

Economic Market Design and Planning
for Electric Power Systems

JAMES MOMOH • LAMINE MILI

电力系统经济性 市场设计与规划

(美) 詹姆斯·莫莫 编

拉明·米利

董 军 薛贵元 译



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



WILEY

**Economic Market Design and Planning
for Electric Power Systems**

JAMES MOMOH • LAMINE MILI

电力系统经济性 市场设计与规划

(美) 詹姆斯·莫莫 编
拉明·米利
董 军 薛贵元 译



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



WILEY

内 容 提 要

本书是关于电力系统规划及经济性市场的论著，由詹姆斯·莫莫（James Momoh，美），拉明·米利（Lamine Mili，美）编，董军、薛贵元翻译。本书对重组后的电力系统规划和运行中的经济、社会、安全等问题进行了介绍，提出了一些指标，阐述了电力系统理论和应用中的前沿知识。

本书共分 10 章，主要内容包括：跨学科研究和教育框架，电力市场模型简介，放松管制的电力系统中输电投资的替代性经济准则和主动规划，日前电力交易中包括需求侧竞价和部分容量成本补偿的支付成本最小化，电网中的动态寡头竞争和基础设施故障的影响，垄断和双头垄断电力市场中系统可靠性及政府管制，用跨学科方法建立高效可靠和可持续的电力系统，考虑直接和间接社会经济成本的基于风险的电力系统规划，基于可重置电容器切换的输电扩展规划模型，电力系统优化的新方法。

本书可用于市场经济学和电力系统规划方面的电力工程教育，可供电力工程、经济学、系统工程等学科研究人员和高等院校相关专业师生阅读。

图书在版编目（CIP）数据

电力系统经济性市场设计与规划 /（美）莫莫（Momoh, J.），（美）米利（Mili, L.）编；董军，薛贵元译. —北京：中国电力出版社，2016.11

书名原文：Economic Market Design and Planning for Electric Power Systems

ISBN 978-7-5123-8789-8

I. ①电… II. ①莫… ②米… ③董… ④薛… III. ①电力市场—设计 ②电力市场—规划 IV. ①F407.61

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2016）第 006451 号

北京版权局著作权合同登记

图字：01-2013-0564

Copyright © 2010 by Institute of Electrical and Electronics Engineers. All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled *Economic Market Design and Planning for Electric Power Systems*, ISBN 978-0-470-47208-8, by James Momoh & Lamine Mili, published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

中国电力出版社出版、发行

（北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>）

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 11 月第一版 2016 年 11 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 17 印张 301 千字

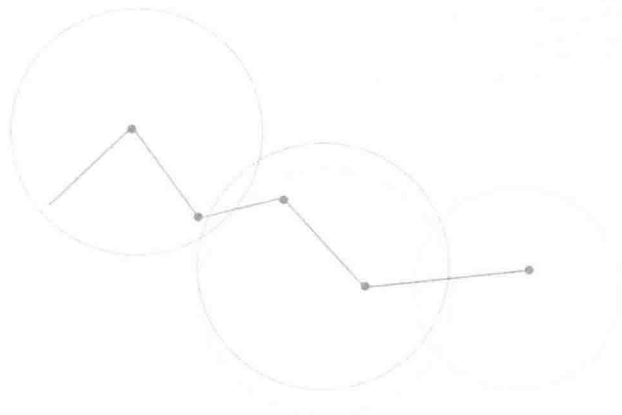
定价 99.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



