

中国电力规划设计协会 组编

DIANWANG SHEJI GONGCHENGSHI SHOUC

电网设计工程师手册

综合篇

杨旭中 王仲华 陈 嫵 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

中国电力规划设计协会 组编

D I A N W A N G S H E J I G O N G C H E N G S H I S H O U C E

电网设计工程师手册

综合篇

杨旭中 王仲华 陈 嫵 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

电网设计工程师手册/杨旭中等编著;中国电力规划设计协会组编. —北京:中国电力出版社, 2009

ISBN 978-7-5083-9322-3

I. 电… II. ①杨…②中… III. 电力系统-系统设计-手册 IV. TM7-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 144037 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 8 月第一版 2009 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 6 印张 131 千字

印数 0001- 3000 册 五篇合定价 120.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

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

《电网设计工程师手册》

编 委 会

主 任 李爱民

副主任 陈 嬿

主 编 杨旭中 王仲华

编 委 杨旭中 王仲华 陈 嬿 张洞明 纪新元

杨德田 张福生 何必慧 邵长利 杨 健

叶子菀 梁沛权 赵庆斌 柴 玮

审 核 吴毅强 李喜来 李宝金 吕世森 季月辉

前言

电网工程原称送变电工程，在光通信工程独立后，为了全面覆盖三个部分，统称为电网工程。

长期以来，电网工程规划、设计、施工、制造、运行和管理方面缺乏系统性的书籍。中国电力规划设计协会历来重视会员单位设计人员的培训工作，为了提高中层技术人员的业务水平，以便进行电网工程设计培训，编写了本手册，经内部多次试讲与修改，现正式出版。

本手册共分五篇，即综合篇、输电技术篇（含光通信工程）、变电技术篇、技术经济篇和项目管理篇，主要从综合设计技术即设总应掌握的技术和多专业协调方面进行介绍。

本篇为第一篇，主要通过回顾历史进程，了解政府主管部门政策、规划与保护公众利益的精神实质和相关规定，贯彻科学发展观和建设和谐社会的要求，从而提高设总思考与处理问题的高度与广度。本篇内容主要参考《电力工程综合技术经济丛书 电力工程造价控制》（2006年第二版）编写，该丛书系针对电力工程（包括发电与电网工程）编写的，第一版是“九五”及以前的总结，第二版增加了“十五”以来的发展。本次编写从内容上突出了电网工程的特点，从时间上补充了“十一五”前三年的新资料。相信对从事电网工程设计、施工、管理、制造及科研和教学的同志都将有所助益。

本篇由杨旭中、王仲华、陈嫵编写，在编写过程中得到了中国电力工程顾问集团公司电网分公司、技经中心、规划中心和中国电力工程咨询公司诸多同志的帮助；吸收了其余各篇编著者，特别是张洞明同志和第一期培训班学员的修改建议，在此一并致谢。

尽管本手册是为电网工程设总培训而专门编写的，但由于涉及前期工作与后期建设的诸多问题，且目前尚无类似的书籍可供参考，故难免存在疏漏与不足之处，敬请广大读者批评指正。

编者

2009年7月

目 录

前言

第一章 综述	1
第一节 历史回顾.....	1
第二节 设总的职责与修养	14
第三节 设总培训	20
第二章 “九五” 总结	21
第一节 概述	21
第二节 造价分析	25
第三节 以静管动	35
第四节 限额设计	40
第五节 建设标准	43
第六节 设计程序和内容深度	47
第三章 “十五” 以来的发展	51
第一节 电力工业体制改革	51
第二节 投资体制改革	53
第三节 宏观调控与科学发展观	55
第四节 全国电网现状	57
第五节 电网建设	65
第六节 电网设计技术	69
第七节 工程造价与输配电价	75
第八节 设计程序和内容深度	80
第九节 “十一五” 前三年	84
参考文献	87

第一章 综 述

第一节 历史回顾

适度了解电网工程设计的发展历史，能温故而知新，将对解决现实问题有所帮助。不仅因为历史上形成的不少经验、教训、政策与规定迄今仍在吸收和使用，而且因为它们研究面临问题及不断创新的基础。

解放以前，电力工业基础十分薄弱，装机少，送变电工程电压低，几乎没有独立的电力设计队伍。1949年，全国电力装机仅 184.86 万 kW，发电 43.1 亿 kW·h，分别为世界的第 21 和第 25 位。新中国成立以后，至 20 世纪末的 50 年中，电力设计队伍，包括电网工程设计队伍，从无到有，从小到大，结合工程的建设规模日益扩大，装备水平的不断提高，已形成布局合理、专业齐全，技术水平高，能够全面、优质、高效完成设计任务的队伍。

一、五个阶段

1. 队伍创建与初步发展（1949～1957 年）

新中国的电力勘测设计队伍是从无到有，从小到大，逐步发展壮大起来的。1950 年，东北地区首先成立了第一个勘测设计单位，“一五”期间，华北、华东、中南、西北等地区相继成立了部直属勘测设计机构。基于当时的国际形势，电力建设只能全面向苏联学习，在援华专家的帮助下，至 1957 年末，已形成由电力设计院归口，下属北京、长春、上海、武汉、西安五个分院共 6000 多人的部属电力勘测设计队伍，能够承担 220kV 及以下高压送变电工程的勘测设计工作。

