



TEGAOYA JIAOZHILIU SHUDIAN BAOHU
YU KONGZHI JISHU

贺家李 李永丽 李 斌 编著
翟永昌 郭文利

特高压 交直流输电保护 与控制技术



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



TEGAOYA JIAOZHILIU SHUDIAN BAOHU
YU KONGZHI JISHU

贺家李 李永丽 李 斌 编著
翟永昌 郭文利

特高压 交直流输电保护 与控制技术



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书在介绍特高压交直流输电基础知识的基础上,着重对特高压交、直流输电线路保护与控制问题进行了阐述。分析了苏联特高压线路的设计、运行经验,阐述了不受分布电容和线路分布参数影响的基于贝瑞隆模型的分相电流差动保护、分相电流相位差动保护、距离保护、自适应自动重合闸等新的保护和控制原理,填补了特高压交直流输电控制与保护理论和技术的空白。

本书可供继电保护专业人员学习参考,也可作为高等学校电力专业的选修课教材。

图书在版编目(CIP)数据

特高压交直流输电保护与控制技术 / 贺家李等编著. —北京:
中国电力出版社, 2014.9
ISBN 978-7-5123-5565-1

I. ①特… II. ①贺… III. ①特高压输电—直流输电
线路—电流保护装置②特高压输电—交流电路—电流保护
装置 IV. ①TM723

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 032079 号

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>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 9 月第一版 2014 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.25 印张 293 千字

印数 0001—2000 册 定价 56.00 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

前言

《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006～2020 年）》重点研究领域中明确指出“重点研究开发大容量远距离直流输电技术和特高压交流输电技术与装备”。“十二五”规划中提出要建设 1000kV 特高压交流骨干网架和多条±800kV 的特高压直流输电线路。2020 年前后，中国将形成以三华电网为核心的交流特高压双环网，联结各大区域电网、大煤电基地、大水电基地和主要负荷中心。与超高压输电线路相比，特高压交、直流输电线路在设计、施工、运行等方面存在很多难题，具体表现在：

- （1）电压等级高、输送容量大，输电线路实现跨地区、跨流域远距离输电；
- （2）输电线路参数呈现明显的分布参数特性，线路电容电流及其影响特别突出；
- （3）故障暂态特征复杂，潜供电流大，故障熄弧时间长；
- （4）过电压问题严重，包括操作过电压、故障过电压以及重合过电压等；
- （5）超强的电场强度、磁场强度及无线电干扰；
- （6）有多条交直流特高压输电线路联合输电时，容易发生谐波含量增大、无功不足、电压失稳。

以上问题不仅对电力系统中线路和变电设备的安全运行造成严重威胁，也严重影响继电保护和自动控制装置的正确工作，同时特高压输电系统电磁场对周围生态环境的影响也是关系民生的重要议题。

本书作者从 2002 年初在国内率先开展了特高压输电系统继电保护与控制的研究。首先承担了教育部外国专家局的引智项目，从莫斯科动力工程学院邀请著名教授来华，并开展为期半年的特高压输电技术研讨工作。期间，分析了世界上唯一一条实际运行了 6 年的苏联特高压输电线路的设计和运行经验及其保护和控制技术。在此基础上，作者研究提出了几种新的不受分布电容和分布参数影响的保护原理，有的已制成装置，成功用于我国第一条 1000kV 特高压输电线路。作者开展的项目“超/特高压电网继电保护新技术的研究与应用”获得 2010 年度天津市技术发明一等奖。

关于特高压交直流输电的保护和控制难题和新技术，在现有的教科书和科技书中尚

缺少系统深入的阐述和分析。而对这些新理论、新技术的了解对于从事特高压交直流输电线路设计、运行、科研和教学的人员是不可缺少的。本书编写的宗旨即是希望填补这个空白。

本书是作者几年来在这个领域的研究成果和教学经验的结晶。书中对苏联特高压线路设计、运行经验进行了介绍和分析，详细阐述了不受分布电容和线路分布参数影响的基于贝瑞隆模型的分相电流差动保护、分相电流相位差动保护、距离保护、自适应自动重合闸等新的保护和控制原理，并讲解了特高压直流输电的故障分析以及保护与控制原理。

