开辟了广阔的前景。而在各种类型的补偿装置中,并联补偿由于具有可靠性和性价比相对较高的特点,得到电力工业界的广泛认同。

采用晶闸管的静止无功补偿器(SVC)自20世纪70年代投入运行以来,已被广泛应用于提高电力系统的稳定性和抑制电压波动,应用于对冲击负荷(如电弧炉)的闪变抑制和对电气化铁路的不平衡补偿之中,被电力公司和工业界公认为是一项成熟并且有效的无功功率管理的手段而加以应用,在全世界的安装容量已高达100 000Mvar以上。

随着大功率可关断器件(如GTO、IGBT、IGCT等)的开发成功和应用技术的不断成熟,使得基于电压(流)源变流器的电力系统补偿装置成为可能。静止同步补偿器(STATCOM)自20世纪90年代问世以来,其优越的性能为电力系统的电压波动抑制和冲击负荷的电压闪变已补偿提供了一个更为有效的控制装置。而有源电力滤波器的应用也为抑制电力系统日益严重的谐波干扰和提高对用户的供电质量提供了可能。目前,基于可关断器件的并联补偿装置已成为灵活交流输电系统(FACTS)技术中发展最快、应用最广的控制装置之一。

就我国而言,自20世纪80年代开始引进SVC技术以来,在上述两个领域均取得了可喜的进展,笔者就亲身参加了SVC、有源滤波器和国内第一台±20Mvar STATCOM的研发工作。但是从总体而言我国和国际先进水平还存在很大的差距,特别在高压,大容量(100Mvar以上)方面就更为明显。巨大的需求和落后的现状给我国电力电子技术工作者提

供了一个广阔的舞台。

本书的目的是跟踪 FACTS 技术在国际和国内的最新发展,结合作者自身在该领域的研究和实践,从应用的角度对在电力系统中得到最为广泛应用的并联补偿装置的原理、结构、控制策略和应用进行全面地讨论,为从事该领域研究和应用的科技工作者、大学本科学生和研究生提供参考。

本书共分 6 章,其中第 1、2 章介绍 FACTS 技术和并联补偿的基本理论知识,第 3 章介绍变阻抗型并联调节器,第 4 章介绍基于电压源逆变器的并联补偿装置,第 5 章介绍用于配电系统的并联型电力滤波器,第 6 章是对全书内容的一个简单的总结和展望。