“一五”期间，由于国家政治及经济形势的需要，送变电设计得到快速发展。抗美援朝开始后，东北电网南部严重缺电。同时，丰满水电厂装机完成后，亦亟须将电力送往东北南部的缺电地区。因此，1952 年 7 月，国家决定建设松东李（丰满—东陵—李石寨）220kV 送电线路工程（即 506 工程），并将设计任务下达给东北电管局设计处。当时世界上除了瑞典于 1952 年投入一条 380kV 线路外，220kV 是最高电压等级。这样一个大工程，对成立不过两年、尚未完成过一条线路设计、人员不足、专业不全的设计处来说，的确是一项非常艰巨的任务。设计人员首先遇到的难题就是一些主要的设计准则无据可寻，导致线间距离，对地距离、气象条件选择、塔型选择及铁塔设计计算方法等，都无法确定。在这种情况下，设计人员只好到沈阳、抚顺、鞍山等地找苏联专家请教，并根据苏联的《电气设计安装规程》，编制出设计准则，经领导部门同意后，作为设计的依据。

这条线路横穿吉林、辽宁两省，全长 360km，沿途经有高山、丘陵和平原等多种地

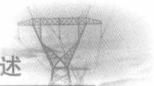
形。线路路径的勘测是线路设计的首道工序，当时，由于勘测人员没有经验，便从生产单位借调来 3 位老技工一同参加勘测工作。勘测队伍在长春南岭进行了试验测量后，于 1952 年 8 月向全线进发。经过第一次踏勘，确定了大致的路径。11 月中旬，根据草拟的定位操作规程，再分 4 个队进行定位测量。在测量工作中，勘测设计人员不仅要解决技术上的难题，而且还要克服生活上的困难，他们不畏寒暑，栉风沐雨，连春节都坚持在工地。虽然由于经验不足，返工复测多次，但最终胜利地完成了勘测任务，为线路设计创造了条件。

该条送电线路给沿线通信线路造成干扰的问题，开始是被忽视的，直到 1953 年 4 月才派专人解决这一问题，经过通信干扰计算并与铁路、邮电、军区等部门协商，互提资料后，相互达成协议。

铁塔设计基本上是从头做起。该工程采用 ACY-400 钢芯铝线，设计人员研究并设计了 11 种塔型，以适应于不同的地况需要。设计工作量之大，在当时来说是前所未有的。然而从初步设计、技术设计到施工图设计，前后只用了一年左右的时间，速度之快也是意料之外的。首先，设计人员收集了东北原有的猫头塔资料，然后又参照从苏联杂志上看到的酒杯塔照片，设计出中国自己的酒杯塔，并编写了铁塔设计的准则。为了证明铁塔是否达到设计要求，还进行了试验，遗憾的是两次试验都未能达到目的。最后在哈尔滨工业大学苏联钢结构专家指导下，拟定了新的试验方案及观测方法，于 1953 年 6 月初再次进行试验。当时，燃料工业部刘澜波副部长亲临现场视察。五天后，完成了不同工况及过负荷等试验项目，经拆塔检查，写出试验报告，哈尔滨工业大学专家予以审核，结论是设计计算基本正确，铁塔在承受各种荷重下安全可靠，强度达到设计要求，可以批量制造。

这项工程于 1952 年 7 月开始设计，1953 年 1 月提出初步设计，6 月提出技术设计，7 月 15 日全面开工后施工图陆续提出。工程于 1954 年 1 月 23 日竣工，1 月 26 日投入运行。其设计和建设速度在当时都是相当快的。该工程共立塔 919 基，耗钢量 $21\text{t}/\text{km}$ ，造价 $9.96\text{万元}/\text{km}$ ，运行后性能良好，为此受到中央燃料工业部的表彰。《人民日报》及苏联《真理报》均在显著位置刊登了这条新闻，该线路工程的建成，在国、内外产生了重要的影响。这是中国自己设计和建设的第一条 220kV 送电线路，是一项为中国人民争气的工程，工程的建成标志着中国在送电设计方面进入了世界先进行列。

松李线路途经的沈阳附近预留的东陵变电站，是国内第一座大型区域变电站，原拟委托苏联设计，后为培养自己的设计力量，改为聘请苏联专家来华指导设计。1953 年专家来华，对站址反复查勘后，确定将其改在沈阳北虎石台。该工程由东北设计分局于 1954 年初开始设计，虎石台变电站电压为 $220/154/46\text{kV}$ ，安装 4 台 $4\text{万 kV}\cdot\text{A}$ 单相三绕组变压器（其中 1 台备用），运行总容量为 $12\text{万 kV}\cdot\text{A}$ ，是当时国内设计的电压最高、容量最大的变电站工程，是国家“一五”重点建设项目之一。在苏联专家指导下，工程于 1954 年 4 月完成初步设计，后为了专家工作方便，改由北京设计分局设计（东北设计分局主要设计人员参加）。技术设计于 1954 年 9 月完成，施工图于 1955 年 8 月完成交付，设计历时约两年。变电站于 1956 年 5 月竣工，同年 7 月正式投入运行。虽然这是首次自行设计高电压大型变电站，但设计质量却很好，根据施工单位的施工记录反映，除施工图两处设计稍作改动外，其余均能满足施工要求。



在全部设计工作完成后,全体参加设计的人员对设计方法和设计技术进行了较为全面的总结,总结内容包括所址的选择条件、施工设计内容、土建设计条件、电缆的敷设、工作程序及图纸表示方法等,仅电气部分就编写了12册专题。设计人员通过该变电站工程的实践,设计水平有了很大的提高,如设计做到了比较系统化和规格化;又如过去不够明确的所用电系统接线、系数 K 值的确定、所用变压器容量及台数的确定、屋外配电装置相间距离确定、张力弛度计算等,都有了较明确的概念;再如过去接触甚少或不知如何去做的空气压缩装置和蓄电池室通风设计等,通过总结,制订出了办法。这项工程对以后的变电设计起到了很好的示范作用。