本书交流输电部分的第1~7章和第12章由贺家李编写，其中关于日本特高压输电线路部分由郭文利编写，此外郭文利还做了很多编辑和整理的工作；第8~11章由李斌编写。直流输电部分由李永丽和翟永昌编写。贺家李和李永丽分别对交流部分和直流部分进行了统稿和审订。由于作者水平所限，书中难免有疏漏或错误之处，希望读者不吝赐教。

编 者

2014年3月

目 录

前言

第一篇 特高压交流输电保护与控制

第一章 概论	3
第一节 特高压交流输电的发展历程	3
第二节 中国建设发展特高压交流输电的必要性	9
第二章 特高压交流输电线的结构	12
第一节 特高压交流输电线的结构参数	12
第二节 输电线下电场强度的计算和允许的地面最大电场强度	13
第三节 特高压交流输电线的工频磁场	20
第四节 对高压输电线下工频电磁场和无线电干扰的限值	22
第三章 特高压交流输电线的参数	25
第一节 分布电容、分布电感和电阻的计算	25
第二节 分布参数的优化	27
第三节 杆塔型式的选择	31
第四章 特高压交流输电线继电保护配置	37
第一节 特高压交流输电线继电保护配置方案的要求和原则	37
第二节 特高压交流输电线主保护、后备保护、通信通道类型的选择	40
第五章 用于特高压交流输电线的成套负序、零序方向纵联保护	43
第一节 主保护的配置	43
第二节 零序电流方向保护的作用原理和动作行为分析	50
第三节 重合闸的配置方式	53
第四节 对本保护的评价	54
第六章 分相电流差动保护	55
第一节 交流输电线的贝瑞隆模型	56
第二节 保护的動作判据	58
第三节 中段带并联电抗器的特高压长线路分相电流差动保护	59

第七章 特高压变压器和并联电抗器的继电保护	62
第一节 特高压变压器的结构特点	62
第二节 特高压变压器的保护配置	63
第三节 特高压变压器的分布式保护方案	65
第四节 特高压变压器分布式保护的具体接线和整定	67
第五节 特高压并联电抗器的匝间短路保护	71
第六节 大容量变压器的快速阻抗保护	74
第八章 特高压交流长线路的距离保护	76
第一节 特高压交流长线路电容电流对传统距离保护的影响	76
第二节 特高压交流长线路分布参数特性	79
第三节 适用于特高压交流长线路的距离保护	80
第九章 特高压交流输电线路的过电压问题	86
第一节 概述	86
第二节 特高压交流输电线路过电压的特点及操作类型	89
第三节 苏联对特高压交流输电线路过电压的研究情况	90
第十章 特高压交流输电线路重合闸的应用	94
第一节 特高压交流输电线路的工频电压升高	94
第二节 特高压交流输电线路的重合过电压	97
第三节 潜供电弧与恢复电压	100
第四节 自适应重合闸原理及应用	102
第十一章 特高压双回线的不平衡电流及其影响	105
第一节 同塔双回线的不平衡度及其模型	105
第二节 同塔双回线不平衡电流的分析	107
第三节 不平衡环流对保护影响的实例及仿真分析	114
第十二章 特高压交流输电的现状和展望	117
第一节 国内外同步联网的发展情况	117
第二节 我国第一条 1000kV 特高压交流输电线经济效益和技术成就	119
参考文献	124

