

研究生柔性输电技术课程教学模式改革与探究*

罗振鹏 杨宝峰 贾海媛

(内蒙古工业大学电力学院 内蒙古呼和浩特 010051)

摘要: 柔性输电技术核心是电力电子技术在电力系统中的应用,通过大功率电力电子器件利用计算机自动控制技术对电力系统参数实现快速控制,能够大幅度提高电力系统动态稳定性,增加输电线路的容量。随着现代电力电子技术水平发展和现代电网控制技术能力提高,成为实现远距离、高电压、大容量的输电需求技术的有力手段,特别随着新能源发电容量占比的增加,柔性输电技术更占有举足轻重的地位,电力电子技术能够实现对电力系统整体快速调控和安全稳定运行。本课程涉及常规直流输电技术、柔性交流输电技术、柔性直流输电技术,每一种技术包含了很多不同功能的典型装置,内容多而杂,教师可在课程中采用启发式探究的理论教学方式,典型教学内容搭建计算机仿真模型,能够实现课程理论分析与仿真验证,动模实验能够保证理论应用于实践能力提升,前沿文献查阅与探讨能够更深入把握课程中前沿动态。通过以上四步骤教学模式,可提升研究生对本门课程知识点理解和掌握,为后续研究课题打下坚实的基础。

关键词: FACTS 柔性直流输电 教学改革 工程能力

中图分类号: TM614 **文献标识码:** A

DOI: 10.12218/j.issn.2095-4743.2022.35.113

柔性输电技术需要对电力电子技术各种电能变换有深入理解,对电能变换控制有很好的把握,同时需要对电力系统潮流及电网动态和稳态调控技术手段需要深层次掌握,最终需要把三部分知识能够很好地融会贯通,才能理解《柔性输电技术》本门课程内容,电力电子技术对电网的调控目标及如何通过电力电子技术手段自动控制实现电网快速的潮流控制。一般存在这样矛盾:学电力系统的学生大部分对电力电子技术和自动控制技术欠缺,学电力电子技术的学生又对电力系统理解比较欠缺。如何能够把两部分知识深入把握,实现本课程教学是目前本门课程研究生教学中难点,特别是柔性交流输电技术中针对电网不同指标和参数控制,有很多种类电力电子变换装置,如何能够很好理解和掌握本部分知识也是关键^[1-3]。在多年研究生课程教学中,逐渐摸索出一套采用四步层层递进教学模式:首先采用提出问题,启发式思考和探索,提升理论知识;其次采用仿真技术,通过自动控制技术直观地图形化理解不同装置工作特性,控制模式,参数设置等多层次和多方位把握^[4];再次利用电能传输与控制的自治区重点实验室,实验风力发电、光伏发电、储能电池、柴油发电机、大电网,线路模拟阻抗一体化实验,深入掌握新能源并网发电,储能调节技术,电能传输一体化调控策略,更进一步加深理解和掌握本课程;最后每位研究生查阅一个本课程相关前沿课题,通过查阅相关文献书写报告,讲解并一起讨论,达到短时间内共享成果,每位同学收获最大化。

一、问题引入,启发式教学探究模式

本课程按照设计内容分为器件,常规直流输电,柔性交流输电,柔性直流输电,柔性配电系统5大版块,每个版块内分若干个模块,每个模块设计若干问题,通过工程案例引入发现问题,分析问题关键所在,涉及问题在本课程中是如何解决,最后得到理论提升。