译者序

自 20 世纪八九十年代以来，以产业结构重组、发电侧和售电侧引入竞争、输配电网无歧视开放、建立电力批发和零售市场等为特征的电力市场化改革在世界各国普遍开展。虽然各国的改革起点不同，具体的改革路径也不尽相同，但是经过近 30 年的实践，各国不断调整政策设计和市场设计，逐步形成了电力改革和电力市场建设的若干共识，例如在发、输、配、售各环节引入多元资本，以增强电力工业活力；将电力产业链上的竞争性环节与垄断性环节相分离；培育足够多的参与竞争的市场主体；由独立的系统运行者即调度机构保证电力系统安全稳定运行；建立电力交易市场，由独立的交易机构负责市场运行等。随着气候变化和环境问题的加剧，全球电力工业目前面临着一些新的问题，一些国家意识到 90 年代以来实行的市场设计还不足以应对面临的挑战，应兼顾电力安全、低碳发展和提高产业效率的目标对电力市场加以完善。未来电力工业面临的挑战将是在保障能源安全、加强竞争和低碳发展这三个政策目标之间寻求和谐兼容。

中国的电力改革经历了集资办电、政企分开、厂网分开等过程，自 2002 年厂网分开以来，中国电力市场建设在进行了一些尝试以后基本处于停滞状态，随着 2015 年国务院《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》（中发〔2015〕9 号）的出台，中国开始了新一轮电力改革，改革的核心任务是还原电能商品属性，建立电力交易市场，实现以市场机制合理配置资源。

鉴于电能在全社会中的重要性以及电能商品的特殊物理属性，电力市场的设计比起一般商品市场要复杂得多，一旦出现问题，面临的风险也是巨大的。学者对电力市场中的各种问题进行了大量研究，这些研究成果对于我国目前的电力市场建设有着重要的参考意义。

本书英文版出版于 2010 年，是基于美国国家科学基金会资助的电力市场研究项目而编写的，项目研究工作由电力工程、经济学和系统工程等领域的跨学科研

究人员完成。本书的主要内容有电力市场建模概述，包括电力市场基本结构、市场行为建模、节点边际电价等；输电网扩展规划的新方法；考虑需求侧竞价和容量补偿的日前交易问题；电力市场中寡头竞争的动态博弈模型；垄断、双头垄断和竞争性电力市场中的系统可靠性及政府管制问题；基于社会经济目标的考虑风险的电力系统规划问题和输电系统扩容模型；最后对电力系统新型优化技术进行了总结。本书涵盖了电力市场的主要内容和前沿知识，运用了经济学、发电和电网技术、优化技术、风险分析和系统工程等多种理论，建立了电力市场分析和电力系统规划的若干模型并加以应用。本书适合的读者对象是高等院校电力工程专业或能源经济专业的教师和研究生，相关研究机构的学者、研究人员、规划人员、电力行业管理者、工程师。

希望本书的翻译出版能够对我国新一轮电力改革和电力市场建设起到参考作用。由于本书涉及较深的电力技术和经济理论，我们水平有限，译本中错误和不够准确之处在所难免，诚挚希望读者批评指正。

译者

2016年6月



前 言

本书是基于电网效率与安全研究项目（EPNES）的一系列跨学科研究活动而编写的。该项目由美国国家科学基金会（NSF）和美国海军研究院（ONR）资助，其研究工作由电力工程、经济学和系统工程等领域的跨学科研究人员、大学教授和研究生完成。本书由经济学、社会科学和电力系统的专家编写完成，能够满足政策制定者、电力行业管理者、工程师、大学教师、研究生的需要，能够满足电力系统、经济学、社会科学等相关交叉学科的研究人员的需要。

本书的主题是重组后的电力系统规划和运行中的经济、社会和安全等问题，特别是提出了一些指标，来衡量竞争环境下电力系统在生存、安全、效率、可持续性和支付能力等方面的灵活性。

本书可用于市场经济学和电力系统规划方面的电力工程教育。它提出了一种基于研究的跨学科课程，为工程师、经济学家和社会学家在竞争环境下安全有效地规划和运行电力系统提供了参考；还从宏观角度强调了可靠的电网设计对实现经济可持续发展的重要性。本书的目的是提供电力系统理论和应用中的实用和前沿知识。