由于本书作者的水平有限,书中必然存在错误和不妥之处,敬请广大读者加以批评指正。

作 者

2004 年 1 月于清华园

目 录

序

前言

第1章 概 述 1

1.1 灵活交流输电系统(FACTS)和用户电力(Custom Power)技术

综述 1

1.2 电力系统并联补偿的特点与作用 5

1.3 电力系统并联补偿装置的分类 7

1.4 电力系统并联补偿技术的历史与现状 7

第2章 并联补偿的理论基础 10

2.1 瞬时功率概念 10

2.1.1 概 述 10

2.1.2 瞬时无功功率理论 11

2.1.3 瞬时负序与瞬时正序理论 13

2.2 输电系统并联补偿的作用 18

2.2.1 输电系统并联补偿和动态性能控制 19

2.2.2 输电系统并联补偿和暂态稳定控制 20

2.2.3 输电系统并联补偿和振荡稳定控制 23

2.2.4 输电系统并联补偿和电压稳定控制 25

2.3 电能质量和负荷补偿 27

2.4 电力系统谐波与并联补偿 34

第3章 变阻抗型静止无功补偿器 ... 37

3.1 概 述 37

3.2 并联电容器补偿 37

3.2.1 结构和连接方式 37

3.2.2 作用、主要参数和运行特性 ... 38

3.2.3 电容器组 38

3.2.4 变电站并联电容器应用的有关问题 39

3.3 并联饱和电抗器(SR)补偿 ... 43

3.4 晶闸管控制电抗器(TCR) ... 44

3.4.1 结构与原理 44

3.4.2 运行特性 46

3.4.3 谐波分析与抑制 46

3.4.4 晶闸管控制的高阻抗变压器(TCT) 50

3.5 晶闸管投切电容器(TSC) 51

3.5.1 自动投切电容器 51

3.5.2 TSC的结构与原理 51

3.5.3 TSC投入的暂态过程分析 53

3.6 静止无功补偿器(SVC) 57

3.6.1 概 述 57

3.6.2 固定电容-晶闸管控制电抗型无功补偿器(FC-TCR SVC) 58

3.6.3 晶闸管投切电容-晶闸管控制电抗型无功补偿器(TSC-TCR SVC) 61

3.6.4 机械开关投切电容-晶闸管控制电抗型无功补偿器(MSC-TCR SVC) 63

3.7 SVC的控制策略 64

3.7.1 面向电力系统的对称控制策略 64

3.7.2 面向负荷的控制策略 67

3.7.3 数字控制系统 70

3.8 SVC工程实例 73

3.8.1 美国埃迪(EDDY)变电所高压直流联络线的并联无功补偿 73

3.8.2 武钢硅钢厂 SVC工程 76

第4章 电压源逆变器型静止功率补

偿器	80
4.1 概 述	80
4.2 静止同步补偿器(STATCOM)的 工作原理	81
4.3 STATCOM 的电路结构和工作原 理	82
4.4 STATCOM 的数学模型	92
4.4.1 STATCOM 装置的数学模型的 建立	92
4.4.2 STATCOM 装置的稳态功率与 电流	95
4.4.3 STATCOM 装置的非线性数学 模型	96
4.5 STATCOM 的运行分析	97
4.5.1 STATCOM 装置的稳定性 分析	97
4.5.2 STATCOM 装置的响应 时间	98
4.5.3 STATCOM 装置的电感参数对电容 电压稳态值的影响	98
4.5.4 STATCOM 装置的安全运行 区域	99
4.6 STATCOM 的控制	100
4.6.1 STATCOM 的控制系统 结构	100
4.6.2 STATCOM 装置常用的控制 算法	102
4.6.3 模糊逻辑多目标、自适应、非线性的 STATCOM 控制器	103
4.7 STATCOM 工程实例	110
4.8 STATCOM 与 SVC 的 比较	113
4.8.1 无功功率特性的比较	113
4.8.2 对提高输电系统稳定性能力的 比较	113

4.8.3 其它方面的比较	115
---------------------	-----

4.9 SVS 的运行特性与控制 策略	117
------------------------------	-----

4.9.1 SVS 的运行特性	117
-----------------------	-----

4.9.2 SVS 的控制策略	120
-----------------------	-----

4.10 储能系统	129
-----------------	-----

4.10.1 电池储能系统(BESS)	129
---------------------------	-----

4.10.2 超导储能系统(SMES)	130
---------------------------	-----

第5章 并联型电力滤波器

5.1 概 述	132
---------------	-----

5.2 并联型无源滤波器简介	134
----------------------	-----

5.3 并联型有源电力滤波器的 构成	136
-----------------------------	-----

5.3.1 主电路	136
-----------------	-----

5.3.2 控制系统	139
------------------	-----

5.4 并联型有源电力滤波器的控制与 运行分析	140
----------------------------------	-----

5.4.1 有源滤波器主电路参数的 选择	140
-------------------------------	-----

5.4.2 有源滤波器的谐波检测 算法	143
------------------------------	-----

5.4.3 有源滤波器的控制算法	153
------------------------	-----

5.4.4 有源滤波器的脉冲发生 方法	160
------------------------------	-----

5.5 混合型电力滤波器	165
--------------------	-----

5.6 有源电力滤波器的工程实例	170
---------------------------	-----

5.6.1 装置的基本结构	170
---------------------	-----

5.6.2 控制系统的基本功能与控制 算法	170
--------------------------------	-----

5.6.3 10kVA 有源滤波器装置	173
---------------------------	-----

5.6.4 10kVA 有源滤波器装置实验 波形	174
-----------------------------------	-----

第6章 总结与展望

附录 术语英汉对照及说明	178
--------------------	-----

参考文献	182
------------	-----

第1章 概述

1.1 灵活交流输电系统(FACTS)和用户电力(Custom Power)技术综述

2000年底,我国已形成了7个跨省电网和5个独立的省电网。7个跨省电网中,有6个已形成以500kV为主干、220kV为骨干、110kV为高压配电的电网结构。2002年全国总装机容量达到3.5亿kW,发电量超过1.4万亿kW·h。但我国人均装机容量仅0.3kW,属于电力穷国。随着我国经济的快速发展,电力需求日益增加,据预测到2020年,我国发电装机容量将达9~10亿kW,今后每年投运的容量至少2千万kW。由于我国经济发展不平衡,一次能源地理分布不均,因此我国电力发展的基本国策为“西电东送,全国联网,南北互济,厂网分开”。我国电力系统要实现上述目标,还面临着以下问题:

(1)由于我国一次能源地理分布不均,煤和水力资源主要在西部,为满足东部发达地区的电力需求,大量的电能将通过长距离输电线送到东部的负荷中心(如北京、上海和广东地区)。据预计,2020年我国西电东送电力将达到1.2~1.5亿kW,要输送如此大的功率,需要建设许多条远距离输电线,但我国西部地形复杂,到处是崇山峻岭,建设输电线造价高昂。另外现在申请输电走廊受到环境保护的限制,因此建设过多的远距离输电线是不可行也是不现实的。有效的解决方法是建立适当数量的输电线,利用各种技术尽可能提高输电线的输送容量。实际上输电线输送容量主要受稳定性的限制,这包括:静态稳定性;暂态稳定性;热稳定性。对于长距离输电线而言,其热稳定极限很高,与短线路没有区别,但受其余三项限制,使线路输送容量无法达到其热稳定极限。因此如何尽可能将长距离输电线的输送容量提高到其热稳定极限,是大容量远距离输送电能需要解决的一个重要问题。

(2)对于有多条平行输电线的复杂输电系统而言(西电东送必然是多条平行的输电线),由于线路的潮流是根据线路阻抗来分配的,而实际的功率分布和走向对系统静态或事故后的运行有重要影响。如果功率分布和走向不当会引起:

1)部分线路及其两端设备严重过负荷,而其它线路则轻负荷,不仅使已有设备不能充分利用还常常引发稳定问题;

2)整个系统的有功功率损耗增加,系统运行很不经济;

3)形成环流;

4)系统无功功率分配不当,电压质量变差;

5)导致局部地方短路水平过高。

随着我国电力改革的进一步深入,还存在如何在输电线上适当分配各用户功率的商业问题(国外已经遇到),因此迫切需要能控制复杂电网功率分布和走向的设备;这种控制虽然不需要快速操作,但需要进行频繁操作,以平滑调节潮流分布。

(3)全国互联电力系统是空前巨大的电力系统,互联后会减弱系统的阻尼,系统阻尼偏低导致低频振荡的出现,为此需要能增强系统阻尼的控制设备。

(4)随着电力系统的发展,各种新型冲击性负荷(如工业电弧炉、电力机车、轧钢机等)使低压配电网电压波动频繁,大型半导体整流设备等在电网中造成谐波,使电压质量变差,影响了原先设备的工作。同时新的敏感设备大量出现(如半导体制造厂等),对电能质量提出了更高的要求,因此迫切需要改善电能质量的控制设备。

(5)大电网一旦出现事故,会导致大面积停电,对国民经济造成巨大损失,严重影响人民生活,如美国 2003 年 8 月 14 日停电造成的损失高达 300 亿美元,我国虽然还没有出现如此大的事故,但小范围的局部停电事故也时有发生。因此提高大电网电能质量和安全稳定运行水平是当务之急。特别是我国重负荷中心——北京、上海、广东地区的动态电压安全稳定隐患大,需要采取强有力的措施提高安全稳定运行水平。

多年来,电力工作者已达成共识:提高电网的安全运行水平和电能质量,除电网结构本身要合理外,还必须要有先进的调节控制手段。电网的安全、经济运行在很大程度上取决于其“可控度”。为此,人们不断地研究如何用电网原有控制手段来提高其安全运行水平和电能质量,如用发电机励磁控制器来提高输电线输送容量,阻尼系统振荡等。同时又研制了一些新设备来解决上述问题,这包括串联电容、并联电容、并联电抗、电气制动电阻以及移相等。这些设备的共同特点是按照固定的、机械投切的分接头转换的方式来设计,以改变线路阻抗或减小电压波动,提高输电线输送容量或在静态及缓慢变化的状态下控制系统潮流。由于机械开关动作速度慢,在动态过程中(如对暂态稳定进行控制时),这些控制器几乎无法起作用;而如固定串补电容类的补偿装置还易引起次同步振荡(SSO)。此外,许多控制问题要求补偿装置能频繁动作,而机械式开关如动作过频则易损坏、可靠性差。因此,传统的系统动态稳定问题通常是针对一些预想的系统紧急状态,通过保守的设计,留出较大的稳定储备来加以解决。这就使输电系统的能力没有被充分利用,经济性差。

