

24201

电气工程 学科发展 与 科技进步

Technology Development
of
Electrical Engineering

庆祝中国电机工程
学会建会六十周年
学术报告会论文专辑

中国电机工程学会

1994. 10

电气工程学科发展与科技进步

中国电机工程学会建会六十周年学术论文专辑

中国电机工程学会

一九九四年十月·北京

為我國電機工業
發展作出更大貢獻

江澤民

一九九四年十月一日

团结广大电机工程
科技界，为改革开放
和经济建设服务。

李鹏 一九九四年
十月五日

充分发挥电机工程学会
在我国电力工业建设中的
助手和桥梁作用。

钱正英

发扬优良传统 深化学会
改革 继往开来 团结奋进
为四化大业作出更大贡献

热烈祝贺中国电机工程学会成立六十周年

朱光亚

一九九〇年九月十六日

中国电机工程学
会要越办越好
为中国电力事业
发展多玉谋多
划策

史大桢

贺中国电机工程学
会四十周年

一九八四年九月

發揮學會人才知識優勢
促進電機工程科技事業
發展

何光遠
一九九四年
十月十日

中國電機工程學會花甲大慶

六十年來發揚電工

廿一世紀富強中華

顧毓琇恭祝



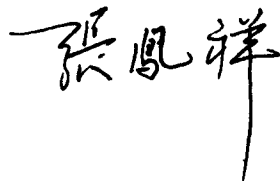
庚午年

前 言

值此隆重纪念中国电机工程学会建会六十周年之际，我会组织了学术报告会和专家发言，并编辑出版了《电气工程学科发展与科技进步》论文专辑。参加撰写论文的有我会直属专业委员会及有关专家、学者，共收录论文 38 篇。

这些论文以论述科技发展战略课题为主，内容涉及到我国大型火电厂、水电厂和电网的设计、施工、调试、运行和管理技术，新能源发电技术，以及大型电气装备的制造、设计等。论文作者大多是本学科或专业领域的学术带头人，其中有的是中国科学院院士和中国工程院院士。本论文专辑部分代表了当今我国电气工程学科的发展水平，较全面、系统地总结了本学科和专业领域的科技发展进程，较准确、客观地反映了我国电力工业和电气设备制造业的最新科技成果，以及科技对推动我国经济建设发展的作用。论文提供了大量科技信息，尤其是提供了当代世界科技领先水平与发展动向。为迎接二十一世纪的到来，论文作者围绕我国科技发展方向，提出了当前应重点研究的科技发展战略以及高科技前沿与当今应用技术结合的前景设想。

我国现已进入了经济体制改革和社会主义市场经济建设的重要发展阶段。科学技术是第一生产力。电力工业是国民经济的先行工业，为使我国的电气工程科学技术在促进我国电力工业的发展和在国际间的竞争中不断前进、不断提高，我们要在原有的基础上进一步抓好高质量、高水平的国内外学术交流活动，积极培养年轻一代科技人才，进一步发挥学会人才济济的智力优势和跨部门、跨行业的组织优势，发挥党和政府联系科技工作者的纽带与发展科技事业的助手作用，为繁荣我国电力与电气制造科技事业，为我国的经济建设和社会进步做出新的贡献。