本书由 10 章构成。

第 1 章由詹姆斯·莫莫（J. Momoh）执笔，介绍了电网效率与安全研究项目的研究初衷。

第 2 章由阿尔弗雷多·加西亚（A. Garcia），拉明·米利（L. Mili）和詹姆斯·莫莫（J. Momoh）执笔，从经济学和电力工程两个方面全面分析了电力市场目前和未来的经济结构。

第 3 章由恩佐·E. 扫玛（E. E. Sauma）和什穆埃尔·S. 欧伦（S. S. Oren）执笔，提出了一种应用多阶段博弈模型的输电网扩展规划新方法，考虑了发电和输电投资相互作用的影响和输电对现货市场价格的影响。

第4章由彼得·陆宝森 (P. B. Luh), 陈莹 (Y. Chen), 约瑟夫·H. 严海 (J. H. Yan), 加里·A. 斯特恩 (G. A. Stern), 威廉·E. 布朗克森 (W. E. Blankson) 和赵锋 (F. Zhao) 执笔, 解决了在日前交易中, 考虑需求侧竞价和部分容量成本补偿的支付成本最小化问题。

第5章由瑞特布拉塔·玛克赫吉 (R. Mookherjee), 本杰明·F. 霍布斯 (B. F. Hobbs), 特里·L. 弗里茨 (T. L. Friesz) 和马修·A. 里格登 (M. A. Rigdon) 执笔, 提出了一种动态博弈理论模型, 解决在空间分配上存在寡头竞争的电力市场的24小时规划问题。

第6章由乔治·黛儿塔 (G. Deltas) 和克洛斯托弗·海德吉豪斯特斯 (C. Hadjicostis) 执笔, 研究了系统的可用性/可靠性、行业重组和管制约束之间的相互作用。

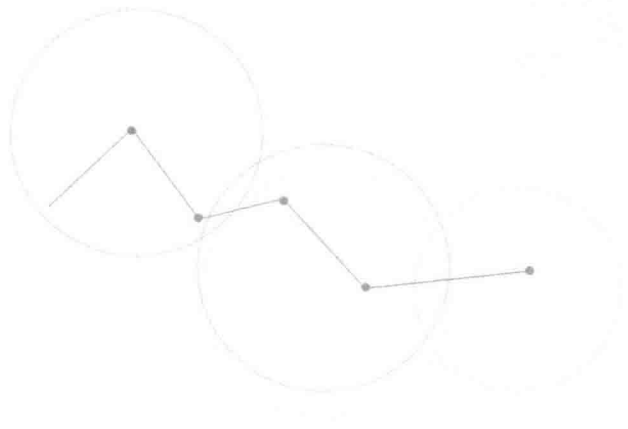
第7章由詹姆斯·莫莫 (J. Momoh), 飞利浦·法纳拉, Jr. (P. Fanara Jr), 海达尔·库尔班 (H. Kurban) 和 L. 基德·爱瓦瑞 (L. J. Iwarere) 执笔, 介绍了在边际约束条件下, 可靠性措施的经济技术模型和性能指标。

第8章由拉明·米利 (L. Mili) 和凯文·杜利 (K. Dooley) 执笔, 研究了在满足安全性与可持续性目标的统一方法框架下, 大规模电网的风险评估及管理决策过程。

第9章由詹姆斯·麦考利 (J. McCalley), 特列苏·库玛尔 (R. Kumar), 温卡塔拉玛纳·阿贾拉普 (V. Ajjarapu), 奥斯卡·范利 (O. Volij), 刘海峰 (H. Liu), 金立成 (L. Jin) 和尚文卓 (W. Shang) 执笔, 介绍了输电系统扩展模型, 即对输电成本进行经济分析从而做出决策。