第二篇 特高压直流输电保护与控制

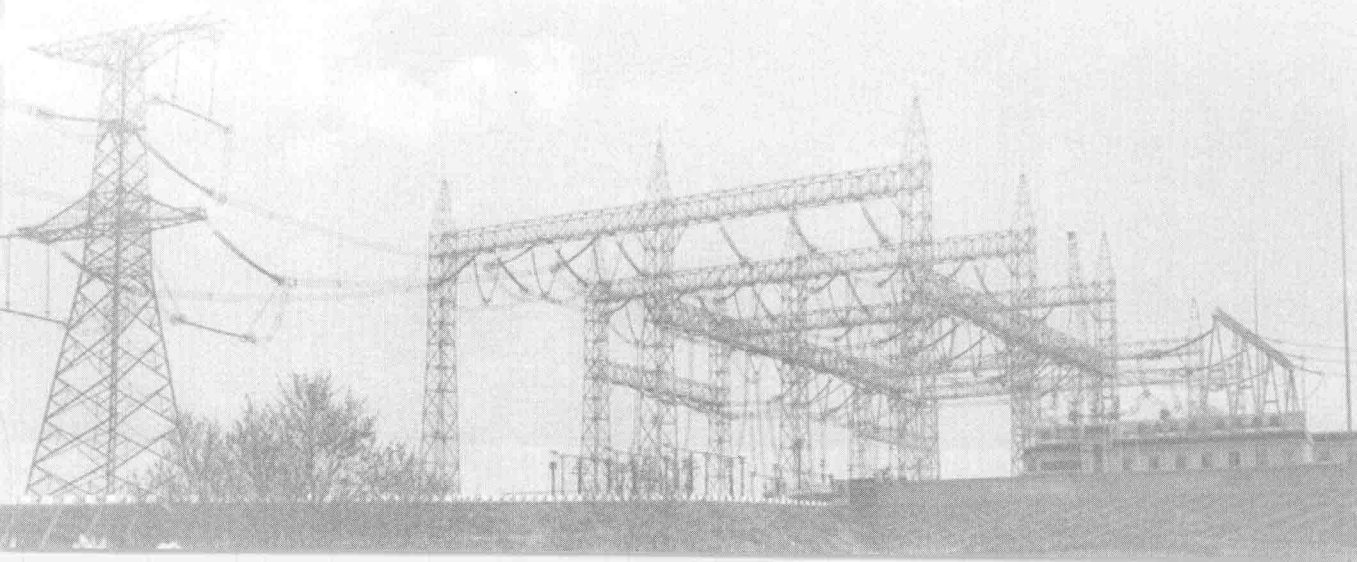
第一章 概论	129
第一节 高压直流输电系统的构成	129
第二节 直流输电系统的运行方式	132
第三节 高压直流输电系统的故障类型及特征	137
第二章 特高压直流输电系统运行方式	142
第一节 特高压直流输电特点	142

第二节	特高压直流输电工程换流器的结构	143
第三节	特高压直流输电系统主设备接线	144
第四节	特高压直流输电系统运行方式分类	145
第三章	特高压直流输电控制系统	159
第一节	直流输电控制原理	159
第二节	特高压直流输电系统的控制系统	164
第四章	特高压直流换流站保护系统	177
第一节	特高压直流系统保护区域划分	178
第二节	特高压直流系统的保护原理	180
第三节	换流站直流系统保护配置	181
第四节	保护接口系统	191
第五节	500kV 交流系统保护	191
第五章	测量系统	196
第一节	换流站测量系统	196
第二节	测量信号处理	196
第三节	事件顺序记录系统 (SER)	197
第四节	接地极线路监视系统	197
第五节	工作站	198
参考文献		199
索引		200

特高压交直流输电保护与控制技术

第一篇

特高压交流输电 保护与控制



天恩降詔臣等謹將聖旨錄奏

第一集

中聯黨友通訊

附錄

概 论

第一节 特高压交流输电的发展历程

20 世纪 60 年代,一些工业发达国家和电力大国如苏联、美国、加拿大、巴西、委内瑞拉等,由于工业发展和人民生活水平的提高,电力需求快速增长,同时由于这些国家地域辽阔,能源产地(主要是水电资源)与负荷中心较远,400~500kV 输电线路不能满足长距离、大容量电能传输的需要,因而纷纷开始研究设计更高一级的超高压输电线路,即 735、750、765、800kV 输电线路。苏联于 1963 年投入运行第一条考那可夫—莫斯科的 90km 750kV 试验/商用输电线路^[1],该线路降压运行 4 年,于 1967 年按 750kV 正式运行^[2]。后又建成顿巴斯—弟聂伯—文尼察—西乌克兰的长 1118km 的 750 kV 线路和列宁格勒—考那可夫的 525km 750kV 线路^[2,3]。1970 年建成连接苏联全国统一电力系统和东欧电力系统的西乌克兰—阿尔百特尔沙(匈牙利)的 479km 750kV 输电线^[4],以及向波兰、保加利亚送电的 750kV 输电线,形成了东欧 750kV 的网架。图 1-1-1 为顿巴斯—西乌克兰 750kV 线路接线图,图中并联电抗器的中性点接地电阻用于在线路跳闸后迅速将线路上存留的能量消耗掉,以减小快速重合闸时的过电压;与电抗器并联的放电间隙和避雷器用以防止过高的操作过电压和雷电过电压。