可以设想,如果有快速的可频繁、可靠动作的开关代替上述机械式开关,情况就将大不一样。在信息技术领域,小功率电子开关的广应用使信号处理、计算机技术发生了翻天覆地的变化;在电能变换领域,大功率电子开关的广泛应用也将在电力系统中引起革命性的变革。近 20 年来,大功率电力电子开关制造技术取得了长足的进步。现在,制造耐热和耐冲击能力与大功率传输线正常工作和短路电流水平相当的电能变换装置已不再困难,高压直流输电(HVDC)和静止无功补偿器(SVC)就是这种技术的成功范例。正是在此基础上,针对大型互联电力系统存在的问题,N. H. Hingorani 于 1986 年提出了灵活交流输电系统(Flexible AC Transmission Systems, FACTS)的概念,它“应用电力电子技术的最新发展成就以及现代控制技术实现对交流输电系统参数,以至网络结构的灵活快速控制,以期实现输送功率的合理分配,降低功率损耗和发电成本,大幅度提高系统稳定性、可靠性”。它一方面是现代电力电子开关与电力系统传统的阻抗控制元件、功角控制元件以及电压控制元件(如串补电容、并联电容、并联电抗、移相器、电气制动电阻等)相结合的产物,另一方面又将电子技术引入电力系统,形成了以变流器为核心的新型控制设备(如静止同步补偿器(Static Synchronous Compensator, STATCOM)),从而使电力系统中影响潮流分布的三个电气参数:电压、线路阻抗及功率角可按系统的要求迅速调整。另外,FACTS 装置还可以逐渐地加入现行电力系统,与现有的交流输电系统完全兼容,因此 FACTS 概念一经提出就立即受到广泛重视。

目前,电力系统中应用最多的 FACTS 设备是静止无功补偿器(SVC),世界上已投运或即将投运的 SVC 数目已达上千台,其中仅 ABB 公司制造的就达 372 台,容量达 51000Mvar。我

国电力系统和工业企业应用的 SVC 装置也达数十台。新型 STATCOM 装置(也称为 SVC-Light)是 SVC 的改进型,其无功电流不依赖于电压,因而在系统电压低时调节能力比 SVC 强,国外已经有多台工业装置在电力系统和工业企业(如冶金企业)运行,我国自行研制的 $\pm 20\text{Mvar}$ STATCOM 工业样机装置也已经在河南电力公司朝阳变电站运行,应用于上海电力系统的 $\pm 50\text{Mvar}$ STATCOM 工业装置也正在研制中。用于提高输电线输送容量、控制潮流、抑制振荡的可控串联补偿器(Thyristor Controlled Series Compensation, TCSC)也已在国内外获得大量应用,我国正在自行研制 TCSC 工业装置,预计 2004 年即可以在现场投入运行。功能最为全面的 FACTS 设备——统一潮流控制器(Unified Power Flow Controller, UPFC)已经在美国电力系统投入运行。除此以外,FACTS 的家族中的超导储能、固态断路器、静止移相器、短路电流限制器、动态电压限制器、电力系统电压品质调节器等一系列设备也将在电力系统中陆续获得应用。

