

STATCOM

静止同步补偿器(STATCOM) 的原理与实现

罗承廉
纪 勇 编著
刘遵义



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



静止同步补偿器 (STATCOM) 的原理与实现

罗承廉
纪 勇 编著
刘遵义



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

前言



静止同步补偿器 (STATCOM) 是柔性交流输电系统 (FACTS) 的一个重要组成部分, 是静止无功补偿的发展方向, 近年来在世界各地都得到了广泛的应用。河南省电力公司通过与清华大学合作, 成功地研制出国内第一台 $\pm 300\text{kvar}$ STATCOM 工业样机和 $\pm 20\text{Mvar}$ STATCOM, 标志着我国在这一领域的工业应用研究处于世界先进水平。在研制 STATCOM 的过程中, 合作双方有大量的研究成果问世, 但是, 这些成果散见于各种学术刊物, 没有被系统地整理成专著。为此, 作者收集了近年来发表的大量文章及有关的第一手资料, 结合工程设计的需要编写了本书。因此, 本书不仅系统地阐述了 STATCOM 的基本原理和特性, 而且以实际装置为背景, 对 STATCOM 的主电路、控制系统、监测系统和保护体系的设计与实现进行了系统的介绍。

本书将有关 STATCOM 的理论分析、仿真研究和具体实现紧密地结合在一起, 理论性和实践性都很强。本书中:

第二章介绍了 STATCOM 的原理、建立了其数学模型, 在此基础上分析了 STATCOM 的运行特性。

第三章介绍了器件 (GTO、IGCT、IEGT 等) 利用率等一些基本概念, 为科学地比较主电路方案提供定性和定量的依据, 并在此基础上以设计 $\pm 100\text{Mvar}$ STATCOM 装置主电路为例对各个方案进行分析和比较。

第四章将瞬时无功功率和瞬时电压有效值、瞬时电流有效值等概念用于 $\pm 20\text{Mvar}$ STATCOM 控制系统, 针对电力系统对控制要求多目标的特点, 为 $\pm 20\text{Mvar}$ STATCOM 设计了多目标协调控制器, 并详细介绍了 $\pm 20\text{Mvar}$ STATCOM 控制系统的具体实现。

第五章针对电力系统出现故障或大扰动时, STATCOM 处于异常状态下的运行行为进行了分析, 给出了此时 STATCOM 在系统中的等效电路, 指出了在三相对称的逆变调制方式下, 处于异常状态的 STATCOM 只能通过对 STATCOM 正序电流的快速控制来抵御系统对 STATCOM 的影响, 分析了上述控制方式的有效性和局限性, 结合系统的电压状况及 STATCOM 的电压、电流承受能力描述了 STATCOM 的安全运行区域。

第六章以 $\pm 20\text{Mvar}$ STATCOM 的主电路结构为研究对象, 在电路分析的基础上, 对装置可能出现的故障进行了系统的研究, 通过仿真和计算分析了故障对 STATCOM 及系统的影响, 并根据这些研究结果, 制定了相应的保护判据和保护措施, 用于在故障状态下对 STATCOM 进行保护。

第七章介绍了在封锁脉冲运行方式下 STATCOM 直流侧电容过电压的产生机理, 在数值计算和机理研究的基础上提出了防止过电压的对策, 通过在 $\pm 300\text{kvar}$ STATCOM 上进行对比试验, 验证了研究成果的有效性。

第八章分析了 STATCOM 监测系统的要求, 并基于这些要求详细介绍了 $\pm 20\text{Mvar}$

STATCOM 监测系统的设计和软、硬件实现。

本书提供了大量的技术细节，通过本书可以对 STATCOM 的设计与实现有一个全面而深入的了解。

本书是河南省电力公司和清华大学 STATCOM 联合项目组集体智慧的结晶。清华大学韩英铎院士、王仲鸿教授、刘文华教授、姜齐荣博士、梁旭博士等的研究成果，不仅为项目的成功完成做出了卓越的贡献，而且也为本书的编著提供了详实的技术素材，在此作者向他们表示衷心的感谢。

