

·基金纵横·

# 国际合作,优势互补,开拓电力系统科研新领域

孙元章 梅生伟

(清华大学电机系,北京 100084)

电力作为一个国家的经济命脉和支柱能源,在国民经济的可持续发展中起着不可替代的支撑作用。目前我国装机容量已超 3 亿 kW,居世界第二位。随着三峡电站、西电东送等大型电力建设工程的实施,大机组、超高压、远距离交直流输电、大容量电力电子设备和可控超导储能设备的应用,我国计划在 2010—2020 年间将建成安全可靠、满足电能传输和市场化运作的全国范围联合电网,届时将出现世界上最大规模的联合电力系统。如何保障该系统安全、稳定和经济运行,是一个重大和迫切的科学问题。

面向上述工程科学前沿课题,同时也是国家的重大需求,从 1999 年开始,电力系统研究所承担了国家自然科学基金海外合作青年基金(59928750)项目——灵活交流输电的先进控制理论的研究(合作单位英国 Brunel 大学电力系统研究所)和国家自然科学基金国际合作项目——电力系统非线性全局鲁棒稳定控制(合作单位日本上智大学机械工程系)。三年多来,合作各方充分发挥中外双方的综合优势,努力创新,共同推动了项目的顺利进展。

## 1 外方的优势及国际合作项目的形成

众所周知,英国是世界上最早开始实施厂网分离、竞价上网和电力行业重构的国家。其独特的电力市场运营和管理模式已被当今世界各国引为成功的样板。英国 Brunel 大学电力系统研究所不仅在电力系统稳定控制领域有很高水平,在电力市场理论与实践方面也有雄厚实力,其电气工程学科在英国大学综合排名第 3。该所主要学术带头人宋永华教授,多年来一直从事电力系统安全分析理论与应用的研究并致力于与我国的学术交流,他在柔性交流输电设备(FACTS)、电力市场环境下的安全稳定控制以及发电竞价理论等方面均作出了国际一流的研

究成果。

日本上智大学机械工程系课题组(含东京工业大学和千叶大学成员)主要致力于自动控制理论及机电工程应用研究,其中在理论、非线性系统控制等领域在国际上有一定影响,在复杂机器人研制、矿车牵引控制等方面处于国际先进水平。其主要学术带头人申铁龙博士系我国留学生,长期致力于中日学术交流。申博士在复杂非线性系统控制、现代鲁棒控制理论方面均有较深造诣,曾出版专著 5 部,发表论文 80 余篇,是一位在国际控制界有影响的青年科学家。

由于电力系统安全经济理论的研究涉及电工、控制科学、系统科学和经济等诸多基础领域,而其中的难点是可以归纳为两个:一是基于电力系统背景的非线性系统的建模与控制,即所谓安全性问题;二是电力市场环境下的现代电力系统运行机制,即所谓经济性问题。考虑到以上介绍的英、日两国有关方面的学科优势,因此我们有方向有选择地申请了两个国际合作项目并得到了自然科学基金委的批准与资助。应该说,明确可行的研究目标、缜密周到的研究计划,特别是对合作方的全面理解,是项目顺利实施的重要保障。这也是我们开展国际合作的一条重要的经验。

## 2 跟踪学科前沿、推动学科建设

电气工程学科是清华大学电机系传统的优势学科,而我国日益发展的电力工业也为这种优势不断注入新的活力。但由于历史的原因,该学科的发展形成了“重应用轻理论”、“重深度缺广度”的态势,以致学术发展后劲不足,创新不够,尤其不能适应新形势下我国电力工业发展的需要。

通过开展国际合作,我们课题组从以往单一的电力系统控制研究方向,发展形成了目前的四个居

本文于 2003 年 1 月 27 日收到。

学科前沿的方向:非线性系统控制理论及机电系统应用、电力系统分析、电力市场环境下的动态安全分析和电力系统仿真实验,其中前三个方向直接与我们的英、日两国的合作研究有关。这也是与我们根据外方优势,合理选择攻关方向分不开的。事实上,由于英、日方合作单位在电力市场和自动控制领域的世界先进水平,使得我们迅速实现了相关学术领域的跨越性发展。比如,在非线性鲁棒控制理论及应用方面,已形成系统性的理论研究成果,并在美国 Kluwer Publisher 出版。同时根据这一理论成果研制的非线性鲁棒励磁调节器已在东北电力红石电厂 55MW 发电机组现场试运行。特别在电力系统 Hamilton 方法研究方面,已有一定优势。目前我们在上述两个方向的研究上已与国际有关同行保持密切联系,不仅跟踪,还实际上保持了学科的前沿性。