第10章由詹姆斯·莫莫 (J. Momoh) 执笔, 阐述了电力系统新型优化技术。

编者感谢美国海军研究院的凯瑟琳·杜鲁 (Katherine Drew) 为本工作提供了经济上和精神上的支持, 艾德文·赛威 (Edwin Zivi) 提供了标尺, 美国海军研究院和美国国家科学基金会的同仁对本工作起到了促进作用。感谢美国国家科学基金会前主任 R. 斯拉 (Rajinder Khosla) 和瓦苏·瓦拉丁 (Vasu Varadan), 他们为本工作提供了最初的资助。感谢美国国家科学基金会的保罗·韦尔博斯 (Paul Werbos) 和基森·巴提 (Kishen Baheti) 与编者就电力系统可靠性和教育等问题进行了跨学科研讨。感谢美国国家自然科学基金会的 DUE 项目主任, 来自美国国家科学基金会本科教育部门的罗杰斯 (Rogers) 和美国国家自然科学基金资助项目 (NSF-BES) 部门的布鲁斯·汉密尔顿 (Bruce Hamilton), 最后, 感谢霍华德大学和弗吉尼亚理工学院的研究生对本书所做的贡献。



目 录

译者序

前言

第 1 章	跨学科研究和教育框架	1
1.1	引言	1
1.2	电力系统面临的挑战	2
1.2.1	电力系统建模和计算方面的挑战	4
1.2.2	建模和计算技术	4
1.2.3	涵盖系统理论和电力系统经济学与环境科学的新课程	4
1.3	电网效率与安全研究项目框架解决方案	4
1.3.1	电网效率与安全研究项目框架的模块介绍	5
1.3.2	电网效率与安全研究项目标准测试平台研究展望	6
1.4	电网效率与安全研究项目的实施策略	7
1.4.1	性能指标	7
1.4.2	目标定义	7
1.4.3	目标函数和图示	8
1.5	电网效率与安全研究项目 (EPNES) 测试平台	12
1.5.1	海事电力系统模型	12
1.5.2	民用测试平台——179 节点美国西部系统协调委员会 (WSCC) 标准电力系统	13
1.6	电网效率与安全研究项目资助的研究工作举例	14
1.6.1	电网效率与安全研究项目资助的专题研究	14
1.6.2	电网效率与安全研究项目资金的分布	15

1.7	电网效率与安全研究项目未来的发展方向	16
1.8	结论	16
	致谢	17
	参考文献	17
第 2 章	电力市场模型简介	18
2.1	引言	18
2.2	电力市场基本结构	19
2.2.1	消费者剩余	20
2.2.2	输电阻塞租金	20
2.2.3	市场力	21
2.2.4	电力市场结构	21
2.3	策略行为模型的建立	22
2.3.1	策略行为模型综述	22
2.3.2	基于价格的模型	23
2.3.3	基于产量的模型	26
2.4	PJM 节点边际定价系统	29
2.4.1	PJM 节点边际定价系统概述	29
2.4.2	输电阻塞费用和金融输电权	29
2.4.3	三节点系统示例	30
2.5	自适应动态规划节点边际价格 (LMP) 计算	35
2.5.1	静态节点边际价格 (LMP) 问题概述	35
2.5.2	不确定条件下随机动态市场中的节点边际价格 (LMP)	36
2.6	结论	37
	参考文献	37
第 3 章	放松管制的电力系统中输电投资的替代性经济准则和主动规划	42
3.1	引言	42
3.2	电网扩容中相互冲突的优化目标	45
3.2.1	径向网络示例	45
3.2.2	径向网络示例中的敏感性分析	50
3.3	政策影响	51