由于作者学识所限，书中不妥之处恳请读者不吝赐教。

罗承康

2005 年 1 月

目 录



前言

第一章 绪论	1
第一节 FACTS 及各种 FACTS 装置	1
第二节 应用 FACTS 技术解决我国电网面临的问题	2
第三节 STATCOM 的研究历史与现状	4
第二章 STATCOM 装置的基本原理	6
第一节 STATCOM 的工作原理	6
第二节 STATCOM 与 SVC 的比较	7
第三节 STATCOM 的时域数学模型	11
第四节 STATCOM 的特性分析	21
第三章 STATCOM 装置的主电路设计	25
第一节 提高电压型逆变器容量的几种主要措施	25
第二节 相关的概念、定义和分析	29
第三节 大容量 STATCOM 的主电路方案研究	34
第四节 STATCOM 的主电路设计参数选取	57
第四章 STATCOM 装置的控制系统设计	65
第一节 概述	65
第二节 STATCOM 多目标自适应控制	66
第三节 瞬时电气量在 STATCOM 控制中的应用	72
第四节 STATCOM 控制器总体设计	74
第五节 STATCOM 脉冲发生器的设计	76
第六节 $\pm 20\text{Mvar}$ STATCOM 控制器硬件设计	82
第七节 $\pm 20\text{Mvar}$ STATCOM 控制方式	85
第八节 $\pm 20\text{Mvar}$ STATCOM 控制器软件设计	87
第五章 STATCOM 在电力系统大扰动下的运行分析及保护性控制	90
第一节 概述	90
第二节 电力系统发生对称故障时 STATCOM 的运行分析	90
第三节 电力系统发生不对称故障时 STATCOM 的运行分析	92
第四节 STATCOM 在系统故障下的安全运行范围及保护性控制的提出	97
第五节 故障期间 STATCOM 正序电流的控制	100
第六节 系统运行状态突变瞬间 STATCOM 的可控性探讨	103
第六章 STATCOM 故障分析及保护措施	109

第一节	概述	109
第二节	直流电容短路故障及保护	109
第三节	桥臂直通故障的 GTO 关断保护	114
第四节	STATCOM 过电流保护的设计	122
第五节	脉冲发生器故障及诊断	127
第六节	GTO 及其驱动电路故障的分析与诊断	130
第七章	STATCOM 封锁脉冲运行方式的研究	135
第一节	概述	135
第二节	不考虑变压器磁路饱和时封锁脉冲后电容电压的变化	136
第三节	考虑变压器磁路饱和时封锁脉冲后的电容电压	141
第四节	封锁脉冲后直流侧过电压的抑制	147
第五节	GTO 驱动脉冲的恢复	152
第八章	STATCOM 装置的监测系统设计	156
第一节	监测系统的总体设计	156
第二节	监测系统中的电气量测量	157
第三节	$\pm 20\text{Mvar}$ STATCOM 监测系统的实现	160
参考文献		175

第一章

绪 论

第一节 FACTS 及各种 FACTS 装置

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“可调度”。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,在动态过程中如控制暂态稳定,这些控制器几乎无法起作用,像固定串补电容还易引起次同步谐振(SSR)。许多控制要求频繁动作,而机械开关动作过频则易损坏,可靠性差。因此,系统的动态问题通常是通过过分保守的设计,留有较大的稳定储备来加以解决,以应付一些预想的系统紧急状态。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开关,情况就将大不一样。小功率的电子开关使信号处理、计算机技术发生翻天覆地的变化,大功率电子开关也必将在电力系统中引起革命。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晶闸管已不再困难,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 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。经过长期的讨论和经多方协商,1997 年 IEEE 的 FACTS 工作组中的“术语和定义专题组”公布了 FACTS 及 FACTS 装置的定义和规范术语。其中 FACTS 的定义是:装有电力电子型或其他静止型控制器以加强可控性和增加功率传输能力的交流输电系统。FACTS 装置是指 FACTS 家族中具体的成员,其定义是:用于提供一个或多个控制交流输电系统参数的电力电子系统或其他静止设备。

从 FACTS 装置与系统的连接方式的不同,FACTS 装置可以分为并联型、串联型和混合型三大类:

(1) 并联型。包括静止无功补偿器 (SVC)、静止同步补偿器 (STATCOM)、晶闸管控制的制动电阻 (TCBR)、超导储能系统 (SMES)、电池储能系统 (BESS) 等。

(2) 串联型。包括晶闸管控制的串联电容器 (TCSC)、晶闸管投切的串联电容器 (TSSC)、晶闸管控制的串联电抗器 (TCSR)、晶闸管投切的串联电抗器 (TSSR)、静止同步串联补偿器 (SSSC)、背靠背换流站等。