总的来说,目前我们的学科布局更加合理,学科交叉性强,尤其是结合我们传统的工程实践优势,使得学科建设进入良性循环,充满生命力。

### 3 解决关键科学问题

#### 3.1 电力系统非线性鲁棒稳定控制

20 世纪 80 年代和 90 年代,清华大学电机系先后基于线性和非线性最优控制理论,开拓了电力系统最优控制研究领域并建立了相应的理论体系。同时,作为理论成果的应用,在世界上首次开发研制了线性最优励磁调节器(LOEC)和非线性最优励磁调节器(NOEC)并用于全国上百座电厂,取得了巨大的社会和经济效益。在取得这一国际领先水平的科研成果的同时,我们也注意到随着我国三峡电站及西电东送等大型工程的建设,电力系统的复杂性及规模也不断增大,因此对安全性的要求日益提高,而旧有的方法和理论已无能为力。这方面有代表性的一个例子即是如何设计控制器使得系统能够有效抑制外部干扰同时保持内部稳定?即所谓的鲁棒控制问题。该问题实际上也是工程科学界有数的热点和难点之一,而特别由于现代电网的强非线性和高耦合性,使得电力系统非线性鲁棒控制的研究变得十分困难。由于日方在非线性系统理论和应用方面的优势,通过双方努力,我们提出了一类有重大创新的设计方法——电力系统非线性增益干扰抑制控制器的递推设计方法。该方法基于不确定性电力系统建模,首先构造出系统耗散不等式的能量存储函数,进而得到非线性增益控制策略。以往非线性鲁棒控制器的设计等价于求解一个二次偏微分不等式,即

Hamilton-Jacobi-Isacs 不等式,而该不等式的求解没有一般的方法可循。我们首次提出了基于递推的设计方法,彻底打破了这一“瓶颈”。有关论文发表在 IEEE, IEE 和《中国科学》等期刊。

#### 3.2 基于能量的电力系统 Hamilton 方法

长期以来,基于能量函数的电力系统稳定分析方法一直在电力系统动态安全分析中占主导地位,尽管该方法存在以下不足:一是只能用于分析评估而无法实施主动控制;二是其能量函数的构造缺乏完善的设计方法和明确的指导思想。为克服现有方法的局限性,我们将 Hamilton 系统理论和方法引入电力系统分析与控制,即首先通过构造 Hamilton 函数和利用反馈 Hamilton 实现理论,将基于一般模型描述的电力系统转换成 Hamilton 描述,然后基于非线性鲁棒控制方法(非线性控制、非线性自适应、增益分析与设计和无源控制理论等),设计基于能量的电力系统控制器。该方法首次实现能量函数(Hamilton 函数)与控制系统的统一表述,从而为控制器的设计提供了系统化的设计手段。用该方法可以实现包括各类 FACTS 设备在内的电力系统 Hamilton 表述,从而为电力系统分散协调控制器设计进而为电力系统稳定分析与控制开辟了一条新路。2000 年,孙元章教授和宋永华教授在 IEEE Review 上发表了该领域的第一篇论文“A new excitation control design using Hamiltonian System Theory”。随后中、英、日各方进一步在该领域合作发表论文十余篇,目前已形成新的学科生长点。

#### 3.3 电力系统安全经济若干重要问题探讨

##### (1) 动态阻塞调度

利用 Hybrid 系统理论建立了电力市场环境下的动态阻塞调度管理理论,包括统一的动态阻塞调度市场的建立、市场竞争机制和事故后系统稳定算法等成果。

##### (2) 基于 DDA(微分差分代数方程)的安全经济优化理论

建立了考虑安全与经济的综合评估性能指标下的基于 DDA 的优化模型,提出了一类控制算法并证明了其收敛性。

以上两方面的成果均是课题研究人员借助于英国电力市场的经验,在 Brunel 大学宋永华教授指导下完成的,且均发表在国际一流学术期刊,为我国在电力市场领域争得了一席之地。