3.4	主动输电规划	52
3.4.1	模型假设	52
3.4.2	模型变量	55
3.4.3	模型描述	55
3.4.4	输电投资模型比较	57
3.5	三节点电网分析示例	58
3.6	结论与展望	61
	参考文献	63
第 4 章	日前电力交易中包括需求侧竞价和部分容量成本补偿的支付成本最小化	65
4.1	引言	65
4.2	文献综述	66
4.3	问题的描述	67
4.4	求解方法	69
4.4.1	增广拉格朗日函数	69
4.4.2	建立并求解机组子问题	70
4.4.3	建立并求解招标子问题	73
4.4.4	求解对偶问题	74
4.4.5	生成可行解	74
4.4.6	初始化和终止准则	75
4.5	结果和分析	75
4.5.1	示例 1	76
4.5.2	示例 2	77
4.6	结论	78
	参考文献	78
第 5 章	电网中的动态寡头竞争和基础设施故障的影响	81
5.1	引言和目的	81
5.2	建模方法概述	83
5.3	模型描述	83
5.3.1	符号说明	83
5.3.2	发电商的极值问题	85

5.3.3	系统运行者的问题	87
5.4	等效非线性互补模型的公式化	88
5.4.1	发电商的互补条件	88
5.4.2	独立系统运行者的互补条件	91
5.4.3	完整的等效非线性互补模型	91
5.5	等效非线性互补模型算例	92
5.6	结论与展望	99
	参考文献	102
第 6 章	垄断和双头垄断市场中电厂可靠性：市场的结果与社会最佳水平的比较	103
6.1	引言	103
6.2	模型框架	105
6.3	垄断发电商的利润最大化结果	107
6.4	双头垄断市场结构下的纳什均衡	109
6.5	全社会最优化	110
6.6	均衡状态的比较与分析	111
6.7	不对称维护策略	113
6.8	结论	114
	致谢	115
	参考文献	115
第 7 章	用跨学科方法建立高效可靠和可持续发展的电力系统	118
7.1	引言	118
7.1.1	当前电力系统的不足	118
7.1.2	针对以上问题的解决方案	119
7.2	电力系统可靠性相关概念	120
7.2.1	可靠性	120
7.2.2	电力系统可靠性要求	120
7.2.3	公众认知度	121
7.2.4	电力系统和相关新技术	121
7.3	处理紧急状态的理论支持	126
7.3.1	应急事宜	126

7.3.2	公众认知的建立	126
7.3.3	可用传输能力	128
7.3.4	可靠性度量及指标	128
7.3.5	社会失供电量期望值和失负荷值	131
7.3.6	系统绩效指标	132
7.3.7	加权概率指数 (WPI) 的计算	132
7.4	设计方法	133
7.5	实现方法	134
7.5.1	含灵活交流输电系统装置的美国西部系统协调委员会系统潮流分析	134
7.5.2	IEEE 30 节点系统和美国西部系统协调委员会系统绩效评价研究	135
7.6	实施结果	135
7.6.1	含灵活交流输电系统装置的美国西部系统协调委员会系统潮流分析	135
7.6.2	IEEE 30 节点系统的绩效评价研究	136
7.6.3	美国西部系统协调委员会系统的绩效评价研究	139
7.7	结论	141
	致谢	141
	参考文献	141
第 8 章	考虑直接和间接社会经济成本的基于风险的电力系统规划	144
8.1	引言	144
8.2	分区多目标风险方法	146
8.3	分区多目标风险方法在电力系统规划中的应用	148
8.4	在电力系统规划中考虑社会和经济影响	150
8.5	能源危机和公众危机	151
8.5.1	经济和社会成本评估方法概述	151
8.5.2	中心共振分析方法	153
8.5.3	加州能源危机和 2003 年美国大停电的数据分析	154
8.6	结论与展望	156
	参考文献	157