FACTS 设备投入运行在互联电力系统中增加了极其强有力的控制手段。它可以用来提高系统的静态、暂态稳定极限及电压稳定性,从而将输电线的输送容量提高至其热稳定极限。对于长距离输电线,可以用 SVC、STATCOM 等并联补偿装置进行无功补偿,维持线路电压在正常水平,阻尼功率振荡,改善系统阻尼;而 TCSC 等串联补偿装置则可以用来减小线路电抗,提高线路输送容量,阻尼系统次同步振荡。此外,无论 SVC、STATCOM 或 TCSC 均可用来改进系统的静态和暂态稳定性。综合串并联补偿装置优点的统一潮流控制器(UPFC)更方便地控制电力系统的基本参数(电压、阻抗、相角),实现线路潮流的准确调节,并可提高输送能力及阻尼振荡,提高系统稳定性。2003 年 8 月 14 日美国东部发生的大停电进一步为世界各地的电力系统的安全稳定运行敲响了警钟,在现有电力系统中安装 FACTS 设备,增加系统的调控手段,提高电力系统的安全稳定性成为各国电力系统关心的问题。我国电力系统要成功实现“西电东送,南北互济,全国联网,厂网分开”的目标,保证全国电力系统的安全稳定运行,FACTS 技术必将发挥重要的作用。由于我国输电网网架相对薄弱,FACTS 技术将大有用武之地,例如在西电东送的输电线路路上安装动态无功补偿装置,保证线路中点电压恒定,同时安装可控串联补偿(如 TCSC 或静止同步串联补偿器(Static Synchronous Series Compensator, SSSC)),可以大大提高输电线的输送容量,充分利用远距离输电线,减少输电走廊的建设,具有重要意义。因此国家中长期能源规划确定的电力系统 10 个主要发展方向中,发展 FACTS 技术成为重中之重。又如,我国许多重负荷中心(如北京、上海和广东地区),随着老式的调相机退出运行,动态无功支撑能力远远不足,存在严重的安全稳定隐患,因此,采用 FACTS 技术,在这些负荷中心安装快速的动态无功补偿装置(如 SVC 或 STATCOM 装置)将能大大提高负荷中心的动态电压稳定性,具有非常现实的意义。可以预言,伴随着电力电子技术的进步,FACTS 装置将变得更先进,FACTS 技术将大量应用于电力系统,本世纪的互联电力系统将成为一个可完全实时快速控制的名副其实的柔性电力系统,这种系统将以最少的成本为用户提供品质优良、稳定、安全可靠的电力。

FACTS 装置在输电系统获得快速应用的同时,配电系统的电能质量问题因新的非线性负荷的引入而恶化,随着信息时代的来临,制造业及日常生活中都出现了敏感负荷,电能质量的恶化严重影响这些负荷的正常工作,现代社会高技术竞争日趋激烈,用户将越来越难以忍受因电能质量问题造成的损失。根据统计,一次电压波动可能造成大型半导体制造工厂上百万美元的损失,计算机等信息设备数据丢失、死机有 43.5%是因电压质量特别是动态电压质量

问题造成的。因此高新技术企业对电能质量的要求和依赖性越来越高,国内已有多起因电能质量原因导致重大事故发生和外商撤资的案例。高新技术用户及与国民经济、人们生活密切相关的部门、企业(如通信数据系统、金融数据系统、IT 行业、精密加工业等)因供电系统动态电能质量问题影响,引起其试验失败、数据丢失、设备损坏、产品报废等重大事故,所造成的政治影响和经济损失是不可忽视的。同时电能质量的恶化也降低了配电系统的效率,如谐波的存在要占用配电系统的容量,挤压了基波容量的空间,谐波还带来损耗,降低了电能的利用效率。配电系统的电能质量问题还可能影响输电系统的效率,降低输电系统的安全稳定运行水平。因此电能质量问题也引起了电力部门、用户的空前重视。如何提高电能质量,为用户提供优质可靠的电能是供电部门的应尽职责。正是基于这种需求,用于输电系统的 FACTS 技术逐步延伸到配电系统,形成了以变流器为核心的电能质量控制技术,简称为用户电力技术(Custom Power),也称为 DFACTS 技术。

目前,广泛应用的用户电力技术控制装置有电力有源滤波器(Active Power Filter, APF),动态电压调节器(Dynamic Voltage Regulator, DVR),配电系统静止补偿器(Distribution STATCOM, DSTATCOM),统一电能质量控制器(Unified Power Quality Controller, UPQC)以及不停电电源(Uninterrupted Power Supply, UPS)等等。APF 可以动态跟踪并补偿负荷谐波,防止非线性负荷的谐波注入电力系统,污染系统电压。DVR 装置串联在供电系统与负荷之间,一旦系统电压发生波动,DVR 装置快速产生电压对系统电压进行补偿,保证负荷侧电压为高质量的额定的基波正序电压,从而保证敏感负荷不因系统电压波动而受到影响。DSTATCOM 装置可以补偿负荷的无功功率和不对称,保证注入系统的电流为对称的有功电流,使负荷功率因数接近 1。而 UPQC 则可以在保证负荷侧电压高质量的同时防止谐波电流注入配电系统,污染系统。目前各种用户电力技术已经开始获得应用,如在银行系统、通信系统中 UPS 装置的广泛应用;半导体制造工厂、奶粉制造工厂应用 DVR 装置提高动态电压质量,保证产品的高品质;APF 装置应用于智能化大楼,防止谐波注入配电系统污染电源。随着人们对电能质量要求的进一步提高,DFACTS 技术将成为改善配电系统电能质量必备技术手段。