(3) 混合型。包括晶闸管控制的移相变压器 (TCPST)、相间功率控制器 (IPC)、统一潮流控制器 (UPFC) 等。

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 500 台以上,我国运行于 500kV 电网的 SVC 也有 5 台,而应用于工业企业的 SVC 装置更多。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 工业装置目前正在研制中。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) 已在国外获得大量应用,我国自行研制的 TCSC 工业装置已经在现场投运,功能最为全面的 FACTS 设备——统一潮流控制器 (Unified Power Flow Controller, UPFC) 也已经在美国电力系统投入运行。除此以外,FACTS 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。

第二节 应用 FACTS 技术解决我国电网面临的问题

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:“全国联网,西电东送,南北互供,厂网分开”。随着各省主干电网网架、大区主干网架和受端网架不断地加强及完善以及三峡电站各批机组逐步并网发电,中国的各区域性电网将实现联网,多大区域互联电力系统从经济上带来了明显的好处,但它也面临着以下问题:

(1) 我国一次能源地理分布不均,电源建设所需的煤和水力资源主要在西部,为满足东部发达地区不断增长的电力需求,需要通过长距离输电线将大量的电能送到东部的负荷中心如北京、上海与广东地区。据统计,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, 需要建设多条远距离输电线, 由于我国西部地形复杂, 到处是崇山峻岭, 建设输电线造价高昂, 同时考虑到申请输电走廊将受到越来越严格的环境保护限制, 因此建设过多的远距离输电线是不经济也不可行的。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: ①静稳极限; ②暂稳极限; ③电压稳定性; ④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。因此如何提高长距离输电线输送容量至其热稳定极限, 是大容量远距离输送电能需要解决的一大问题。

(2) 对于一个断面有多条输电线的复杂输电系统而言(西电东送必然是多条输电线), 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, 而其他线路则轻载, 不仅使已有设备不能充分利用还常常引发稳定问题。
- 2) 形成环流, 整个系统的有功功率损耗增加, 系统运行很不经济。
- 3) 系统无功功率分配不当, 电压质量变差。
- 4) 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家功率的商业问题(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, 但要频繁动作, 能平滑调节潮流分布。

(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、轧钢机不断采用, 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等, 使电压质量变差, 影响了原先设备的工作。同时新的电压敏感型设备大量出现, 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, 需要采用强有力的措施提高其安全稳定运行水平。

FACTS 设备投入运行在互联电力系统中增加了强有力的控制手段。它可以用来提高系统的静态和暂态稳定极限, 提高其电压稳定性, 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 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、SSSC 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。无论 SVC、STATCOM、TCSC 或 SSSC 均可用来改进系统的静态和暂态稳定性。统一潮流控制器(UPFC)能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“全国联网，西电东送，南北互供，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 或同步静止补偿器（Static Synchronous Series Compensator，简称 SSSC），可以大大提高输电线的输送容量，可以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十个主要发展方向中发展 FACTS 技术成为重中之重。

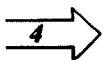
另一方面，我国许多重负荷中心如北京、上海和广东地区，随着老的调相机退出运行，动态无功支撑能力远远不足，存在严重的安全稳定隐患。采用 FACTS 技术，在这些负荷中心安装快速的动态无功补偿装置如 SVC 或 STATCOM 装置将能大大提高负荷中心的动态电压稳定性，具有非常现实的意义。可以预言，伴随着电力电子技术的进步，FACTS 装置将变得更先进，FACTS 技术将大量应用于我国电力系统，以较小的投入解决我国电网所面临的问题。本世纪完成全国联网的中国电力系统将成为一个可以完全实时快速控制的名副其实的柔性电力系统，这种系统将以最少的成本为用户提供品质优良、稳定安全可靠的电力。

第三节 STATCOM 的研究历史与现状

利用电力电子变流器进行无功控制的可能性很早就已经为人们所认识了，但限于当时电力电子器件的耐压和功率水平，无法制造出输电系统中具有实用价值的装置。直到近年来，尤其是高压大功率的门极可关断晶闸管 GTO 的出现，才极大地推动了 STATCOM 的开发和应用。STATCOM 是并联型 FACTS 设备，它同基于可控电抗器和投切电容器的传统静止无功补偿器 SVC 相比，性能上具有极大的优越性，越来越得到广泛的重视，必将取代 SVC 成为新一代的无功电压控制设备。