第 9 章	基于可重置电容器切换的输电扩展规划模型	162
9.1	引言	162
9.2	规划过程	164
9.2.1	工程分析和成本责任	166
9.2.2	输电拥有者的成本回收	167
9.2.3	经济因素驱动的电网扩容	167
9.2.4	扩展阅读	168
9.3	传输限制	169
9.4	决策支持模型	170
9.4.1	优化模型	171
9.4.2	输电线路规划	174
9.4.3	输电控制规划	178
9.4.4	动态分析	189
9.5	市场效率和输电投资	194
9.6	结论	206
	致谢	207
	参考文献	207
第 10 章	电力系统优化的新方法	215
10.1	引言	215
10.2	新型优化方法框架	217
10.2.1	模块综述	217
10.2.2	组织	218
10.3	新型优化方法基础	219
10.3.1	新型优化方法概述	219
10.3.2	决策分析工具	220
10.3.3	经典优化方法	224
10.3.4	最优控制	226
10.3.5	动态规划	228
10.3.6	自适应动态规划	229
10.3.7	自适应动态规划的变体	231
10.3.8	自适应动态规划改进方法的比较	234
10.4	新型优化方法在电力系统中的应用	235

10.4.1	电力系统问题及混合优化方法概述	235
10.4.2	动态随机最优潮流实施框架	236
10.4.3	动态随机最优潮流在处理电力系统故障中的应用	237
10.5	新型优化方法的挑战和研究需求	246
10.6	结论及标准问题	246
	致谢	247
	参考文献	247
	索引	251



第 1 章

跨学科研究和教育框架

詹姆斯·莫莫
霍华德大学

1.1 引言

电网效率与安全研究项目 (EPNES^①) 研究大型电力系统, 包括美国公用电力公司和海军电力系统, 以及在面对各种事故和灾难时的安全性、有效性和行为能力等根本性问题。电力系统是否坚强, 是通过其生存能力、安全性、有效性、可持续性和支付能力等各种特性来衡量的。

迫切需要发展新的理论框架和方法, 对复杂、高效和安全的电网进行分析、规划和运行。有了这些框架和方法, 要使其长期发挥作用, 还要开发相应的教育资源, 使这些方法能够为电网设计、开发和运行人员所用, 所以要设置教育教学活动和相关课程。未来将运用多学科知识来设计并升级具有更高性能的、动态的、适应性强的非线性网络, 从而提高生存能力、安全性、可靠性、可重构性和有效性, 电力系统是其中的一种应用。

此外, 为了提高学习电力工程课程的兴趣, 同时解决放松管制的电力行业的人力资源问题, 有必要开发一些跨学科的基于研究的课程, 供从事电网规划运行的工程师、经济学者和科研人员学习。同时必须认识到电力网络是一个社会-技术系统, 也就是说电网的良好运行既与技术因素有关也与社会因素有关。宏观来说, 坚强的电网是实现经济可持续发展的关键因素。

电网安全方面的问题不仅仅是由于技术上的漏洞造成的, 还可能由于蓄意破坏、不正确的利益驱动、规范化不足、能源生产不足、输电设施匮乏以及缺乏训练有素的工程师、科学家和操作人员等原因造成。

① EPNES: Electric Power Networks Efficiency and Security, 电网效率与安全研究项目——译者注。

因此，需要开发一种跨学科的方法，即综合运用工程学、环境科学和社会经济科学，来解决这些问题。美国国家科学基金会（NSF）认为这一研究能够保证美国在合理的电价水平上持续提供电能，并将环境影响降至最低。希望社会经济原则与新的系统理论和系统分析计算方法的结合能够使电网更高效、更坚强、更安全。图 1.1 描述了研究和教育过程中各学科之间的关系。

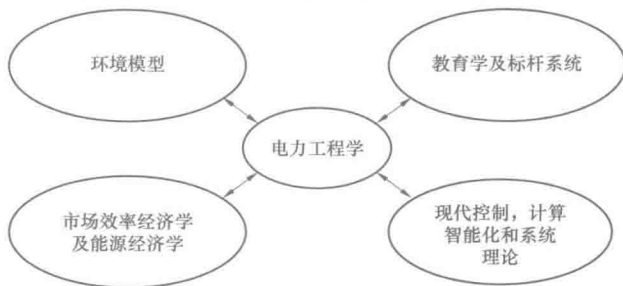


图 1.1 研究和教育过程中的学科交叉关系

需要进一步研究开发电力系统自动化技术，才能满足技术、经济和环境的要求，目前开展的研究主要是单学科的，而跨学科的整体研究不足，这主要是由于缺乏统一的教育教学框架，而且各领域专家没有同心协力解决问题。统一的教育教学框架和跨领域协作研究能够对不同情况下的电力系统有更深入的认识。