目前已有的 FACTS 和 DFACTS 装置已达几十种,现列举一些如下:

- 1) 静止无功补偿器(Static Var Compensator, SVC);
- 2) 晶闸管投切电容器(Thyristor Switched Capacitor, TSC);
- 3) 晶闸管控制的电抗器(Thyristor Controller Reactor, TCR);
- 4) 静止同步补偿器(Static Synchronous Compensator, STATCOM);
- 5) 可控串联电容补偿器(Thyristor Controlled Series Capacitor, TCSC);
- 6) 静止同步串联补偿器(Static Synchronous Series Compensator, SSSC);
- 7) 晶闸管控制的移相器(Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer, TCPST);
- 8) 统一潮流控制器(Unified Power Flow Controller, UPFC);
- 9) 相间潮流控制器(Inter Phase Power Flow Controller, IPFC);
- 10) 串联潮流控制器(Series Power Flow Controller, SPFC);
- 11) 固态断路器(Solid State Current Breaker, SSCB);
- 12) 晶闸管控制的制动电阻(Thyristor Controlled Braking Resistor, TCBR);
- 13) 晶闸管控制的分接头有载调节变压器(Thyristor Controlled Tap Changer, TCTC);

- 14) 次同步谐振阻尼器(NGH-Subsynchronous Resonance Damper, NGH-SSR Damper);
- 15) 晶闸管控制的铁磁谐振阻尼器(Thyristor Controlled Ferromagnetic Resonance, TC-FRD);
- 16) 短路电流限制器(Short Circuit Current Limiter, SSCL);
- 17) 电力有源滤波器(Active Power Filter, APF);
- 18) 动态电压调节器(Dynamic Voltage Regulator, DVR);
- 19) 超导储能系统(Superconducting Magnetic Energy System, SMES);
- 20) 电池储能系统(Battery Energy Storage System, BESS);
- 21) 配电系统静止同步补偿器(Distribution Static Synchronous Compensator, DSTATCM);
- 22) 统一电能质量控制器(Unified Power Quality Controller, UPQC);
- 23) 不间断停电电源(Uninterrupted Power Supply, UPS)。

1.2 电力系统并联补偿的特点与作用

根据连接方式不同,电力系统补偿方式可以分为并联补偿、串联补偿和串并联混合补偿三种,其结构和功能如图 1-1 所示。而由于并联补偿方式接入和切除都很方便,因此在电力系统中得到最为广泛的应用。电力系统并联补偿具有如下特点:

(1) 并联补偿只需要电力系统提供一个节点,并联补偿的另一端为大地或悬空的中性点,因此并联补偿装置可以容易地接入电力系统。

(2) 并联补偿不会改变电力系统的结构,接入方式简单,并联补偿可以在系统正常运行时接入系统,通过调节并联补偿,可以将并联补偿接入造成的影响尽量减到最小,许多情况下可以做到无冲击投入运行和无冲击退出运行。最典型的例子是发电机并网运行,当调节发电机的输出电压大小、频率和相位与系统电压大小、频率和相位完全相等时,发电机可以无冲击并网。由于电力系统对安全稳定运行的要求很高,因此并联补偿的这个特点使电力系统容易接受并联补偿,而对其它的补偿方式则相对保守。

(3) 并联补偿装置要么只改变节点导纳矩阵的对角线元素,要么可以等效为注入电力系统的电流源,因此并联补偿接入后,电力系统的复杂程度增加不多,利于分析,这是并联补偿的又一大特点和好处。

(4) 由于电力系统本身具有较大的短路容量,并联补偿装置与所接入点的短路容量相比通常较小,因此并联补偿对节点电压的控制能力通常较弱,它主要通过注入或吸收电流改变系统中电流的分布。因此并联补偿适合于补偿电流,对于电压的补偿能力相对较弱。