目前，世界上已有多台投入运行的 STATCOM。其中，1986 年美国的 EPRI 与西屋公司等研制的 $\pm 1\text{Mvar}$ STATCOM 在纽约州的 Spring Valley 投入示范运行；1991 年日本的三菱公司与关西电力公司共同研制的 $\pm 80\text{Mvar}$ STATCOM 在 Inuyama 开关站投入 154kV 系统运行；1992 年东京电力分别与东芝公司和日立公司开发的两台 $\pm 50\text{Mvar}$ STATCOM 在新信浓电站投入使用；1995 年美国的电力科学院 EPRI、田纳西流域管理局 TVA 与西屋公司投运了一台 $\pm 100\text{Mvar}$ STATCOM；1997 由德国西门子公司开发研制的 $\pm 8\text{Mvar}$ STATCOM 在丹麦的 Reisby Hede 风场投入运行；目前为止世界上最大容量的 STATCOM 是美国 AEP 统一潮流控制器项目中的并联部分—— $\pm 160\text{Mvar}$ STATCOM，已于 1997 年开始运行。

到目前为止，国际上只有美、日、德等少数几个发达国家掌握了 STATCOM 的应用开发技术。为了跟踪国际 FACTS 发展的前沿技术，同时也为了解决河南电网现有的问题，



在原国家电力部的支持下，原河南省电力局于 1994 年决定投资开发 $\pm 20\text{Mvar}$ STATCOM，该项目被列为原电力部的重大科技攻关项目。在项目合作方清华大学的积极配合下，作为中间工业样机的一台 $\pm 300\text{kvar}$ STATCOM 于 1996 年 11 月通过了电力部组织的专家评审，1997 年在河南郑州的孟砦变电站进行了现场测试和试运行。 $\pm 20\text{Mvar}$ STATCOM 于 1999 年 3 月在河南洛阳 220kV 朝阳变电站并网成功，它已成为中国 FACTS 研究应用领域的一个里程碑，标志着我国成为国际上第四个拥有大容量 STATCOM 制造技术的国家，标志着中国 FACTS 技术发展进入了一个新的阶段。

第二章

STATCOM 装置的基本原理

第一节 STATCOM 的工作原理

如图 2-1 为 STATCOM 的原理示意图, 其中直流侧为储能电容, 为 STATCOM 提供直流电压支撑, 逆变器通常由多个逆变桥串联或并联而成, 其主要功能是将直流电压变换为交流电压, 而交流电压的大小、频率和相位可以通过控制逆变器中可关断器件 (如 GTO、IGCT、IEGT 等) 的驱动脉冲进行控制。连接变压器将逆变器输出的电压变换到系统电压,

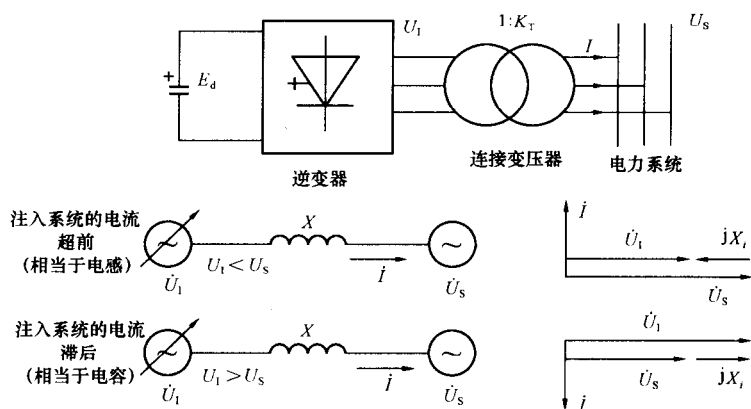


图 2-1 STATCOM 装置调节无功的原理示意图

从而使 STATCOM 装置可以并联到电力系统中。连接变压器本身的漏抗可以用于限制电流, 防止逆变器故障或系统故障时产生过大的电流。整个 STATCOM 装置相当于一个电压大小可以控制的电压源。设 STATCOM 装置产生的归算到系统侧的空载相电压为 $\dot{U}_1$, 系统相电压为 $\dot{U}_s$, 连接电抗为 X , 则 STATCOM 装置输出的电流为

$$\dot{i} = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_s}{jX} \quad (2-1)$$

因此, STATCOM 装置输出的单相视在功率为

$$S = \dot{U}_s \dot{i}^* = \dot{U}_s \frac{\dot{U}_1^* - \dot{U}_s^*}{-jX} \quad (2-2)$$