就全国范围而言,“一五”期间,随着电力工业的发展,供电范围的扩大,各地区逐渐形成了110kV电网。而110kV送变电工程的勘测设计主要由直属院承担。这些工程项目在设计初期也是在苏联专家指导下进行的,但设计人员已开始注意在设计中结合中国国情,这主要体现在线路杆塔和变电站构架设计上。为了节约钢材,北京设计分院在下官(下花园—官厅)110kV线路,上海设计分院在马铜(马鞍山—铜官山)110kV线路设计中,首创并使用了钢筋混凝土拔梢电杆。北京设计分院在北京东北郊110kV变电站设计中,将苏联110kV变电站标准设计的型钢变电架构改为采用钢筋混凝土的AⅡ型架构,改进后的设计不仅可以节约钢材50%,而且这种设施在防腐蚀和耐久性方面又具有木材、钢材不可替代的优点,此项设计成果,得到了1956年全国先进生产者会议的奖励,设计者丁祖赢工程师亦在这次大会上荣获“全国先进生产者”称号。

1955年,北京分院配合纺织工业部,完成了缅甸纺织厂35kV变电站的援外工程设计。这个工程虽然规模不大,但良好的设计质量仍得到协作单位和受援国家的好评。

1957年,武汉和上海院开始进行武汉沌口和安徽裕溪口220kV长江大跨越的钢筋混凝土过江塔设计。220kV送电工程的建设已在内地展开。

2. 独立自主 快速发展(1958~1965年)

从1958年“大跃进”起,到后来中苏关系恶化撤走专家,形势促使电力勘测设计走上了独立自主发展的道路。这一时间,通过5个直属院部分下放人员与各省原有设计力量的重新调度组合,形成了6个直属院(加西南大区)和22个省、自治区、直辖市都有省院互补的电力勘测设计框架。直属院承担220kV及以下的送变电工程设计;省院承担110kV及以下的送变电工程设计。至“文革”前夕,两级设计机构总人数已近9000人。

自1954年全国第一条220kV松李线路投运后,直属院已将工作重点转移到110~220kV电压等级的工程上来,同时开始研究330kV送变电设计的科研项目。而省院则担当起了35~110kV电压等级送变电工程设计的主力,同时也开始涉足220kV的工程。该期间,通过对一批高铁塔、大跨越、新杆型、新基础、高寒、高海拔、高山区送变电工程以及对导线选择、绝缘配合、消除电晕、接地、风速和导线覆冰、通信干扰等科研项目的成功实践,开创了送变电设计的全新局面,涌现出一批具有这一时期送变电发展特征的高水平工程,如220kV武汉长江沌口大跨越、220kV皖中裕溪口大跨越、上海过江水底220kV电缆工程,以及通过高海拔、重冰区、强地震区的云南220kV宣昆(宣威—昆明)线和海拔超过4000m、高寒区占56%、戈壁占44%、风速达35m/s、覆冰厚达10cm的110kV甘肃洒镜(嘉峪关电厂—镜铁山矿区)送电线路等。

东北院经过几年的研究试验,于1965年首次提出了“钢芯铝绞线综合拉断力的合理计算与分析探讨”的科研报告,建议在导线计算中,采用欧美等国通用的综合拉断力方法代替当时的苏联虚假应力计算方法。该项成果发表后,被列入国内《送电设计技术规程》,并为国际所采纳。

国外一些专家为实现地线通信、供电或降低电能损耗,先后采用了地线绝缘的做法,但由于地线绝缘后影响防雷效果及继电保护的灵敏度,故均只对双地线中的一根进行了绝缘,另一根则仍处于完全接地状态。1963年在220kV云首(云峰—本溪—首山)线工程设计中,东北院送电及继电保护专业人员,针对防雷及继电保护灵敏度问题进行了分析、计算和研究,最后决定在工程中采用两根地线全绝缘方案,并获得了成功,该项技术在国际上处于领先水平。地线全绝缘技术在中国经过多年的运行,效果良好。该项技术已被列入我国《送电设计技术规程》。

1960年至1962年,为解决国内一些地区电网供电紧张状况,我国采取了线路升压的措施。为了做好这项工作中,送电设计人员研究并完成了许多新的技术课题。如采用垂直排列的双分列复导线,取消隔离棒的做法,当时在国际上是不多见的。又如结合调查,提出了升压线路的绝缘配合及根据中央导线、地线距离的设计标准等。这些创新设计均为以后的电网运行和送电线路设计标准的制定,提供了有益的依据。

在云首送电线路设计中,不仅首次采用了避雷线全线绝缘、地线通信的新技术,而且其标准塔单基质量指标仅为4.2t,比1953年220kV松李线和1956年水鞍(水丰—鞍山)线的相同塔型的塔重7.20t和6.98t,分别降低了38.6%和36.7%,接近了当时的世界先进水平。