为了克服有关电网安全高效的知识体系障碍，必须开发全新的、相互渗透的课程，在这些课程中综合运用先进的系统理论、经济学、环境科学、政策和技术等方面知识。这些新的课程将使学生和老师都具备多学科思维，从而能更好地为未来的电力工业服务。因此，EPNES 强调在研究和教学活动中采用多学科交叉的方法，潜在的跨学科课程有金融工程、电力市场、成本收益分析、电力与环境科学、现代系统理论、智能计算、电力经济和放松管制的电力工业中的计算工具等。

建议所有的跨学科课程都使用规范的标准系统来检验/验证所开发的理论和工具，可能的话，这些课程应该由跨学科的教授共同授课。为了使知识得到更好的理解和推广，应当在本科生和研究生中开设这些课程，以研讨会和讲座的方式讲授，还应该放在相关研究机构的网站上，并有一个评估方法来保证其持续推广，评估它们在吸引学生、培养员工和建设高效可靠电力企业等方面的影响。

1.2 电力系统面临的挑战

EPNES 项目提出了一些新的概念，这些概念将控制、建模、集成技术以及社会和经济理论结合起来，以提高电力系统的效率和安全性。它向教育工作者和

科学家们提出了挑战，要求他们开发新的基于交叉学科研究的课程，并且要求这些课程能激发学生的学习热情。面对如此巨大的挑战，由工程师、科学家、社会学家、经济学家、环境学专家组成的交叉学科研究团队需要大力协同合作。这些挑战包括但不限于以下几方面：

(1) 系统和安全方面。

1) 高级系统理论：复杂建模和模拟的先进理论和计算机辅助建模工具，先进的适应性控制理论，能对复杂和不确定系统进行优化处理的智能化分布式自主学习智能体及相关控制。

2) 稳固的系统结构和配置：优化和测试功能性元件/结构配置的先进分析方法和工具，包括对电子设备和系统组件的控制、复杂性分析、时域仿真、动态负荷削减优先级分配以及不确定性条件下的博弈策略。

3) 安全性和高可靠性系统结构：容错和自愈网络、情景识别、智能传感器和结构变化分析等新技术和工具，包括适应性控制算法、系统和组件安全性、故障期间保证持续服务的故障控制系统。

(2) 经济性、效率和行为方面。

1) 管约束和激励机制：研究管制对电网经济性影响的新思路。

2) 风险评估、风险识别及风险管理：技术风险评估、公共风险认知和风险管理决策的新方法和应用。

3) 公众认知、消费者行为和公共信息：提高公众对电力系统认知的宣传教育新方法。

(3) 环境方面。

1) 环境监测与控制：保障系统运行维护的新的环境监测技术，排放控制改进技术，环境影响最小化的电网运行技术等，并考虑这些因素之间的相互作用。

2) 整体可持续发展技术：跨学科研究开发保证整体经济可持续发展的资源环境转换技术。

(4) 新的课程设置和教学理论：创造性的课程和教学，融入先进的系统理论、经济学和其他社会科学、环境科学以及政策和技术问题，在本科生和研究生中设置这些课程，以全新的创造性的课程提高学生和教师的兴趣，为电力行业提供更好的人力资源。

(5) 标准测试系统。

1) 标准测试系统：很多方面都需要标准测试系统，如模型的验证、先进的理论、算法、数字化和计算效率、分布式自学习智能体、分层和/或分散系统的可靠监测、适应性控制、自愈网络、故障持续服务等。美国海军电力系统基础架构可