通常情况下, STATCOM 装置只吸收很小的有功功率或不吸收有功功率, 因此其产生

的电压 $\dot{U}_1$ 与系统电压 $\dot{U}_s$ 相位相同，因此 STATCOM 装置输出的单相无功功率为

$$Q = \text{Im}(S) = \text{Im}\left(\dot{U}_s \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_s}{-jX}\right) = \frac{U_1 - U_s}{X} U_s \quad (2-3)$$

当控制 STATCOM 装置产生的电压小于系统电压即 $U_1 < U_s$ 时，STATCOM 装置向系统输出的无功功率 $Q < 0$ ，此时 STATCOM 装置相当于电感；当控制 STATCOM 装置产生的电压大于系统电压即 $U_1 > U_s$ 时，STATCOM 装置向系统输出的无功功率 $Q > 0$ ，此时 STATCOM 装置相当于电容。由于 STATCOM 装置产生的电压 U_1 的大小可以连续快速地控制，因此 STATCOM 吸收的无功功率可以连续地由正到负进行快速调节。

第二节 STATCOM 与 SVC 的比较

SVC 是目前在电力系统中应用较普遍的无功补偿装置，而 STATCOM 是最近发展的新型无功补偿装置。它们之间到底有何区别，孰优孰劣是大家关心的问题。本节将对这两种装置进行较详细的比较。

一、无功功率特性的比较

图 2-2 中，以补偿装置向系统输出的无功功率为负（即电感状态）时对应的电流为正，并有 $I_{C\max} > 0$ ， $I_{L\max} > 0$ 。当系统在 SVC 或 STATCOM 装设点对无功功率的需用在补偿装置的额定容量之内时，SVC 与 STATCOM 在功能上无优劣之分。SVC 与 STATCOM 的差别主要体现在系统在无功补偿装置装设点对无功功率的需用超出其额定容量的情况。在此情况下，SVC 退化为电容器或电抗器，SVC 装置输出的无功功率与系统电压的平方成正比，也即其输出的无功电流与系统电压成正比，因此在电力系统电压降低时，SVC 装置输出的无功功率会以与系统

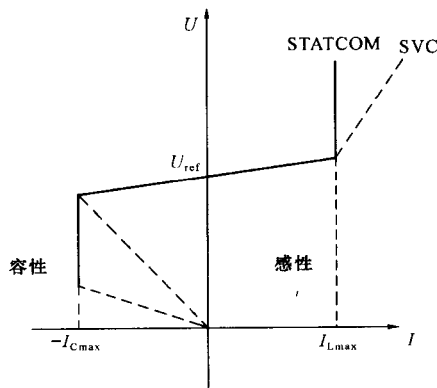


图 2-2 SVC 装置与 STATCOM 装置的
无功电流电压特性对比

电压平方下降的比例而下降；而 STATCOM 退化为恒定电流源，STATCOM 装置输出的无功功率与系统电压成比例，也即其输出的无功电流与系统电压无关，因此在电力系统电压降低时，STATCOM 装置输出的无功功率会以与系统电压下降的比例而下降。所以在系统电压下降时，STATCOM 装置输出无功功率的能力比 SVC 强，而在系统电压升高时，STATCOM 装置吸收无功功率的能力比 SVC 弱。电力系统中，因为系统出现故障后的动态过程中主要出现的问题是电压降低，因此 STATCOM 装置的无功功率特性比同容量的 SVC 装置更好。图 2-2 示出了 SVC 装置与 STATCOM 装置的输出的无功电流特性，图中 U_{ref} 为补偿装置的控制参考电压。由图可见，当系统电压降低到一定值或升高到一定值后，SVC

特性变成纯电抗特性，其输出的无功电流与系统电压成正比，而 STATCOM 装置受关断器件容量限制，其特性变成恒电流特性，即 STATCOM 装置产生最大的容性无功电流或感性无功电流。大量的仿真分析表明，在电力系统故障过程中，电压降低导致同容量的 STATCOM 装置的无功功率补偿能力相当于约 1.2~1.3 倍容量的 SVC 装置的无功功率补偿能力。

二、对提高输电系统稳定性的比较

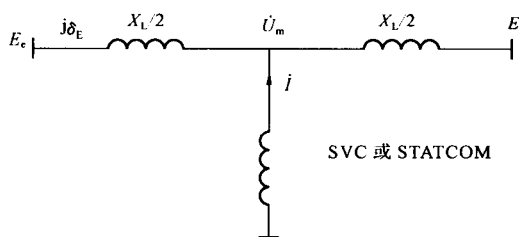


图 2-3 在线路中间接 SVC 或 STATCOM 装置的系统

下面以图 2-3 所示系统为例进行分析。

图 2-3 所示为输电线将两个系统连接起来，两系统相电压维持不变均为 E ，送端系统角度超前 δ_E ，分别在线路中间接 SVC 或 STATCOM 装置。在分析线路的 $P - \delta_E$ 曲线中，忽略 SVC、STATCOM 及线路的有功损耗。