1958年建成的220kV武汉长江沌口大跨越和1960年建成的皖中长江裕溪口大跨越,其主跨距、塔高分别为1722.5、1411m和146.8、116m,当时在国际上均属较大型的跨越。特别是工程所采用的钢筋混凝土结构的跨越塔,也是世界首创。大跨越设计是涉及导线、地线选型以及防舞动、防振、高塔绝缘配合、防雷技术、金具设计、杆塔与基础设计等多方面技术的综合性设计。这两个大跨越的设计成功,充分显示了送变电设计总体水平已跃上了一个新台阶,达到了世界先进水平。

基础设计已开始多样化,除了现浇混凝土基础外,还结合工程设计了岩石基础,预制装配基础、金属基础及高低腿基础等。这些杆塔基础,都是根据现场实际情况,经过研究试验而设计的,其设计原则是在保证安全可靠的前提下,节约投资、方便施工、缩短工期。

在这一时期,由于省院的相继建立,110kV及以下的变电工程设计,已主要由各省院承担,直属院在220kV虎石台变电站投运后,重点进行了220kV变电设计的系统总结与提高,以便使220kV变电工程设计技术进一步完善和发展。如220kV两层高型层外式配电装置设计、采用隔离开关带导电棒铝管硬母线的简化配电装置结构的设计与应用等,是这一时期变电设计技术进步的标志。1964年,开始进行秦安、汤峪变电站的前期工作,拉开了超高压330kV变电工程设计的序幕。

1958年至1959年我国开始设计了东北与华北联网的330kV唐(山)—锦(西)送电线路,这是中国自行设计的第一条330kV电压级线路,该线路已交付施工(已浇制了基

础),后因系统及国家建设方针改变而停建。330kV 唐锦线停建后,经过国民经济调整时期,按规划本应及早在我国出现 330kV 以上更高电压级的线路,但由于 1966 年开始了文化大革命,使得这一计划成为泡影。这种局面一直持续到 1972 年,才在西北地区建成了国内第一条 330kV 刘天关送电线路。而世界上第一条 330~345kV 线路是 1953 年在美国建造的,二者相差整整 19 年,与中国第一条未建成的 330kV 唐锦线相比,也推迟了 12 年。

3. “文革”期间艰难发展 (1966~1978 年)

“文革”期间,部分设计院机构撤销,人员下放,使队伍的整体能力有所下降,但通过设计人员的努力,电力勘测设计在困境中仍然得到了发展,330kV 超高压送变电工程的建成与投运,标志着设计上上了一个新的台阶。

这一时期,国民经济的整体发展速度,决定了送变电线路的建设发展比较缓慢,但技术水平还是在不断提高。1972 年,中国自行建设的第一条 330kV 刘天关超高压送电线路,在西北地区建成投产。1975 年,东北院开始中国第一条 500kV 元锦辽超高压送电线路设计的技术准备,1977 年进行初步设计,1978 年 10 月完成初步设计。330kV 及 500kV 超高压电压等级的出现,是这一时期中国送变电设计技术重大突破的主要标志。在“山、散、洞”方针左右下,个别变电工程在选址上也出现了失误。

330kV 刘天关送电线路,是中国送变电发展史上的一个里程碑。线路西起甘肃的刘家峡水电站,经天水变电站,止于陕西眉县境内的汤峪变电站,线路全长 534km,其中刘家峡至天水变电站为 275.5km,天水变电站至关中变电站为 258.5km,大部分路段海拔在 1500~2000m 之间。该送电线路的投运将关中、天水、兰州、西宁几个独立电网连成一体,形成了陕、甘、青联合电力系统,充分发挥了水电效益。该线路是中国第一个 330kV 送变电工程,1967 年 10 月国家批准设计任务书,1969 列为国家重点建设项目。设计中实行了“工人、技术人员、领导干部”三结合和“设计、施工、运行”三结合的工作方式。设计人员以西北院为主,并有西南院、东北院及电力建设研究所部分人员参加。1969 年 11 月完成初步设计,1971 年 5 月完成施工图设计并全面开工。1972 年 6 月正式投入运行。刘天关送电线路工程是由中国自行设计、制造和安装的第一条超高压送电线路,由于在设计中积极采用新技术,推动了中国超高压送电技术的发展,为以后建设更高电压等级的送电线路工程打下了基础,该工程设计 1978 年获全国科学大会奖,1981 年获国家优秀设计奖。

1973 年至 1976 年间,华东院设计了 220kV 双回路长江大跨越工程,该工程采用钢管跨越塔,跨越点从长江北岸的南京热电厂到江中八卦洲再到长江南岸的燕子矶,整个工程由北江和南江两个跨越段组成。北江跨越段跨距 1107m,耐张段全长 1878m,北塔为高 125m 的直立钢管塔,南塔为 166m 高的拉线钢管塔。南江跨越段跨距为 1933m (当时国内 220kV 线路跨距最长的一段),耐张段全长 2837m,两座跨越塔各高 193.5m。工程设计中首次采用钢芯铝包钢导线,履带式悬垂线夹,螺旋式耐张夹以及大吨位玻璃绝缘子等多项新技术,体现了当时国内最高水平。仅钢芯铝包钢导线一项,每年可减少电能损耗 1500 万 kW·h,节约运行费用 39 万元。工程于 1976 年建成投运,1981 年获国家优秀设计奖。

330kV 陕西汤峪变电站位于陕西省关中地区眉县境内的汤峪河畔,距西安 130km。该工程是作为战备电源设计的,人防要求较为严格,1969 年初列入国家重点建设项目。该变电站是刘天关送变电工程的终端降压变电站,也是全国首次建设的超高压变电站。工程由西北院于 1970 年完成设计,同年 11 月开始安装,1972 年 6 月正式投入运行。汤峪变电站工程作为刘天关线路工程的一部分,荣获全国科学大会奖和国家优秀工程设计奖。