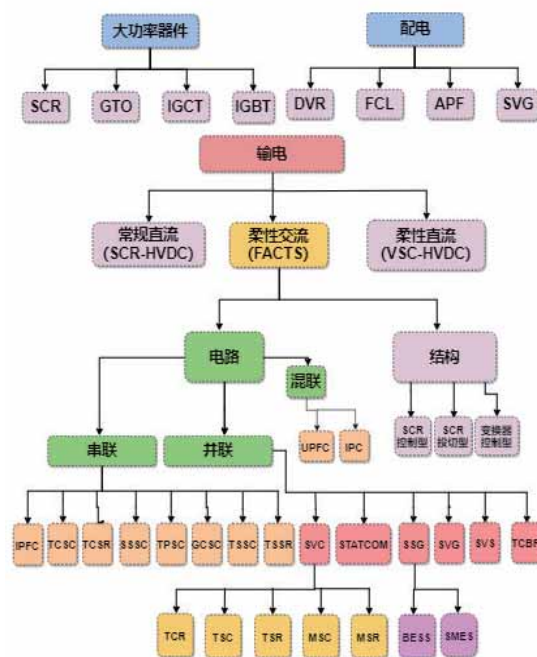


图1 课程五大部分教学内容

*基金项目: 内蒙古工业大学研究生教育教学改革项目“《柔性输电技术》课程建设探索”(YJG2021003)。

从图1可知：本课程涉及电力电子技术在电网中应用拓扑结构较多，为了方便掌握归类成5大版块教学内容，从拓扑结构，工作原理，电网调控，控制模式，工程案例几个方面入手，采用引入问题，探究解决方案，对比相关电网调控拓扑，突出各自特征。

1. 提出问题深入思考，解决问题，提升高度

如在引入输电理论中，首先提出如下若干问题：为什么采用特高压直流输电或特高压交流输电技术？应用这两种输电技术解决什么技术难题？新能源发电为什么会出现弃风弃光现象？为什么全国连接成一张大电网？其目的和意义是什么？而且不同区域联网采用直流背靠背的结构而不采用交流并联入网原因是什么？我国能源战略是西电东送，疆电外送，全国联网的意义是什么？如何才能实现我国能源优化资源互补，提高清洁能源的占比？这些问题首先让学生思考，查阅资料，然后分小组讨论，最后汇总给出合理的结论。



图2 国家能源战略

从图2可知：我国西部能源产地，东部能源消耗地，将西部电能输送到东部必须实现远距离，大功率输电，这样必须采用高压输电技术。解决远距离高电压大功率输电技术两种技术方案：高压直流输电和高压交流输电。只有将全国电网连成一张网，才能实现资源优化配置，夏季和秋季丰水期让水力发电多发，减少火力发电，减小环境污染，达到节能减排，冬季和春季枯水期，让新能源和火力多发。由于新能源间歇性特征，维持一定比例火力发电，达到资源优化配置，推进节能减排目标实现，促进不同地区能源合理利用，达到区域协调发展。两个交流电网区域联网采用直流背靠背，而不采用交流并网，目的是提高区域电网稳定性，达到联网后整体电网可靠性提高^[5-6]。