如图 2-3 所示，线路输送的单相有功功率为

$$P = \frac{2U_m E}{X_L} \sin \frac{\delta_E}{2} \quad (2-4)$$

其中， $\dot{U}_m = U_m \angle \frac{\delta_E}{2}$ 。如果 SVC 或 STATCOM 容量足够，能维护线路中点相电压为 E ，则由式 (2-4) 知线路能输送的单相有功功率为

$$P = \frac{2E^2}{X_L} \sin \frac{\delta_E}{2} \quad (2-5)$$

下面先分析线路中间装设 SVC 的情形，在 SVC 发出无功功率达到其极限后，SVC 退化为电容器 X_C ，则由图 2-3 可得

$$\frac{\dot{U}_m - E \angle \delta_E}{j \frac{X_L}{2}} - \frac{\dot{U}_m}{j X_C} + \frac{\dot{U}_m - E}{j \frac{X_L}{2}} = 0 \quad (2-6)$$

根据式 (2-4) 和式 (2-6) 可得在此情况下线路输送单相有功功率为

$$P = \frac{4X_C E^2}{(4X_C - X_L)X_L} \sin \delta_E \quad (2-7)$$

其中， $4X_C > X_L$ ，由式 (2-5)、式 (2-7) 即可绘出中点接入 SVC 后的线路 $P - \delta_E$ 曲线，如图 2-4 所示实线部分。

下面分析线路中间装设 STATCOM 的情形，在 STATCOM 发出无功功率达到其电流极限后，可以用电流源代替，则有

$$\frac{\dot{U}_m - E \angle \delta_E}{j \frac{X_L}{2}} - \dot{I} + \frac{\dot{U}_m - E}{j \frac{X_L}{2}} = 0 \quad (2-8)$$

整理可得

$$2\dot{U}_m - j\frac{1}{2}X_L\dot{I} = 2E\cos\frac{\delta_E}{2} \angle \frac{\delta_E}{2} \quad (2-9)$$

如图 2-1 所示, 由于 $\dot{I}$ 为 STATCOM 输出的电流, 当 STATCOM 相当于电容向系统发无功时, $\dot{I}$ 滞后 $\dot{U}_m 90^\circ$, 因此由式 (2-9) 可得

$$\dot{U}_m = \left(E\cos\frac{\delta_E}{2} + \frac{X_L}{4}I \right) \angle \frac{\delta_E}{2} \quad (2-10)$$

一旦 STATCOM 电流达到 I_{Cmax} 后, 即使 STATCOM 接入点处系统电压降低, STATCOM 也不能再增大其无功电流了, 只能保持最大电流不变, 否则 STATCOM 过流保护会动作而切除 STATCOM。因而此时可把 STATCOM 看作为一个恒电流源, 无功电流保持 I_{Cmax} 不变, 将式 (2-10) 代入式 (2-4), 线路输送的单相有功功率为

$$P = \frac{2E}{X_L} \left(E\cos\frac{\delta_E}{2} + \frac{X_L}{4}I_{Cmax} \right) \sin\frac{\delta_E}{2} = \frac{E^2}{X_L} \sin\delta_E + \frac{EI_{Cmax}}{2} \sin\frac{\delta_E}{2} \quad (2-11)$$

由此可以绘出线路中间装设 STATCOM 时的线路 $P - \delta_E$ 曲线, 如图 2-5 所示实线部分。

由图 2-4 和图 2-5 中的 a 点和 c 点可知, 输电线中间装设 SVC 或 STATCOM 后, 均能提高其输电系统的静态稳定性。补偿容量越大, a 点比 c 点越高, 提高输电系统静态稳定性的作用就越大。若 SVC 和 STATCOM 容量相同且调节特性相同, 则其对提高输电系统的静态稳定性作用也相同, 换言之, 线路的最大传输功率相同。