郑州大坡顶 220kV 变电站是河南电力系统的枢纽变电站,是按“山、散、洞”方针建设的变电站的一个特例,站址选定在荥阳县峡窝乡大坡顶西沟。该工程的主要特点是:站址处于山沟内,具备打洞条件,主变压器可安装在洞内,符合隐蔽要求;110、220kV 设备区可分别布置在洞外的山沟中,也符合靠山要求;距郑州铝厂仅有 2km,靠近负荷中心,布点合理。该工程 1966 年开工、1969 年停建,1974 年恢复建设,1977 年建成投运。投运后曾多次发生生产安全重大事故,其主要原因,一是变压器安装在洞内,又为水冷式,因通风不良,进水受潮,造成高压绕组击穿;二是变电站在沟内为台阶式布置,造成滑坡与塌方。另外还因沟内狭窄,存在着无法扩建等问题。因此,1984 年不得不将大坡顶变电站搬迁至峡窝,搬迁扩建工程投资 1700 万元。

至 1978 年末,全国装机 5712 万 kW,发电 2565 亿 kW·h,建有相应的送变电设备。

4. 改革开放 全面发展 (1979~1999 年)

从 1978 年开始,随着我国改革开放政策的贯彻实施,电力勘测设计进入了一个新的发展时期。国内设计单位和科研单位密切合作,开始了对 500kV 线路的国外科技情报资料收集和科研试验工作,针对 500kV 线路的绝缘配合、静电感应、无线电干扰、杆塔结构、金具及绝缘子设计等问题进行了大量的试验研究,为我国超高压线路的设计提供了扎实的技术支撑,并于 1981~1982 年陆续建成了 500kV 元锦辽及 500kV 平武送电线路。500kV 线路的建成及其丰富的科研试验和运行经验的积累,为我国迈向更高电压等级的超高压和特高压线路的建设打下了雄厚的技术基础。职工总数从 1978 年近 14000 人增加到 1999 年的 19000 余人,通过引进西方先进设计与装备,不仅掌握了 500kV 超高压送变电工程设计技术,而且在直流输电等领域获得较快的发展,标志着我国电网工程设计技术和能力已达到或接近国际先进水平。

1981 年到 1983 年间,先后设计建成了交流 500kV 平武送变电工程和元锦辽送变电工程。设计人员在这两项 500kV 送变电工程实践中,开发和应用了大量的科研成果,为中国超高压送变电技术的发展打下了坚实的基础。在此期间,东北、华北、华东及南方四省(广东、广西、云南、贵州)的 500kV 电网建设相断展开。

与此同时,中国的直流输电技术也在同步发展。1987 年,全部由中国自行研究、设计、制造、施工和调试的浙江宁波至舟山±100kV 直流输电工业性试验线路投入运行;1989 年至 1990 年,葛洲坝至上海跨大区±500kV 直流输电工程单、双极先后建成并投入运行。这两项工程的全面建成投运,标志着中国的直流输电技术实现了质的飞跃。

为了节省宝贵的土地资源,节约线路走廊,进入 20 世纪 90 年代,设计提倡加大导线截面,采用紧凑型线路等技术。并已建成了 500kV 同塔双回路和 220kV 同塔 4 回路的线路工程,华北的安定至廊坊 220kV 紧凑型线路已经投入运行,昌平至房山 500kV 紧凑型线路到 1999 年底正在建设中,同时三峡送变电工程和部分大城市的 500kV 线路已开始选



用 $4 \times \text{LGJ}-400$ 和 $4 \times \text{LGJ}-630$ 等大截面的导线。

各院在完成国内设计任务的同时,积极开拓国外市场,参与国外工程项目的竞争。到 20 世纪 90 年代末,电力设计系统先后中标并承接了孟加拉、巴基斯坦、印度尼西亚、菲律宾、越南等国的多项 $110 \sim 500 \text{kV}$ 送电线路工程的设计。

从 1981 年到 1999 年,送变电工程共有 39 个项目获得国家优秀设计奖,其中金奖 13 项、银奖 17 项、铜奖 9 项。

5. 进入 21 世纪 (2000 年至今)

从 2005 年开始,开创了我国电网发展超越世界先进水平的历程。当年,我国即开始了交流 1000kV 及直流 $\pm 800 \text{kV}$ 电压及电网的各项关键技术的研究,并着手开始了相应工程的可行性研究工作。2006 年即着手进行了相应工程的初步设计。目前 $\pm 800 \text{kV}$ 云广线及 $\pm 800 \text{kV}$ 向家坝—上海和锦屏—苏南线路正在修建, 1000kV 晋东南—荆门送电线已经投产,其电压之高 (尤其是 $\pm 800 \text{kV}$ 直流输电线路) 已赶上并超越了现有世界发展水平。

二、我国送变电工程设计的发展与变革

1. 设计技术水平之发展

我国送电工程设计技术水平之发展也基本上可分为五个阶段,即:学习设计阶段;发展成长阶段;十年“文革”阶段;改革开放赶上世界水平阶段;超越世界先进水平阶段。

1950 年至 1955 年,属于学习设计阶段,当时既无懂得设计的技术人员也无可资利用的技术资料,对于送电线路设计的一般常识,如垂直档距、水平档距等,也要从头学起。1952 年苏联派来了技术专家,并带来了“苏联电气设备安装规程”及“送电线路勘测规程”,才使设计有所遵循。通过工程实践,逐渐掌握了设计工序及设计阶段的划分;各阶段内容深度要求;有关技术问题的计算方法;应提出的图纸及其内容深度等有关送电线路设计的各方面的知识和技术,培养了送电线路设计勘察的技术队伍,从而为我国送电线路设计开创了局面。