通过这种启发式教学引导，能够逐级式引导到课程核心知识点，提升学生理论水平和课程兴趣，达到学生学有所获的目的，本课程采用这种教学方式获得了一致教学好评。

2. 对比式教学，突出重难点，深入理解各自特征和工程应用场景

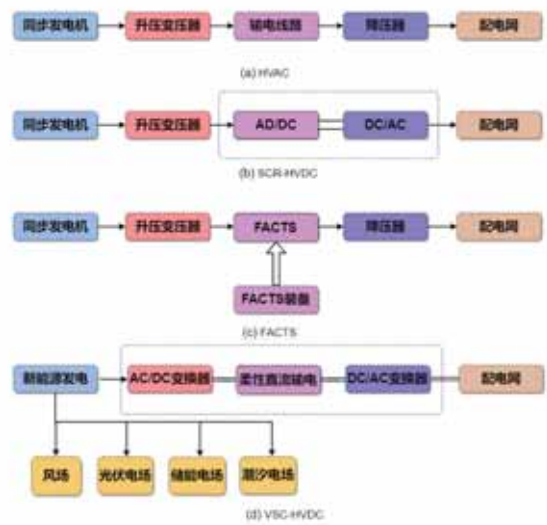


图3 大容量高电压输电四种方案

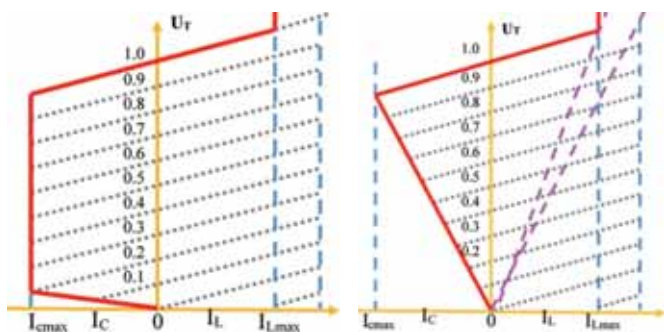
为了讲明白大容量远距离高压输电的4种方案，设计了图3不同方案对比，从图中对比说明每种输电核心所在，每种方案区别于其他几种的特征，工程应用场景，每种内拓扑结构，在输电技术中优缺点，这样能够很好地理解柔性输电技术涉及4种输电技术。

FACTS技术是一个庞大的集合，涉及很多电力电子装置，每种都能对电力系统进行相应的电网参数调控，而有些在调控上效果相同，但是特性不同，工程中性价比相差较大，将容易混淆的列表，如表一，几种逐一进行对比工作特性，拓扑结构，工作原理，优缺点，达到对本部分知识的消化吸收。

表1 重点对比电能调控装置

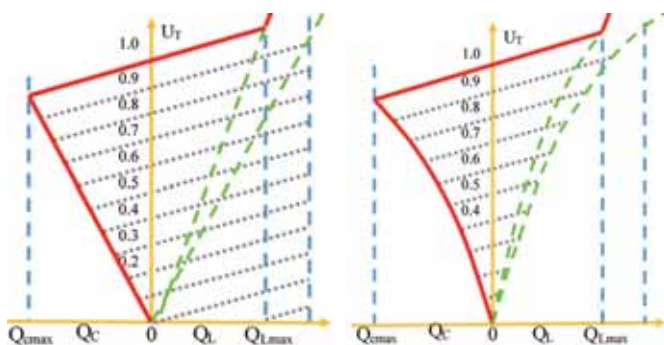
SVC	STATCOM
IPFC	UPFC
MESS	SESS
TCSC、SSSC	GCSC、TSSC
BESS	SMES
HVDC	HVAC
SCR-HVDC	VSC-HVDC

如表1中SVC和STATCOM，两者都能够进行动态无功补偿，但是两者在补偿无功时外特性和无功电压特性不同，通过图4 U-I和U-Q工作特性对比，逐一理解两者工作区间，无功动态补偿能力，工程上性价比，这样能够很好地理解在电力系统中两者如何在电力系统中根据实际情况进行配置，培养理论指导实践的能力。



图a STATCOM的U-I特性

图b SVC的U-I特性



图c STATCOM的U-Q补偿特性

图d SVC的U-Q补偿特性

图4 SVC与STATCOM无功补偿特性对比工作特性图

3. 每一种FACTS技术都从共性出发, 把握个性特征

对于FACTS技术, 每一种具体装置分别从拓扑结构、工作原理、工作特性、控制模式、工程应用, 案例分析多个方面理解装置共性的问题, 掌握装置独有的特性。突出理论分析, 把握对电网调控的关键参数与控制动稳态特性, 深入理解其应用环境及局限性。如STATCOM和SVC无功补偿不同; UPFC, BESS, SMES, SVG功率控制型装置对电网潮流控制的不同; 高压串联补偿和高压并联补偿对电网控制不同; 从电网送端和受端输送有功和无功传输原理出发, 对潮流达到快速控制需求深入理解功率控制型装置的控制模式。

二、计算机仿真技术在本课程仿真中应用

第一步已经打好理论基础, 通过仿真模型搭建, 在理论上更深入进行仿真分析各装置工作机理, 控制特性, 逻辑关系, 时序触发, 外特性。进一步从仿真角度直观地分析, 深入理解开环下工作机理, 闭环下自动控制, 实现独特的各装置功能。由于本课程涉及各种FACTS装置和各种输电技术比较多, 每个都是一个比较庞大的系统, 学生在上课期间短时间内很难搭建完成; 有的甚至是研究生的研究课题, 在上课期间很难深入理解; 而且涉及很多交叉知识, 学生难以贯通。针对这一情况, 课程组通过多年课下模型搭建和调试, 已经搭建出了大部分的本课程仿真模型, 进行了适当的