图 1-1-2 为乌克兰到罗马尼亚、匈牙利、捷克斯洛伐克和波兰的 750kV 线路。通过这个系统与俄罗斯系统连接。这个系统共有 15 条 750kV 线路,长度为 120~500km。

加拿大魁北克水电局(Hydro Quebec)于 1965 年建成投运第一条 735kV 输电线^[5],到 1986 年已建成约有 21 条 735kV 线路的系统^[6],其中大多为双回线,如图 1-1-3(a)所示。为了提高线路的输送容量和系统稳定,在这些线路上都装设了串联补偿电容器^[7],共装设 37 组串补电容器,总补偿容量达到 15000 Mvar,如图 1-1-3(b)所示。

美国 1966 年批准了在 AEP(American Electric Power Service Company)系统建设 765kV 输电线。1969 年 2 月第一条 765kV 输电线投入运行。到 1973 年建成了 10 条总长度约为 1760km 的 765kV 线路,其系统接线如图 1-1-4 所示^[8,25]。目前 AEP 的 765kV 线路总长度已达约 3000km,其它电力系统也有 765kV 线路。

巴西和巴拉圭合建的伊泰普水电站有 18 台 700MW 的机组,总容量达 12600MW,1985 年投入运行。其中,9 台机组为 60Hz,通过 3 条各约 900km 的 750kV 输电线送电给巴西首都和圣保罗地区负荷中心;另外 9 台机组为 50Hz,通过 3 条 750kV 输电线送电给巴拉圭负荷中心,各长约 570km。这些 750kV 线路大都有串联电容补偿,如图 1-1-5 所示,在