1956 年至 1965 年,属于发展成长阶段,在此阶段,虽经历了“大跃进”,“敢想敢干”,提出了“超英赶美”的口号,并进行了“ 330kV 唐锦线”的设计以及 220kV 和长江大跨越的设计等一些技术含量较高的设计内容,但就设计队伍的培养及设计技术人员基本功来讲,仍属于发展起步阶段。

1966 年至 1976 年,我国处于“十年文革”时期,在此期间,虽建成了 330kV 刘天关线路,但从整体来讲,国民经济面临崩溃的边缘,各项建设基本处于停顿状态。在这种状态下,就根本谈不上送电设计技术之发展了。

1976 年“四人帮”倒台,国家进行了拨乱反正,工程设计,科学研究以及技术、计划管理慢慢走上了正轨。尤其是十一届三中全会以后,我国社会主义建设逐步步入了快速发展的轨道。至此,送电线路设计进入了改革开放赶上世界水平阶段。在此阶段的初期,开始了 500kV 线路的建设,之后,出现了我国第一条 $\pm 500 \text{kV}$ 葛上线直流输电线路。随着长江葛洲坝及三峡水电站的修建,我国 500kV 电网迅速扩展,数条 $\pm 500 \text{kV}$ 直流输电线路也相继建成,与此相伴的各项科学研究也得以蓬勃开展并取得较多成效。截至 2005 年底,我国又建成了第一条 750kV 线路。至此,我国送电线路建设的发展水平已与大多数世界较发达国家的水平相适应。数十年由于各种政治因素干扰造成的我国电网发展的落

后局面从此成为历史。

从 2005 年开始,进入超越世界水平阶段,以 1000kV 交流输电与 $\pm 800\text{kV}$ 直流输电为标志。

在此期间,对送电线路设计值得提及的尚有两件大事:

其一,就是设计手段的更新,这主要表现在 20 世纪 80 年代后期,随着计算机的引进,使送电设计开始进入了计算机应用的设计时代。从 80 年代后期至 90 年代末,历经约 10 年时间,送电线路设计的各种软件相继投入了使用,从而使设计甩掉了图板、计算尺,进入了全新的 CAD 时代。我国送电设计应用计算机软件的一个突出特点就是,绝大部分计算机软件都是我国送电设计人员自行开发的,而且有的设计软件,如铁塔计算软件及定位优化软件等可与国际相应的知名软件相媲美。

其二,就是在此期间,我国送电线路设计开始走向了国际。有不少设计单位参与了国外工程的投标,承揽了不少国外工程,其范围主要涉及中东、东南亚等一些发展中国家。参与国外工程投标、设计,加强了国际交流,开阔了我国设计人员的眼界,进一步提高了我国设计人员的设计水平。

2. 送电设计工序之变革

20 世纪 50 年代初期,学习前苏联经验,我国送电线路设计工序采用三段设计,即:初步设计、技术设计及施工图设计。

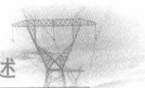
初步设计的内业设计深度及协议工作与现行做法相差不大,但外业部分则与现行做法相差较为悬殊。当时,外业工作分两个阶段,第一阶段,即现场踏勘阶段,其工作内容与现行做法相同。由负责工程师(即现在的设计总工程师)带领电气、土建、测量、地质、水文(必要时)人员到现场对特殊地段、障碍物较多地段以及本工程典型地段进行现场踏勘并补充收集有关障碍物及协议资料。现场踏勘完成后,修正路径方案,然后进行第二阶段,即现场勘测。现场勘测由负责工程师带领各专业人员到现场进行路径方案的选择,并用经纬仪及测量用的红白旗(插在竹竿上)将所选路径走向定在地面上,地质专业人员必要时尚应进行必要的勘探(如槽探)。至此即完成了初步设计阶段现场的整个选线任务。

技术设计阶段对外业来讲则主要进行定线及断面测量工作。这就要求设计及勘测人员根据初设阶段选定的路径方案(以现场插的红白旗所显示的路径为准)用经纬仪把路径走向精确地确定下来,然后再测断面,与此同时,地质及水文人员则进行更深的勘测、调查工作。技术设计的内业工作则主要是针对初设遗留问题及审核意见需变动之处进行修改、完善。

施工图阶段则首先是根据技术设计提供的断面图进行室内排塔位的工作。室内排位完成后进行现场交桩(向施工单位交桩)。现场交桩完成后返院进行排位修正,正式交出塔位明细表与断面图。与此同时,杆塔、基础施工图及机电施工图等也在此阶段完成。

以上就是 1952~1959 年期间我国送电工程三段设计各阶段的工作内容。

经过 1958 年大跃进的不断改革,从 1960 年开始,国内各设计单位陆续由三段设计改为两段设计,即初步设计、施工图设计。改为两段设计后,初步设计阶段对路径则只完成现场踏勘,不进行用红白旗插旗选线,而具体的路径选线、定线则与测断面一起在施工图