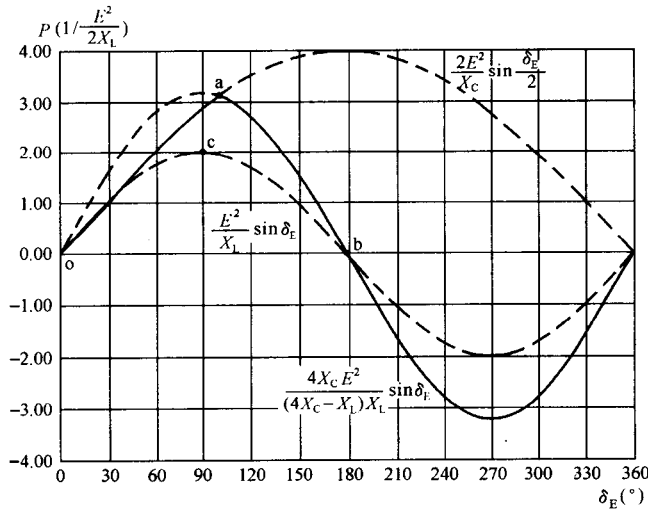


图 2-4 线路中间装设 SVC 后的线路 $P - \delta_E$ 曲线

比较图 2-4 和图 2-5 可知, 假设 SVC 和 STATCOM 容量相同, 当 δ_E 小于或等于 δ_a 时, 线路的传输功率曲线相同, 均满足式 (2-5)。但是, 若 δ_E 大于 δ_a , 则装设 SVC 和装设 STATCOM 功率曲线明显地不一样了。这是因为 δ_E 大于 δ_a 后, 系统电压降低导致 SVC 补偿电流也降低, 而对 STATCOM 来说可以保持补偿电流不变, 因此 STATCOM 的 $P -$

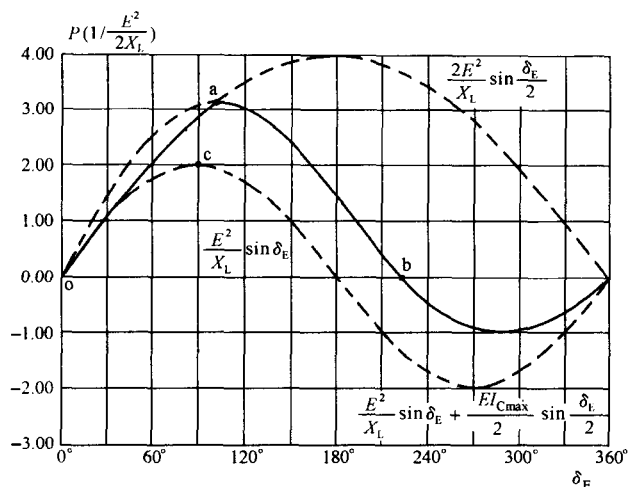


图 2-5 线路中间装设 STATCOM 后的线路 $P - \delta_E$ 曲线

δ_E 曲线明显地高于 SVC 的 $P - \delta_E$ 曲线。更为特别的是, STATCOM 可使 $P - \delta_E$ 曲线的功率在 δ_E 角大于 180° 范围内仍为正, 这是 SVC 无论如何也无法做到的。因此, 如果线路发生故障, 用 STATCOM 能更有效地增加减速面积, 因而比 SVC 在提高暂稳极限方面更有利。对于单机无穷大系统, 若 STATCOM 能与快控汽门相配合, 则可大大提高系统的暂态稳定极限。因为快控汽门可以充分利用 $\delta_E > 180^\circ$ 时电功率为正的的优势, 大大增加减速面积。

三、其他方面的比较

SVC 装置与 STATCOM 装置除上面介绍的差别之外, 还存在一些差别, 下面对此进行简单的介绍。

(1) SVC 装置是电抗型的, 接入电力系统之后有可能改变原电力系统的阻抗特性, 因此如果计划在电力系统中某些节点需要安装 SVC 装置, 除研究 SVC 装置投入后对提高系统安全稳定性的作用外, 还必须详细研究系统在 SVC 装置接入前后阻抗特性的变化, 防止 SVC 装置接入后因改变系统阻抗特性导致出现谐振, 在 SVC 的工程实践过程中曾经出现安装 SVC 装置后系统出现谐振的例子。特别是电力系统安装多台 SVC 装置后更容易出现谐振问题, 因此必须予以考虑。而 STATCOM 装置为电压源逆变装置, 接入系统后不会改变系统的阻抗特性, 因此不存在谐振问题。

(2) SVC 装置中 TCR 部分由于晶闸管的非全开通必然产生谐波, 因此 SVC 装置必须安装额外的滤波器, 而 STATCOM 装置通过合理设计可使逆变器输出的电压谐波含量较低, 一般情况不需要安装额外的滤波器。