一九九四年十月

目 录

1. 我国电力系统技术的现状及未来	周孝信 (1)
2. 最清洁的燃煤发电装置 IGCC	赖 坚、郭作东 (7)
3. 形成全国联合电力系统的时机和需要解决的问题	陈德裕、温克昌、蔡 洋 (19)
4. 电工新技术的发展与展望	严陆光 (25)
5. 大力优化电研结构充分发挥水电作用	潘家铮 (30)
6. 关于发展我国特高压输电问题	朱鸣海 (34)
7. 我国超高压输电线路的建设和发展	黄志明、陈汉章 (39)
8. 我国汽轮发电机制造技术的发展	沈梁伟 (47)
9. 大型发电机励磁调节系统的发展近况	陈 陈 (57)
10. 我国水电机组的现状、任务与十年规划	端润生 (61)
11. 我国高电压技术领域的科研近况及发展动向	徐 勇 (72)
12. 磁流体发电——大容量燃煤发电的理想选择	何学裘、严陆光 (76)
13. 我国开发大型潮汐电站的可能性和必要性	陈炳宏、陆凤濛 (82)
14. 风力发电的进展及展望	王承煦 (86)
15. 城市配电网的改进和发展	陈效杰 (92)
16. 我国继电保护技术的发展	陈德树、杨奇逊 (96)
17. 综论工频变化量继电器	戴学安 (101)
18. 8098 微型同步电机参数识别器	丘昌涛、聂宏展 (108)
19. 中国热电联产的总体状况与发展趋势	王振铭 (117)
20. 我国大型电站锅炉的现状与展望	郑泽民、高汉襄 (123)
21. 提高汽轮机组热经济性的途径	蓬静欣、蒋 勇 (137)
22. 电站焊接技术的展望	杨 富、杨建平、赵卫东 (142)
23. 世界能源平衡和我国发电能源优化	孙嘉平、张重实 (147)
24. 电力安全管理和安全技术的进步与发展	陈其祥 (153)
25. 电力可靠性管理在我国的发展	胡修谱、费翊群 (158)
26. 跟踪世界通信技术发展加速电力系统通信网的建设	丁道齐、杨 洪 (163)
27. 我国农电科技发展综述	赵双驹、王 瑞、汪俊荣、马殿敏 (171)
28. 在社会主义市场经济条件下, 电力工程造价管理的探讨	徐国璋 (180)
29. 电建工程造价管理向市场经济转化的探索	袁明渊 (184)
30. 造价管理科学的突破口在于转换投资经营机制	谭正华 (188)
31. 电磁干扰专业技术概况	刘崇青 (193)
32. 电工的基础理论发展简述	萧达川 (198)
33. 带电作业四十年回顾及今后展望	崔江流、孙俊伍、李洪仁 (200)
34. 电力工业的自动化与计算机应用	王平洋、吴凤书 (206)
35. 电力工程土建技术的发展与展望	翟荣民、葛增茂、范景宗 (214)
36. 交流特高压开关设备的展望	楼家法 (219)
37. 高电压新技术的现状与发展	王幽林、张适昌 (223)
38. 神经网络和遗传算法在电力系统中的应用	宋永华、曾庆禹 (231)

我国电力系统技术的现状及未来

CURRENT STATUS AND PROSPECTS OF POWER SYSTEM TECHNOLOGY IN CHINA

周 孝 信

中国科学院院士

中国电机工程学会电力系统专业委员会

Zhou Xiaoxin

Academician, Chinese Academy of Sciences

Power System Study Committee of CSEE

内 容 提 要

新中国成立以来,特别是改革开放十五年来,我国电力工业和电力系统得到迅速发展,电力系统技术也取得了显著进步。本文概述了我国在电力系统规划、设计、建设和运行方面所取得的技术进步,指出三峡电站和三峡电力系统的建议,将极大地促进和加强全国电网的互联,是对电力系统技术的巨大挑战。文中进而提出为适应我国电力系统的进一步发展,当前应重点研究开发的面向二十一世纪电力系统技术的主要目标。

Abstract

Since the founding of the People's Republic of China in 1949, especially in the past 15 years, electric power and power systems in China have been developed rapidly, and at the same time, the remarkable progress has been made in the field of power system technology. This paper outlines the main technical achievements in recent years concerning the power system planning, design, constructing and operating in China. The paper points out that the construction of the Three Gorges hydro project and the Three Gorges Power System will substantially accelerate and enhance the interconnection of the power networks in the whole country. And it is also a big challenge to the modern power system technology. In order to encourage and adopt the further development of power system in China for the next century, the key technical objects which should be in research and development recently are presented in this paper.