1985~1990 年间建成投运^[9]。此外，还有±500kV 的直流输电线，连接 50Hz 系统和 60Hz 系统。

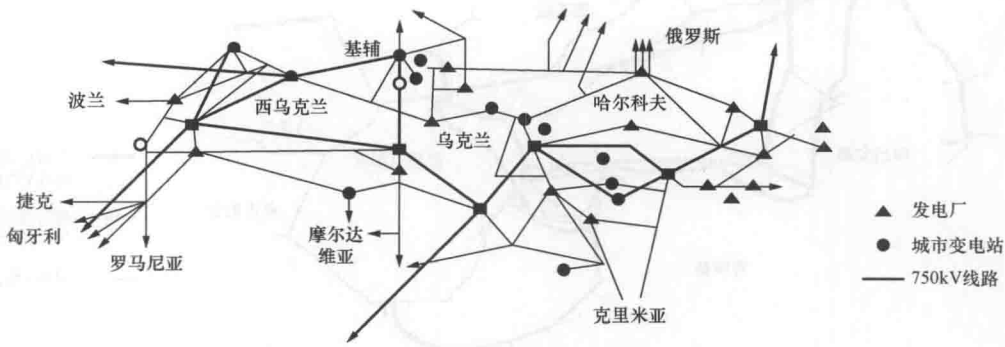


图 1-1-2 乌克兰 1994 年的 750kV 系统接线图

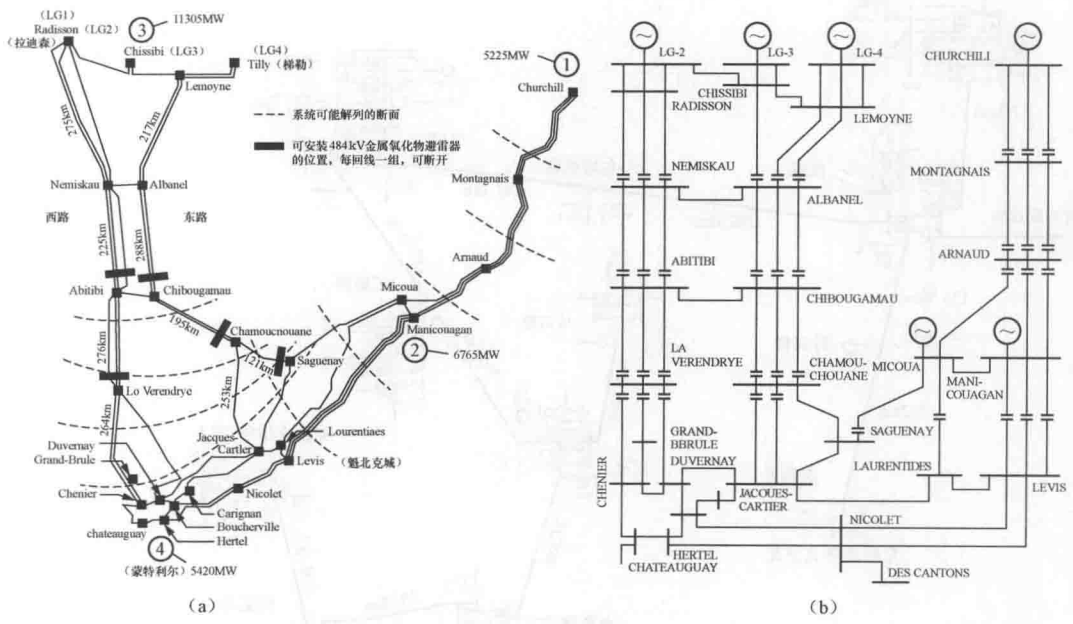


图 1-1-3 加拿大魁北克水电局 735kV 输电系统接线图

(a) 1986 年系统图；(b) 1992 年接线图

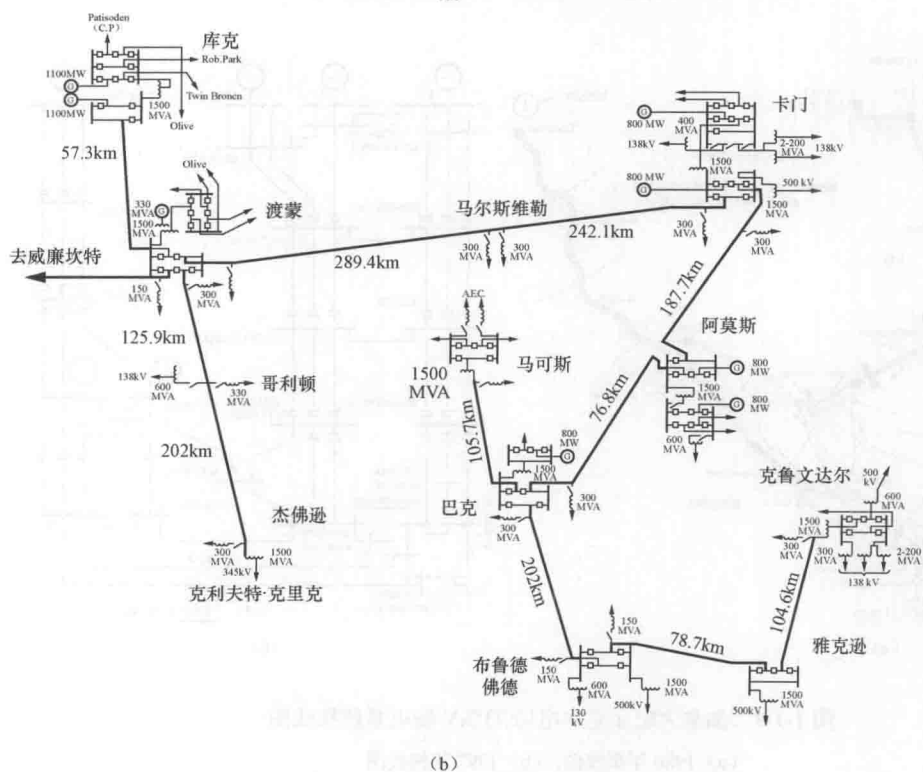
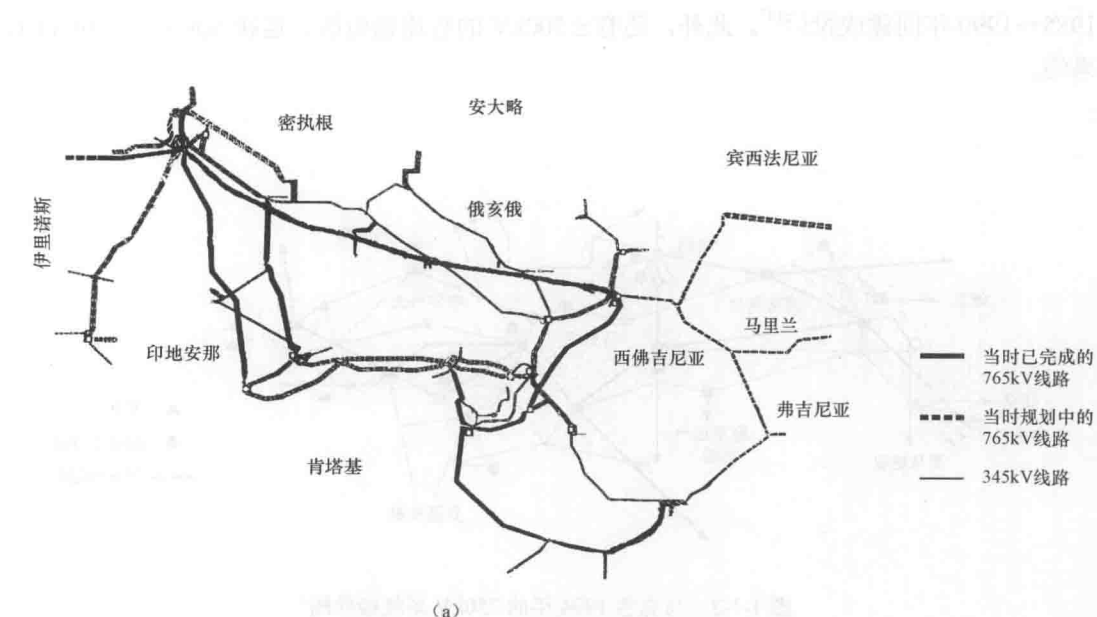