(5) 由于并联补偿只能控制接入点的电流,而电流进入电力系统后如何分布由系统本身确定,因此并联补偿产生补偿效果后通常可以使节点附近的区域受益,适合于电力部门采用,而串联补偿可以针对特定的用户,因而对特定用户的补偿采用串联补偿更加合适。也是基于上述特点,电流源性质的装置比电压源性质的装置更加适合于作为并联补偿。

(6) 并联补偿装置需要承受全部的节点电压,而其输出电流要么是由所承受的电压决定的,要么是可以控制的。因此并联补偿装置通常受系统电压的限制。

并联补偿可以改变系统的导纳矩阵的对角元素或向系统中注入电流,因此通过并联补偿

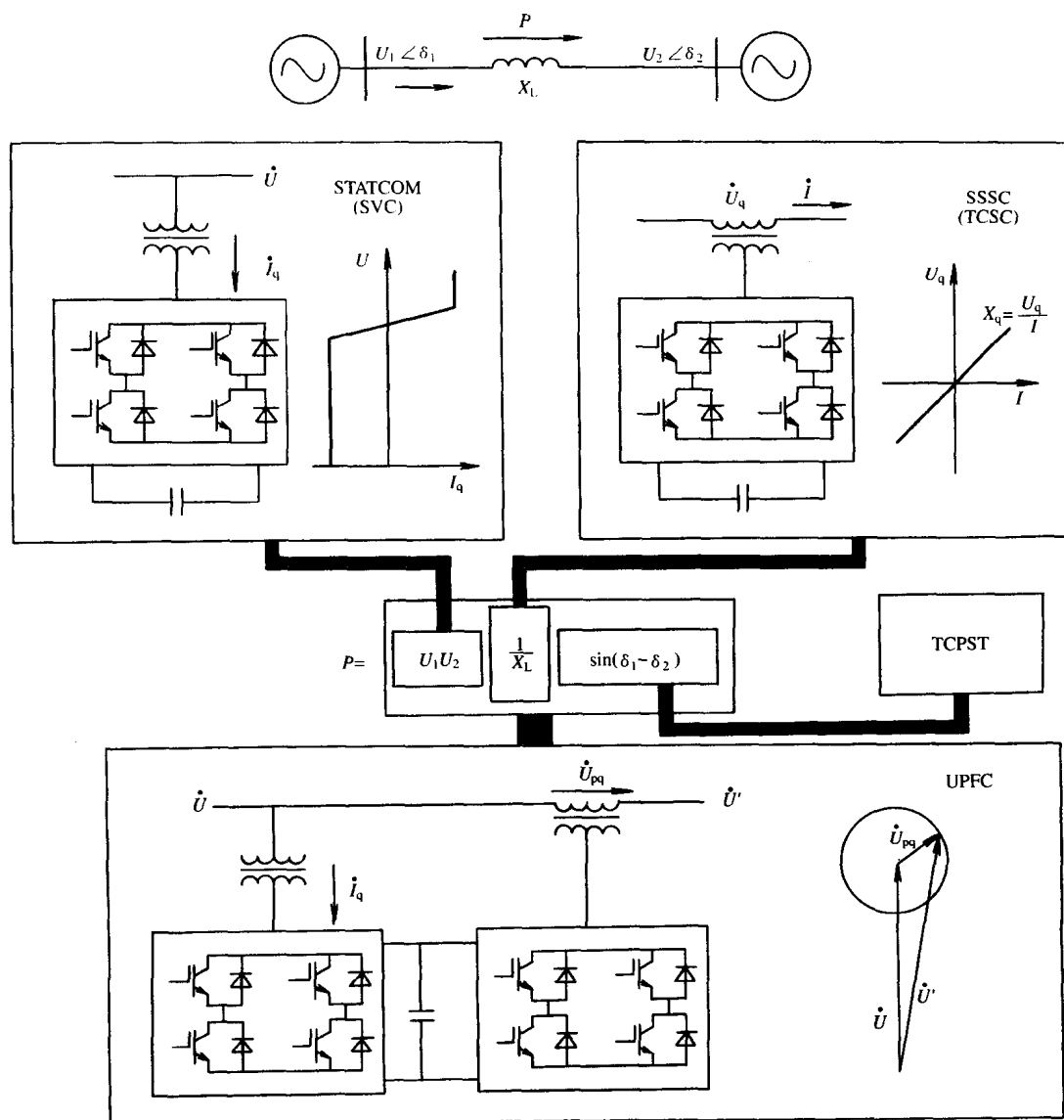


图 1-1 FACTS 装置的结构和原理

可以方便地向系统注入或从系统吸收有功功率,向系统注入或从系统中吸收无功功率。因此并联补偿可以控制电力系统的有功功率或无功功率的平衡。正是并联补偿的上述两种能力,使得并联补偿对电力系统具有如下作用:

- 1) 维持或控制节点电压;
- 2) 向电力系统提供或从系统中吸收有功功率;
- 3) 向电力系统提供或从系统中吸收无功功率;
- 4) 通过控制功率变化,阻尼系统振荡;
- 5) 改变电力系统的动态特性;
- 6) 提高电力系统的静态稳定性;
- 7) 快速可控的并联补偿可以提高电力系统的暂态稳定性;

8)改变系统的阻抗特性;

9)提高系统的电能质量。

并联补偿在电力系统中的广泛应用,将大大提高电力系统的安全稳定性,供电可靠性和运行效率,同时大大提高供电系统的电能质量。

1.3 电力系统并联补偿装置的分类

电力系统并联补偿装置可以按照不同的标准进行分类,如按照并联补偿装置器件不同可以分为机械投切阻抗型装置,如传统的断路器投切电抗器、电容器等;晶闸管投切或控制的阻抗型装置,如 SVC 等;基于变流器的可控型有源补偿装置,如 STATCOM、APF 等。如果按照并联补偿装置输出功率的性质可以分为有功功率与无功功率并联补偿装置,如抽水蓄能电站、并联超导储能系统、电池储能系统、飞轮储能系统等;无功功率并联补偿装置,如 SVC、STATCOM、同步调相机、APF、可投切电抗器等;有功功率并联补偿装置,如晶闸管控制的并联制动电阻装置等。还可以按照并联补偿装置的响应速度分为慢速型装置、中速型装置以及快速型装置。按照并联补偿装置安装系统不同还可以分为输电系统并联补偿装置和配电系统并联补偿装置。其中输电系统并联补偿装置主要是保证输电系统安全可靠输送电能及保证系统安全稳定运行,而配电系统并联补偿装置主要作用是维持节点电压,保证为用户提供高质量的电能。还可以按照并联补偿装置的电压等级分为低压并联补偿装置、中压并联补偿装置与高压并联补偿装置。

而按补偿对象不同无功补偿技术又可分为负荷补偿和系统补偿两类。负荷补偿通常是指在靠近负荷处对单个或一组负荷的无功功率进行补偿,其目的是提高负荷的功率因数,改善电压质量,减少或消除由于冲击性负荷、不对称负荷和非线性负荷等引起的电压波动、电压闪变、三相电压不平衡及电压和电流波形畸变等危害。系统补偿则通常指对交流输配电系统进行补偿,目的是维持电网枢纽点处的电压稳定,提高系统的稳定性,增大线路的输送能力以及优化无功潮流,降低线损等。

1.4 电力系统并联补偿技术的历史与现状

从电力系统的诞生开始,并联补偿技术就开始在电力系统中应用,同步发电机可以看作是最早的并联补偿装置。随着电力系统的发展,各种并联补偿装置不断出现,如采用机械投切的电容器和电抗器对系统进行无功功率补偿,改善系统的电压水平;在发电机端口,采用机械投切的制动电阻,在输电线出现故障时,投入电阻吸收有功功率,尽量维持发电机输出的电磁功率与原动机功率的平衡,提高电力系统的暂态稳定性。由于机械投切电容或电抗器会造成较大的冲击,人们开始在负荷中心安装同步调相机,调相机可以平滑调节无功功率,而且既可以吸收也可以发出无功功率,因此具有较强的补偿控制功能,对调节负荷中心的无功功率平衡和维持负荷中心的电压水平有重要的作用。但是,由于电力系统发电、输电、配电与用电必须同时完成,系统始终要处于动态的平衡状态,电力系统瞬时的不平衡可能导致安全稳定问题,因此要求并联补偿装置具有快速的响应,如达到周波级的响应速度,才能用于处理系统的问题。由于机械投切装置惯性大,动作时间在秒级,满足不了电力系统对快速性的要求,而随着大功