一、我国电力系统及电力系统技术的发展

新中国成立 45 年来,电力工业发展迅速,电源开发和电网建设都取得了举世瞩目的成就。特别是改革开放十多年来,我国电力工业有了更蓬勃的发展。1987 年我国发电装机容量突破 1 亿千瓦以后,年新装机均在 1000 万千瓦以上,到 1993 年底,全国发电装机容量已达 18291 万千瓦,居世界第 4 位。在输电和电网建设方面,500 千伏交流输电线路已建成 8000 余公里,±500 千伏高压直流输电已于 1990 年投入商业运行,并先后建成六大跨省电网,标志着我国电力系统已进入大电网、大机组、高压交直流输电的新阶段。

随着我国电力系统的发展,电力系统技术也取得了显著进步。其中主要包括:

1. 交流 500 千伏输电系统的规划设计和运行技术

我国从 70 年代末开始,结合元宝山—锦州—辽阳,以及平顶山—武汉 500 千伏输电工程,研究交流 500 千伏输电系统的规划设计,工程系统调试和运行技术。包括系统潮流和稳定分析,无功补偿和调相调压技术,过电压和绝缘配合,潜供电流及其补偿措施,继电保护和自动装置的应用等。十多年来,我国自行设计、建设、调试和运行了大量的 500 千伏输电工程,积累了丰富的经验。

2. 跨省大区电网的运行控制技术

我国电网经过几十年的发展,到 90 年底,已形成 5 个跨省的大区电网,即华东、华中、东北、华北、西北电网。据 1992 年底的统计,五大电网的装机容量为 10742 万千瓦,占当年全国总容量 16653 万千瓦的 64.5%。其中华东电网装机容量 2670 万千瓦,是国内最大的电网。1993 年,广东、广西、云南、贵州四省(区)电网通过天生桥—广州和天生桥—贵阳 500 千伏输电线和天生桥—鲁布革的 220 千伏输电线的连接实现了电网互联,形成了我国第 6 个跨省电网—南方联营电网。

提高稳定性是大电网运行的关键问题。10 多年来,各大电网特别是稳定问题突出华中、东北等电网,通过大量的稳定分析,研究采用了各种稳定措施,显著提高了电网的稳定性。80 年代中期 4 大电网(华东、华中、东北、华北)调度自动化系统的引进消化,显著提高了大电网运行安全的监视和控制能力,使我国电网调度自动化的技术水平跨上了新的台阶。

3. 高压直流输电系统的规划设计和运行技术

我国从 70 年代即开始进行高压直流输电的工程研究。70 年代末开始结合 100 千伏舟山直流输电工程建设,完成了大量的技术研究,包括直流输电与交流系统相配合的系统研究,无功补偿,电压控制及稳定性,直流系统的控制、保护技术,直流输电谐波及补偿技术等,保证该工程于 1987 年底投产。80 年代初期开始更高电压等级即 ± 500 千伏的高压直流输电系统的研究,结合葛洲坝—上海 ± 500 千伏输电工程建设和国外设备、技术的引进,从 1984 年到 1993 年 10 月间,科研、设计、建设和运行单位相互配合,做了大量工作,完成了工程建设和系统调试,并投入商业运行。在这一过程中,我国科技人员已基本掌握高压直流输电系统技术,使我国电力系统技术提高到一个新的水平。

4. 核电、抽水蓄能和常规大机组接入系统的安全稳定运行技术

80—90 年代我国电网中相继投入 60 万千瓦及以上的常规和核电机组,大型抽水蓄能电站也已开始投入运行。这些大机组的接入系统给电力系统运行带来一系列新问题,如大机组接入系统后产生轴系扭振和次同步振荡,大机组接入小容量电网的运行问题,核电机组与系统的运行可靠性问题,核电、抽水蓄能电站的运行协调问题等。这些问题的解决办法,既要保证电力系统的运行可靠性,又要确保大机组设备本身的安全。如果不能很好协调,从各自的要求出发,所采取的措施可能是相互矛盾的。从 80 年代初期开始,我国结合实际工程,进行了大量“机网协调”的试验研究工作,如 60 万千瓦火电机组的轴系扭振分析,高压直流输电引起次同步振荡研究,福建电网大机小网试验研究,广东大亚湾核电与系统的可靠性分析等。这些工作的开展,使我们基本上掌握了相关技术,为进一步研究和应用奠定了基础。