图 1-1-4 美国 AEP 系统 1973 年的 765kV 系统接线图

(a) 地理分布图; (b) 系统单线图



(a) 水电站接线图; (b) 系统单线图

除了上述几个建设 750kV 线路较早的国家外,目前已建成 750kV 输电线的还有中国、印度、韩国、日本、南非等国。各国在建设 750kV 线路之前对 750kV 线路设计中的很多技术问题、设备问题以及 750kV 线路的电晕引起的无线电干扰、对地面生物可能产生的影响等问题进行了长期的研究,得到了重要的科学结论,因此可以说 750kV 输电线的技术都已成熟和完善,并具有丰富的运行经验,这些科研成果和运行经验都为特高压输电的研究打下了基础。

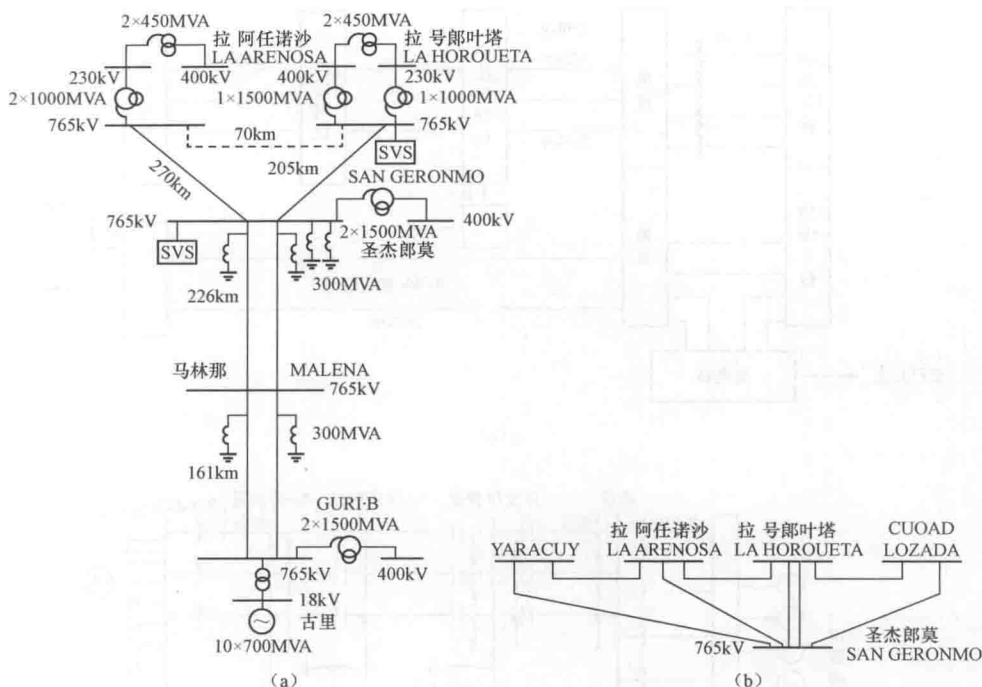


图 1-1-6 委内瑞拉 765 kV 系统

(a) 1990 年第一期线路接线图；(b) 第二期 765 kV 线路工程接线图

从 20 世纪 70 年代开始，一些工业发达国家如美国、苏联、加拿大、日本和意大利等就已感觉到由于电力负荷的快速增长，750kV 输电线将很快不能满足长距离大容量电能输送的需要，必须向更高一级电压的输电方向发展，开展了 1000~1500kV 输电技术的研究^[1]。1975~1978 年，苏联和美国联合成立了美苏能源合作委员会（Joint America-Soviet Committee On Cooperation In The Field of Energy），在特高压输电技术研究方面进行合作，推动了这一技术的发展进程。