阶段完成。

当时,由三段设计改为两段设计,简化了设计工序,缩短了设计周期,但这种简化并不是简单的压缩、合并,而是伴随着设计方法的革命来实现的,其核心就是实行“现场设计”,即将选线、定线、测断面、排位和交桩合为一个设计阶段一并于现场(野外)完成。与此同时,尚约请施工及运行人员参加,对路径及塔位提出意见和建议,实行所谓的“设计、施工、运行”三结合。这种在现场(野外)实行“现场设计”的方法,有利于增强设计人员的实践观念,有利于弥补设计人员施工及运行经验之不足,因而有利于工程设计质量的提高,但其缺点也是较为明显的,那就是在现场边测断面、边定位,设计人员在排塔位时缺乏整体(即几公里范围内各塔位相互关系)观念,因此,往往造成某些塔位定得不合理,或出现较多的方案不经济的情况。有鉴于这些缺点的存在,后来已改为现场旅馆定位的方法。所谓“现场旅馆定位”,就是先测断面,当断面测出一定长度(如5~10km或更长)后,由设计人员在现场的旅馆驻地,在室内把塔位排好,然后再到现场(野外)交桩。采用这种方法后,基本上避免了上述排位不合理的现象。目前有的设计单位也采用了现场定线,测断面完成后即返院进行室内排位,然后再到现场进行塔位交桩。不管是“现场旅馆定位”抑或是“返院室内定位”,其优缺点均基本相同,只要进行现场交桩就可解决塔位与现场情况不相符合的问题。

由以上所述可以看出,自1960年以来,我国送电线路设计已改为两段设计,但随着国民经济的发展及设计的不断改革,在设计工序及各阶段内容深度方面则在不断变化,主要表现在以下几方面:

(1) 2004年国家发改委要求:在项目投资的前期工作阶段需较准确地估算投资;在项目立项申请中,必须提供相关的环境影响、水土保持、地质灾害、地震安全、文物、压覆矿产等专项评价报告,这就要求,在可研阶段就应将线路路径方案做深、做透,能提出确切的路径方案。为此,应当在初步设计阶段进行的路径收资及协议工作,以及路径现场踏勘工作必须提前在可研阶段完成。基于这种情况,有些工程在可研阶段,同时开展了工程项目的初步设计预选线工作。这就导致了设计工序的一些变化。

(2) 随着我国城乡建设的飞速发展及各项工程的不断突建,为线路路径方案的确定带来了较大困难。有不少线路路径,由于初设阶段协议深度不够或遗漏协议对象,往往造成线路路径的大量返工。这就要求在初设阶段就应把路径协议做深、做透,如一些乡镇协议,以前一般在施工图阶段完成,而现在则必须在初设阶段即需确定。

(3) 必须在施工图阶段做好路径协议复查工作,这是当前形势发展的新特点。以往工程,一般在初步设计路径协议完成后即可长期有效,而现在,有的工程即使初设路径方案已签订了协议,在施工图阶段则又予以否认,尤其是乡镇地方性协议,这一情况更为突出,这就为设计工作带来了新的要求。

(4) 自实行两段设计以来,仅在初步设计完成后,由业主组织有关单位(或由上级主审单位)对初步设计进行审查,在施工图阶段则不再对设计进行审查,仅有设计单位对施工单位进行施工图交底的一道工序。实际上,有不少具体的设计方案是在施工图阶段才确定的。为了切实有效地对工程设计进行管理,国家电网公司于2005年开始,对一些工程进行了施工图设计的评审。实践证明,增加这一评审工序是恰当的。

3. 送电设计技术的发展

送电勘测设计能力的全面提高,主要体现在勘测设计手段、方法、设计技术和水平等方面。早在 1977 年,国内就编制了用于铁塔设计并适用于中型计算机的《矩阵变形法空间桁架程序》。20 世纪 80 年代后期,微机进入了勘测设计的各个领域,随着应用软件的大量开发,设计基本实现了计算机化。到 90 年代末,除个别设计院采用部分引进的国外软件外,绝大多数设计单位使用由国内自行开发的微机软件,这是因为,国内开发的软件水平普遍很高,有的已达到或超过国外一些知名软件的水平。

90 年代初,随着全球定位系统(GPS)在送电工程中的应用,推动了航测技术进一步发展。各大院在超高压送电线路工程的路径选择中,采用卫片、航片,全数字化摄影测量系统和 GPS 等高科技手段选线和优化路径等技术,得到很大发展。在此基础上,配合使用计算机排位软件优选路径方案也得到推广应用。

90 年代末,《送电线路工程设计方案决策软件》(以下简称“决策软件”)的编制完成和在工程中的成功试用,进一步发展了送电设计的技术手段。配合“决策软件”的应用,送电勘测设计又引进了由美国海拉瓦博士研制的全数字化摄影测量技术即“海拉瓦技术”。“海拉瓦技术”与“决策软件”在工程中结合应用,从路径方案优选及杆塔系列规划等综合效益来看,可节约工程投资 5%左右,同时还少拆民房,少砍树木,少占良田,减少动迁,并减轻勘测设计人员的劳动强度,具有显著的经济、社会和环保效益。