5. 电力系统规划和运行分析控制技术

10 多年来,我国引进国外先进技术,研究开发一系列建立在经济比较和可靠性分析基础上的电力系统长期规划优化方法和计算程序,并用于大型电力系统规划如三峡电力系统的规

划研究,取得了初步成效。

电力系统规划设计和调度运行,都要采用电力系统分析的方法。随着电子计算机的普遍使用,我国电力系统规划设计、调度运行部门电力系统离线计算分析工作有很大发展。相应地,我国电力系统分析计算机软件的开发和应用也有很大发展。我国自行开发和引进消化的潮流、短路、稳定、谐波、无功优化等计算分析程序已在全国普遍推广应用。

新理论、新方法在电力系统分析和控制中应用的研究有放大进展。线性和非线性控制理论应用于提高电力系统稳定的研究取得重要成果;直接法(包括EEAC)的暂态稳定分析初见成效;专家系统、模糊数学、神经网络的方法应用于电力系统的研究方兴未艾。

二、电力系统技术发展的巨大挑战——建设坚强的三峡电力系统,促进全国电网互联

展望未来我国电力工业的发展,到2000年全国大陆总装机容量将达到3亿千瓦;到2020年将达到7.6—8亿千瓦的规模。全国规模的大区电网互联将逐步实现。

大电网之间通过联络线的连结实现联网运行,是充分利用能源资源,减少装机容量,提高供电可靠性,保证电能质量的有效措施。在各种联网效益中,以错峰效益和水电火电补偿效益和水电跨流域补偿调节的效益较为显著。

分析研究表明〔1〕,我国幅员辽阔,各电网所处经纬度和冬、夏等温线不同,负荷构成也有较大差异。联网后将因时差、温差、和日照差等因素而取得电力负荷的错峰效益。经初步计算,若以1990年的电力负荷量和负荷曲线为基础,实现华北、东北、西北、华东、华中电网五网联网后,可降低日高峰负荷3.12%,减少峰谷差3.88%,提高设备利用少时5.52%,相当于增建一座360万千瓦容量的电厂。

大区电网互联,可使各流域水电站在水文补偿和水库补偿调节的基础上,发挥本流域水电站的优势,在电网中调整水电站运行方式,将弃水电能和季节性电能转换成可用的保证电能,实现水电站群跨流域电力补偿。文〔1〕的研究表明,全国除东北电网外实现大区电网互联,理想条件下可使水电的保证出力提高38.8%。参加补偿的147座水电站单独运行时保证出力4106万千瓦,联合运行后可提高到5700万千瓦。三峡电站和三峡电力系统的建设,将极大地促进和加强全国电网的互联。三峡电站装机容量巨大,总装机容量达1820万千瓦。三峡电力系统包括其供电范围内华中、华东和四川电网,其覆盖的地域东西长1500公里,南北宽500公里,经济发达,大中城市密布,但本地区能源资源和运输条件都不能适应经济增长对能源和电力的需求,即使在三峡电站建成投产之后,也需要从区外输入能源和电力。本区处于我国中部,距北方煤电基地约1000公里,离西南水电基地也在1000—1500公里范围之内。从全国未来电网发展的格局来看,三峡电力系统的地位极为重要。其中华中电网不仅位于全国电网的中心,也位于我国能源富余和能源缺乏地区的交接面;华中电网可能成为我国未来电网西电东送、北电南送的交汇点。因此,三峡电力系统的建设将对我国未来电网互联格局产生重大的、甚至是决定性的影响。

建设三峡电力系统沿长江经济带坚强电网是非常必要的,也是电网发展的必然结果。其必要性不仅在于区内输送三峡电力的要求,还在于为了接受区外大量电力的输入,必须要有一个坚强的受端网架,西南水电基地的开发,包括金沙江约5000万千瓦水电的开发和外送,是我国水电建设继三峡电站后的又一重大工程。它的电力将通过强大的输电系统送电华中、华

东和华南地区。三峡电力系统无疑将承担转送西南水电的任务。随着长江经济带经济建设的起飞,区内 500 千伏网架将大大加强。但 500 千伏网络的密集,将给接受区外如西南金沙江水电的大量电力输入带来困难。因此可以设想,将来在长江经济带地区会出现更高一级电压输电线路的网架,这对于建设沿长江经济带坚强电网,确保区外大量电力输入,实现西东送,北电南送,进而促进全国电网互联具有重要意义。