(3) SVC 装置采用电容器、电抗器作为无功补偿器件, 因此需要较大容量的交流电容器和电抗器, 因而整个 SVC 装置的占地面积比较大; 而 STATCOM 装置则无需大容量的交流电容器和电抗器, 因此占地面积较小。根据国外的工程经验, 同容量的 STATCOM 装置占地面积仅为 SVC 装置的三分之一, 如 ABB 公司将 STATCOM 装置称为 SVC - Light 正是基于这样的考虑。由于 STATCOM 装置的体积小, 因此甚至可以将 STATCOM 装置做成移动式。

(4) 由于 SVC 装置 TCR 部分采用的为不可关断晶闸管, 因此一旦晶闸管导通, 必须等电流过零才能自然关断, 因此 SVC 控制系统发出指令到晶闸管响应最大的延时为 10ms (半周期), 加上 TCR 本身的过渡过程, 整个 SVC 装置的响应时间约为 50 ~ 60ms。而 STATCOM 装置为可控电流源, 其延时主要是装置的固有时间常数造成, 因此响应时间为 20 ~ 30ms 左右, 最快的基于 PWM 调制的 STATCOM 装置响应速度可以在 10ms 左右。因此

总的来说,虽然 SVC 装置和 STATCOM 装置响应速度都很快,但 STATCOM 装置响应速度更快些。

(5) SVC 装置采用一般的晶闸管而 STATCOM 装置采用可关断器件,由于可关断器件的价格比较贵,因此到目前为止同容量 STATCOM 装置的成本比 SVC 装置的成本高。这是目前 SVC 装置普遍应用而 STATCOM 装置只在某些要求较高的场合应用的一个重要原因。

第三节 STATCOM 的时域数学模型

一、单相桥电路的结构、工作原理及时域数学模型

图 2-6 为单相桥电路,直流侧为储能电容,电压为 E_d , G1、G2、G3、G4 为晶闸管而 V1、V2、V3、V4 为与相应可关断器件反并联的二极管,单相桥电路的输出电压为 $u_{LR}(t)$ 。通过控制四个可关断器件的开通与关断,可以方便地控制单相桥电路的输出电压。由于大功率可关断器件的工作频率不能太高(最高为几千赫兹),同时,开关频率高也会导致器件的损耗增大,因此用于 STATCOM 的单相桥电路中的可关断器件的工作频率都较低(小于几百赫兹)。图 2-7 给出了单相桥电路各可关断器件的触发脉冲,其中触发脉冲为 1 表示该可关断器件导通,而触发脉冲为 0 表示该可关断器件关断。如果直流侧电压不变,则单相桥电路的输出电压波形如图 2-7 所示。

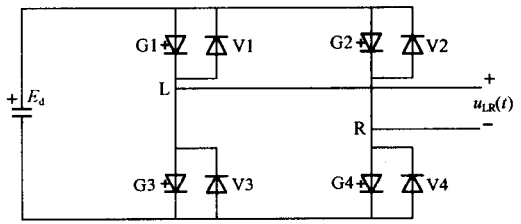


图 2-6 单相桥电路

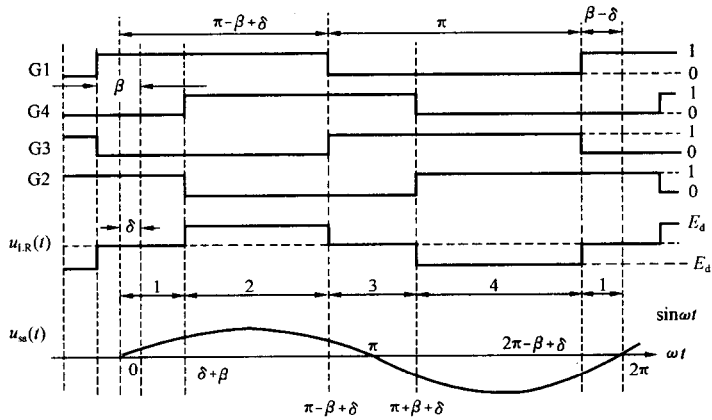


图 2-7 单相桥电路各可关断器件的触发脉冲及输出电压

由于单相桥电路是构成 STATCOM 装置的基础,而且三相桥工作原理也与它类似,本节将从单相桥电路的工作原理着手,对 STATCOM 装置进行分析。

图 2-8 为单相桥电路接入系统的等效电路图,图中 C 为直流侧电容, L 为连接变压