促使送电设计技术更大飞跃的另一个因素,是围绕 500kV 电压等级线路的出现,所展开的设备与技术的实验研究工作。在 500kV 线路建设之初,各有关设计与国内科研、制造单位密切合作,针对 500kV 线路的过电压倍数、绝缘配合、静电感应、无线电干扰、杆塔结构以及金具和绝缘子设计等问题进行了大量的试验研究,并取得了 150 多项科研成果。以 500kV 铁塔研究为例,当时,仅塔型就设计了拉 V 塔、内拉门塔、外拉门塔、自立式酒杯塔、悬垂转角塔以及各种换位塔、耐张塔、终端塔等不下 10 余种,经过真型试验,这些塔种按各自的特点,均在 500kV 线路中得到了广泛应用。进入 90 年代,经对铁塔设计进一步的改进,降低了单基铁塔的耗钢量,取得了显著的经济效益。铁塔设计中的一系列重大改进,使中国的铁塔设计水平进入了世界先进行列。而大量科技成果应用于工程设计,则促进了送电设计整体水平的提高。

在对交流 500kV 送电线路不断完善的同时,以舟山±100kV 直流线路已有成果为基础,并结合葛上±500kV 直流输电线路的建设,就直流输电方面的绝缘配合、电晕、无线电干扰及地面场强等技术进行了研究,这些研究成果填补了中国直流输电技术的空白,使中国在直流输电设计技术方面也达到了世界先进水平。

能够充分体现中国送电设计技术水平的另一显著标志就是跨越大江、大河的大跨越(指档距超过 1000m,塔高超过 100m 的跨越)设计。1992 年建成的 500kV 南京大胜关长江大跨越,跨越档距 2070m,跨越总长 3070m,跨越塔高 257m,为混凝土和钢结构混合塔,该塔是当时世界上最高的采用钢筋混凝土结构的送电跨越塔。截至 1999 年底仍在设计中的 500kV 江阴长江大跨越,主跨档 2303m,双回路塔高 346.5m,是设计中的世界上最大的送电跨越工程。

随送电线路建设项目的日益增多,线路走廊占地问题日益突出。为此,在砍树、拆迁

费用较高地区采用了 500kV 同塔双回路设计,与此同时,开展了紧凑型输电技术的研究和工业性试验研究。经过几年的努力,取得了大量研究成果,并建成了两条 220kV 紧凑型工业性试验线路,即华北地区的安廊线和湖北省的公石线。紧凑型线路通过改变相线排列方式和紧缩相间距离等措施,可明显压缩走廊宽度,提高自然输送功率,具有显著的社会、经济效益。

改革开放以后,国内电力设计单位通过参与国外工程的投标,逐步学习并掌握了欧、美国家的送电设计标准,并成功地运用于实践。如 1978 年在印度尼西亚 500kV 线路投标工程中,中国设计单位提出的铁塔设计指标与英国、法国等国有关知名公司所提出的指标完全一致。再如,在 1999 年菲律宾一条 500kV 送电线路工程国际投标中,中国设计单位所提供的技术材料指标领先于国外竞争者。由此两例即可说明,中国设计单位在利用欧、美设计标准进行送电线路设计方面,已达到与欧、美发达国家相当的水平。

4. 变电设计技术的发展

改革开放以后,变电设计技术发展迅速。1981 年建成 500kV 双河、凤凰山变电站;1987 年建成 ± 100 kV 舟山直流换流站;1990 年建成 ± 500 kV 宋家坝、南桥直流换流站。截至 1998 年底,全国投产的 220kV 及以上电压等级变电容量超过 3 亿 $\text{kV} \cdot \text{A}$ 。中国变电设计技术,特别是超高压变电站设计技术的发展速度在世界上是罕见的。

中国超高压变电站设计的发展经历了四个阶段。

第一阶段,1978 年至 1985 年。该阶段的主要工作成就是:研究制定超高压变电站技术政策;研究制订超高压变电站主要技术原则;确定一系列超高压变电站设计科研项目;编制超高压变电站主要设备基本技术条件及设备研制计划;编制超高压变电站设计技术暂行规定;编译世界各国超高压变电站有关设计及设备等方面的资料;有计划有组织地培训设计人员等。各设计院采取边学习、边设计、边研究、边总结的方式,逐步熟悉和掌握了超高压变电设计技术。通过开展设计基础科研,并及时总结经验,给处在成长过程中的超高压变电设计奠定了基础,也为超高压变电设计技术走向成熟铺平了道路。该阶段共新建超高压变电所 23 项,总容量 1415.3 万 $\text{kV} \cdot \text{A}$ 。

第二阶段,1986 年至 1995 年。在该阶段,超高压变电站设计技术有了飞速的发展,同时,在改革开放的形势下,变电设计开始走向世界。该阶段的主要工作:组织了对国外超高压变电站的考察;结合天广工程开展了超高压变电所中日联合设计;按国产设备编制了超高压变电站通用设计;掌握了电气设备标书的编制和技术谈判规则;组织修订了变电站设计技术规程;组织新编了变电站计算机监测设计技术、初步设计内容深度及审查细则等规程、规定;首次开展了 ± 500 kV 葛上直流输电工程换流站的初步设计;参与了世界银行对徐上工程的后评估;组织了大量的变电工程初步设计审查、工程管理、技术管理工作等。这一阶段工程项目较多,共新建项目 41 项,总容量 3105.6 万 $\text{kV} \cdot \text{A}$;扩建项目 23 项,总容量 640.3 万 $\text{kV} \cdot \text{A}$ 。该阶段项目内容新、难度大,通过工程实践,积累了大量的经验,虽然还存在一些不足,但总的来说已进入成熟阶段。该阶段的突出特点是,通过归纳分析各种新问题,不断总结新经验,在节约用地、控制工程造价、提高自动化水平、采用新技术新设备及新材料、加强设计管理等方面提出了措施和建议,有效地指导并促进了超高压变电站设计技术的发展。