1975 年，美苏能源合作委员会在美国华盛顿和 1978 年在苏联的塔什干举行了两次超高压交流输电讨论会^[12]。1975 年的讨论会主要交流了 750~1150kV 线路的研究成果，包括 750~1150kV 输电设备的各种结构型式、750~1150kV 线路设计的主要参数、电场强度的测量方法、操作过电压和雷电过电压的保护原理和方法、750~1150kV 线路的绝缘距离、变电站绝缘和环境保护、特高压输电线的负载条件和标准、导线、避雷线、杆塔及其基础应力的计算、导线结冰和风力负荷、导线舞动和振动、分裂导线的振动、电晕及其对无线电干扰等问题，几乎涉及特高压输电的所有问题。1978 年的讨论会则主要集中在对 1100~1200kV 输电线的各种问题的研究，包括：将 1200kV 线路过电压限制在 1.3、1.5 和 1.8 倍额定电压的措施，1200kV 输电线单相故障切除引起过电压的保护措施，1100kV（最大电压 1200kV）线路有功和无功调整的方法，1200kV 杆塔、绝缘子和空气间隙的长期绝缘强度，考虑到环境保护、最少材料消耗、减小电气距离和线路走廊条件下 1200kV 输电线的

杆塔设计,工频电磁场对生物的影响等研究成果。

1990年,在印度召开了800kV系统的规划、设计、运行经验国际讨论会,会上也提出了很多特高压交流输电的研究成果^[10]。

苏联于20世纪60年代在西伯利亚地区安卡拉河流上建设450MW的布拉茨格大水电站,70年代在克拉斯诺雅尔斯克建设火力发电厂群。为了将这些电力输送到乌拉尔重工业基地和欧洲负荷中心,80年代建设起始于西伯利亚的伊塔特经440km到巴尔瑙尔,再经693km到哈萨克斯坦的埃基巴斯图兹、再经494km到科克切塔夫、再经396km到库斯塔奈,再经321km到乌拉尔的车里雅宾斯克的1150kV输电线路,全长2500km。可输送6000MW功率。其中从巴尔瑙尔到埃基巴斯图兹一段长693km,在当前仍是世界上最长的特高压线段,其继电保护和过电压控制的经验仍值得借鉴。这条输电线路同时也是西伯利亚、哈萨克斯坦、乌拉尔3个电力系统的联络线。从1985年8月投入运行到1992年1月1日由于苏联解体而降压,共运行了6年多。这是世界上最早的一条经过长期实际运行考验的特高压输电线,如图1-1-7所示。



图 1-1-7 苏联 1150kV 特高压线路接线图

日本国土面积狭小,负荷密度很大,节约输电走廊、限制系统短路容量、提高系统稳定性是日本研究发展1000kV特高压输变电系统的主要目的。日本研究人员通过考察世界各国对特高压输电研究试验的情况,结合日本国情确定800kV、1100kV、1200kV和1500kV四个电压等级作为比较方案。综合考虑远近结合、系统结构、建设成本、运行费用以及对环境影响等因素^[13],经过全面的比较论证,确定在东京电网建设额定电压为1000kV、最高电压为1100kV的特高压输电系统。到目前为止,东京电力公司总共建设了4条1000kV输电线路,主要目的是将福岛和柏崎刈羽地区电厂的电能送到东京地区外围的500kV网络上。

除了苏、日、美之外,加拿大、法国、意大利、印度等国也都进行了1000~1200kV输电线各种问题的研究,建立了试验线路,因此在1000~1200kV交流输电技术方面也有很多成熟的经验。

第二节 中国建设发展特高压交流输电的必要性

一、远距离输送电能的需要

中国煤炭资源集中在山西、陕西、内蒙古西部,水力资源集中在西南和西北,而负荷