封装, 学生只需改变局部参数就能进行相关仿真运行, 能够分析工作特性、波形特征、控制模式, 能够更深入地把握本课程的内容。

针对不同研究生应用仿真软件不同, 课程组在matlab, pscad, RTDS仿真工具下, 搭建了每种仿真软件下仿真模型, 通过更改相关工作特性参数来深入领会工作原理, 理解在输配电技术中良好的电能控制特性, 通过仿真波形分析, 直观深入地分析相关原理, 进一步提高理论水平, 为后续课题研究打下坚实的基础。

通过动模实验, 理论联系实际, 能力达到升华, 进一步提升认识水平

学院拥有2000多万的一整套自治区电能传输与控制动模实验室, 在该实验室可以进行风力发电、光伏发电、储能系统、柴油机发电、大电网系统、线路阻抗模拟系统, 可以进行现代电网, 新能源并网传输电能输电系统的相关各种潮流控制实验。

图5为电力系统新能源发电动模实验主接线图, 从图上可以看到, 可以进行若干种类灵活的电源组合来实现电能的传输与控制, 特别是各种新能源与储能动模实验, 对课程中涉及理论知识进行相关的实验验证, 提升理论与实践的能力, 促进分析问题与解决问题的工程实践能力。

图6为电力系统输电动模实验主接线图, 可以模拟多组无穷大电源和汽轮发电机及风力发电机的并网及电能的传输与控制, 灵活模拟500KV和220KV线路的电能传输与控制, 可以进行多电源并网的交流输电系统实验, 达到学生理论联系实际, 理论指导实际, 通过实验深入体会课程中涉及相关知识, 提升能力。