### 4 促进人才队伍培养

我们根据项目研究和人才培养的需要,先后派

遣 25 人次去英国和日本学习,接收培训和开展项目合作研究,其中博士生 7 人,教师 6 人。这里值得一提的是,派遣博士生出国学习 3 至 6 个月的作法,在学校目前面临的“出国热”、“经商热”中,对稳定研究生队伍,切实提高研究生的学术水平具有重要意义。我们在派出研究生前准备充足,认真规划,加上派出周期相对稳定,因此研究生普遍感到在外语、科研训练以及学术水平等方面提高较快。据不完全统计,目前我们派出的每一位归国博士生都在国际一流学术期刊上发表(或录用)1-3 篇学术论文。同样,派遣课题组教师成员出国对开阔科研视野、了解与跟踪国际前沿和提高学术水平等方面也是十分重要的。目前我们课题组每位教师每年一般都有 1 次出国交流的机会,在项目的关键科学问题研究方面,均能取得较大的进展。

在“派出去”的同时,我们对“请进来”也同样重视。通过国际合作项目的支持,我们先后邀请英、日合作方科技人员来华讲学及访问 24 人次,其中宋永华教授每年均来清华大学工作 2 个星期作学术报告 2-3 次,主要介绍现代电力系统新理论和新技术;共同研讨课题及联合指导研究生。申铁龙博士每年

来华两次,工作 1 个月,期间开设“现代控制理论及应用”专题讲座,同时直接参与研究生指导。在双方共同努力下,项目研究和人才培养相互促进。目前我们课题组已形成几个有特色有影响的学术方向,包括硕士研究生在内的研究成员均在国际刊物发表学术论文,并定期出席国际会议,报告我们的最新研究成果。可以说,培养和造就了一支充满活力的年轻人才队伍,是国际合作项目的实施带给我们的最大收获。

## 5 结 论

作为一个从事电工科学领域前沿课题的研究课题组,它的生存和发展离不开国际交流与合作。三年来我们取得一定的创新成果,得到蓬勃发展,是与国际合作基金项目的支持分不开的。通过国际合作,可以实现资源、信息共享,可以在新的研究领域不断产生新思路、新问题,这也是科技创新不可缺少的环节。我们要珍惜和把握机会,进一步走强强联合之路,促进资源优势互补,提高创新能力,为我国电气工程学科的发展做出更大的贡献。

## EXPLORING THE NEW ADVANTAGES OF THE ELECTRIC POWER SYSTEM THROUGH INTERNATIONAL COOPERATION

Sun Yuanzhang Mei Shengwei

(Department of Electrical Engineering Tsinghua University, Beijing 100084)

·资料·信息·

## 我国火灾科学国家重点实验室已成为世界一流实验室

在国家自然科学基金十五年的持续资助下,中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室范维澄院士及其合作者提出并发展了描述火灾科学学科体系的双重性理论模型、受限火灾场区网复合模型和非线性火灾动力学模型,修正了可燃物热解动力学模型;揭示了早期火灾的物理特征与可燃物种类及火灾环境的关系;创造出图像模式识别型火灾探测、定位与联动控制技术,解决了大空间火灾监控的世界性难题,已用于人民大会堂和中央电视台等重要场所,对提高我国消防技术整体水平,促进行业技术进步,起到了先导作用;获国家科技进步奖二等奖和国

家级教学成果一、二等奖;为我国在国际火灾科学界争得了重要的一席之地。

目前,实验室正稳步向着成为国际著名的火灾研究机构的目标迈进。国际火灾科学学会前任主席、美国马里兰大学的昆梯尔教授评价说:“我到过世界上大多数火灾研究机构。无疑,火灾科学国家重点实验室是一个具有许多独特和杰出性能的世界一流的实验室,其研究工作是高水平的”。

(摘自国家自然科学基金委员会 2003 年简报第 2 期)