除金沙江水电东送,通过三峡电力系统实现远距离大容量输电和大范围电网互联外,三峡电力系统将进一步与华北电力系统和南方电力系统互联,缓解华北电网的调峰困难并实现南方电网红水河流域水电与三峡水电的跨流域补偿调节,取得可观的联网效益。据有关单位分析〔2〕,三峡电力系统与华北电力系统联网,利用华中电网和三峡电站富裕的调峰能力送到华北,可缓解华北电网的调峰难度,减少抽水蓄能电站建设和火电机组调峰的压力,并可同时获得季节性错峰效益。测算结果表明,到 2015 年,三峡电力系统可以为华北电力系统提供约 700 万千瓦相当于 275—350 万千瓦抽水蓄能电站的调峰能力;季节性错峰按 2—3% 计算,则 2015 年有 470—700 万千瓦的错峰效益。

三、研究开发面向二十一世纪的电力系统技术

面对我国电力系统发展的巨大挑战,我们必须研究采用先进的电力系统技术,学习国外的先进技术和管理经验,将我国电力系统建设安全可靠、技术先进、经济合理、运行灵活、管理方便的现代化电网。

近期研究开发的主要目标,笔者认为有以下四点。

(1) 提高 500 千伏交流输电线路的输送能力

我国现有的 500 千伏交流输电系统在输送容量、安全稳定水平方面与国外先进水平相比有较大差距。我国一条 500 千伏输电线路输送容量一般不超过 100 万千瓦,而国外先进水平可达 150 万千瓦以上。提高 500 千伏输电线路的输送能力是适应未来大容量输电和大电网网架建设的重要课题。如三峡电站地处靠近负荷中心,采用 500 千伏交流线路向华中、川东地区送电,受到出线回路数多、出线走廊拥挤的限制。为了减少三峡电站出线回路数,充分利用出线走廊,提高安全稳定水平,必须研究提高 500 千伏线路输送能力的技术措施。在线路方面,应研究采用降低线路阻抗,提高输电自然功率的紧凑型线路的可行性;研究采用同杆并架双回线的技术措施。在系统方面,应研究提高稳定性的各种措施,包括 500 千伏线路串联电容补偿和可控并联补偿,各种新型安全自动装置和继电保护装置等。综合措施的采用应将 500 千伏输电线路的输送容量提高到一个新的水平。

(2) 研究远距离大容量高一级电压交流和高压直流输电技术

随着电力电子技术的进步,电力系统中高压直流输电的应用得到迅速发展。我国第一条±500 千伏葛洲坝—上海的直流输电线路已于 1990 年投入运行。三峡电站向华东送电 800 万千瓦也将采用新建 2 回±500 千伏或±600 千伏直流输电线路的方案。直流输电以其输电容量大,稳定水平高,控制调节灵活等优点受到电力部门的普遍欢迎;但当前在技术上还存在着设备运行初期可靠性较低,控制系统技术复杂运行水平要求高,以及与交流输电系统相配合运行时可能诱发大型汽轮发电机组次同步谐振,直流输电造成谐波污染等问题。特别是在多回直流输电线路同方向送电、落点相近的情况下,如何保证交流系统故障时不造成直流输电大范围停运,以及如何充分利用直流输电的控制系统提高交直流混合系统的稳定性等方面还

要作大量的试验研究工作。在提高直流输电设备可靠性,提高直流换流站和高压直流线路设计水平等方面,也要进一步研究。

关于高一级电压交流输电技术,首先要对适合我国输电和电网发展要求的电压等级进行充分论证。当前对是否发展 1000 千伏级的特高压输电,存在不同的学术观点。笔者认为应迅速组织论证,从西电东送的大容量远距离输电和东部沿海发达地区 500 千伏线路密集电网的发展两方面的要求入手,得出正确结论,以便进一步开展研究和开发工作。