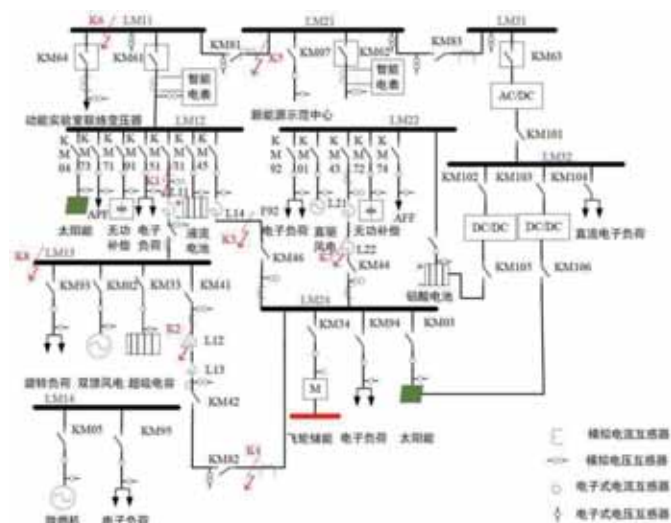


图5 电力系统新能源发电动模实验图

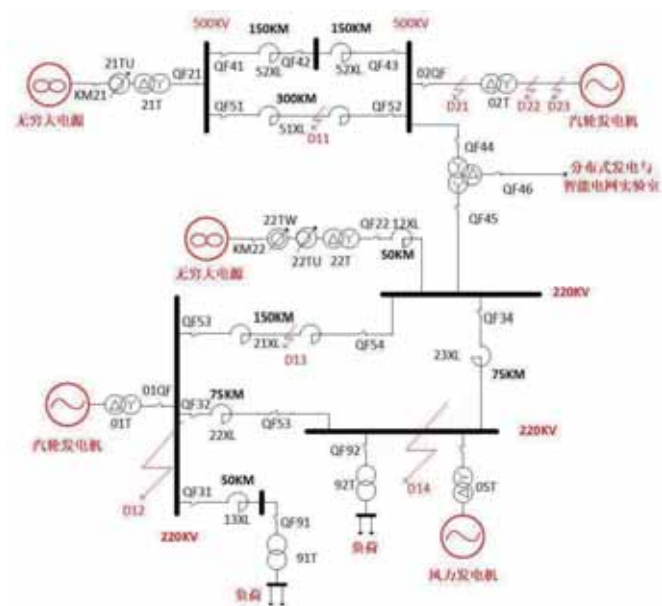


图6 电力系统输电动模实验图

三、文献查阅，把握前沿动态，夯实课题应用

针对每位研究生研究课题，给每位研究生设定前沿课题，通过几周查阅文献，做成PPT，在规定时间内进行讲解，师生间互相质疑与问答。通过翻转课堂形式，学生间互相交换想法，使每位同学既研究自己相关课题，又能学到多方面知识，将PPT和阅读文献共享，学生可以下载感兴趣的知识，短时间内消化吸收，达到每个人集中精力查阅自己相关部分，又能通过共享获得他人的成果，达到很好的教学效果。

表2就是列举部分相关课题，每年都会精选若干个前沿题目，从开始上课布置给学生，在课程进度到每一个相关知识点时，进行反转课堂教学，学生真正参与到本课程教学活动中，得到很好的教学效果。

表2 前沿课题布置题目

序号	查阅文献的前沿题目
1	静止同步无功补偿器（STATCOM）工作原理、典型拓扑结构、控制方法及其典型应用场合；
2	静止无功补偿器（SVC）种类及工作原理、特性、控制及其典型无功组合应用场合；
3	SVC与STATCOM在无功补偿方面优缺点对比及使用场合及工程中典型应用；
4	电池储能系统（BESS）原理、模型及其控制和应用场合；
5	超导储能系统（BESS）原理、模型及其控制和应用场合；
6	电力系统串联补偿和并联补偿对电力系统输电稳定性对比及各自工作原理；
7	TCSC原理、模型及其控制特性和在输电工程中应用；
8	SSSC原理、模型及其控制和在输电工程中应用；
9	UPFC原理、模型及其对电力系统稳定性和潮流的调控；
10	DVR原理、模型及其控制和应用场合；
11	MMC拓扑结构、工作原理、调制方式、数学模型及在输电工程中应用；
12	多电源点供电，多落点受点的多端直流输电技术现状、关键技术、工作原理及发展趋势；

结语

为了能够把本课程内容从书本理论转化到研究生可掌握知识，最后升华到研究生分析问题、解决问题能力，采用了启发式探究教学，引导学生进行思考，提升分析问题和解决问题能力；通过采用搭建模型仿真与动模实验，引导学生由理论到实践，将书本知识转化成为自己能力；采用对比式教学，加强知识点的逻辑体系，使知识点内沿与外涵进行很好掌握。打乱教材章节安排，将课程知识点分成大功率器件理论，现代电网新型发电技术（新能源发电与常规发电），大功率高电压大容量输电技术（高压交流输电，高压直流输电，柔性交流输电技术，柔性直流输电技术）和柔性配网技术版块，每一版块包含电力电子技术在电力系统中应用的拓扑与装置，从多角度、多方面提升学生知识与能力，得到良好的教学效果。

参考文献

- [1]王华昕,李东东.电力电子在电力系统中应用课程教改与实践[J].中国电力教育,2014,37(11):75-76.
- [2]金亮.电力电子技术在电力系统中的应用[J].城市建设理论研究,2015,5(5):2010-2011.
- [3]杨宝峰,罗振鹏,徐丹丹.专业学位研究生实践能力的培养路径探究[J].新教育时代,2022,85(10):85-88.
- [4]王辉,李宇豪,杨振.仿真技术在柔性交流输电系统教学中的应用[J].山西电子技术,2016,33(3):33-35.
- [5]汤广福,贺之渊,庞辉.柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J].电力系统自动化,2013,37(15):3-14.
- [6]蔡晖,彭竹弈,祁万春等.背靠背柔性直流输电技术在中心城区电网中的应用研究[J].电力电容器与无功补偿,2021,42(2):79-84.