(3) 研究和开发灵活交流输电系统 (Flexible AC Transmission System, FACTS) 技术 灵活交流输电系统 FACTS 是 80 年代后期美国开始研究的一种新型交流输电技术。它的主要内容,是应用电力电子学的最新成就和现代自动控制技术,实现对交流输电功率潮流的灵活控制,以大幅度提高现有高压输电线路的输送能力。提高电力系统的稳定水平。FACTS 技术的显著特点是充分利用现有输电设备和线路,以增加 FACTS 装置的方法,在现有交流电力系统内逐步实施。随着电力电子技术的飞速发展,这项崭新的输电技术预计会有广阔的发展前景,对未来交流输电技术的发展和电力系统的建设和运行将产生重大影响。有些专家预计,二十年以后,电力系统会因此而发生重大变革 [3] [4]。

当前国际上 FACTS 技术已进入部分装置的示范工程阶段 [5]。其中高压输电线路可控串联电容补偿 (Thyristor-Controlled Series Compensation, TCSC), 已由 GE 公司、SIEMENS 公司、ABB 公司分别在 500 千伏、230 千伏和 345 千伏高压输电线路建成示范工程。新型无功静止补偿装置 (SVG 或 Static Condenser STATCON) 美国 WESTINGHOUSE 公司已在 TVA 电力公司建成 100MVAR 的示范工程; 日本也已在关西和新信浓 2 个变电所分别建成 80MVAR 和 50MVAR 的自励式 SVC 装置。其他 FACTS 装置如静态移相器 (Static Phase Shifter) 统一潮流控制器 (Unified Power Flow Controller, UPFC) 等也在研制开发过程中。

可以预期, FACTS 技术在我国电力系统中有广泛应用的前景。大电力系统内部及与其他电网互联线路的潮流控制和稳定性控制, 将是电力系统互联运行的重要问题。静态可控移相器和可控串联补偿装置是解决这些问题的有效措施。对电力系统内大量的 500 千伏高压输电线路, 先进的高压无功静止补偿装置和可控电抗器可以提供灵活的无功电压控制能力。其他 FACTS 元件如电力电子动态制动电阻、短路电流限制器等都有在我国电力系统中应用的必要性和可能性。

当前首先应进行电力系统中应用 FACTS 的可行性研究, 包括系统分析及对 FACTS 装置的性能规范要求等。开展主要 FACTS 元件的试验研究, 通过系统仿真和模型试验掌握 FACTS 装置的设计技术, 进一步建设中间试验和示范工程, 掌握 FACTS 装置的制造和运行技术。

(4) 研究互联电力系统的运行控制新技术

互联电力系统规模巨大、结构复杂。系统的安全、经济运行对国民经济的发展有重要影响。为此要采用先进的调度和运行控制技术, 将大范围的互联电力系统建设成安全稳定、经济合理、控制灵活的现代化电网。

要研究开发适合全国互联电网的调度运行新技术。运用计算机信息技术的最新成果, 在全新的计算机硬件和软件平台上开发各级调度自动化系统。建立电力系统运行控制和管理信息系统。建设电力系统专用高速数字通信网。应用神经网络、专家系统、模糊控制等智能控制理论建立电力系统控制新方法。

要建设先进的电力系统仿真中心。以先进的数字仿真技术和物理模拟方法建立电站及电

力系统仿真实验室，解决大型电站及电力系统建设和投入运行后系统规划和运行的关键技术问题；研究电站及电力系统安全稳定运行控制技术；研究电站及电力系统与其他电网互联后实现跨流域补偿调节和水火电补偿调节的经济运行方法；试验电力系统的继电保护和安全自动装置；培训高层次的系统调度运行人员。电力系统仿真系统的建立将为大型电站及电力系统的建设和运行提供有力的分析和决策辅助工具。

参 考 文 献

- [1] 《2020年全国电网发展规划研究（阶段报告）》电力工业部电力科学研究院
- [2] 《三峡电力系统与华北电力系统联网效益和方案选择》1994年3月 电力工业部电力规划设计总院
- [3] “Flexible AC Transmission System (FACTS): Scoping Study, Volume 2, Part 1: Analytical Studies”, Sep. 1991 EPRI Report EL-6943
- [4] 《灵活的交流输电系统——一种新型的交流输电技术》，《电网技术》，1991年8月，第3期 郑健超
- [5] Proceedings: FACTS Conference 2. Dec. 1992 Electric Power Research Institute