



国际电气工程先进技术译丛

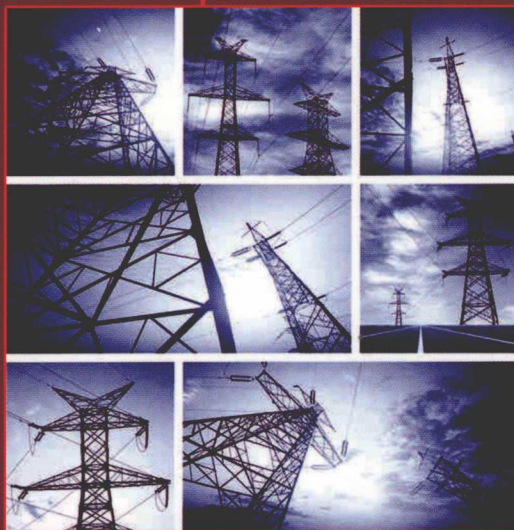
超高压远距离输电

(俄) Ю. П. РЫЖОВ 著

王承民 姜松涛 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



014041583

TM722
02

国际电气工程先进技术译丛

超高压远距离输电

(俄) Ю. П. Рыжов 著

王承民 姜松涛 译



北航

C1724759



机械工业出版社

TM 722

02

本书主要阐述现代电力系统中超高压远距离输电的相关内容,包括超高压交流输电、柔性交流输电和超高压直流输电3部分。全书共分12章。第1章总体介绍了超高压输电技术的发展历史、现状、特性以及实现方式等。第2~4章阐述和分析了超高压输电线路的基本参数、特性及其等效电路。第5章讨论了不同补偿方式下超高压输电线路上的电压和无功功率分布情况。第6章对超高压输电在正常和事故后运行方式下的状态和损耗进行分析计算。第7章讨论了超高压输电线路的单向连接状态。第8章介绍了提高超高压线路输电能力的措施。第9章阐述柔性交流输电的基本原理。第10~12章讨论了超高压直流输电的基本原理。

本书可作为高等院校电力系统专业高年级本科生及研究生的教材,也可作为从事电力工程的科研技术人员的参考用书。

Copyright@ 2011 by Ю. П. Рыжов.

All rights reserved. No Part of this book may be reproduced by any means whatsoever without written permission from the Publisher.

The Chinese edition Copyright @ 2014 by China Machine Press.

本书简体中文版授权机械工业出版社独家出版,未经出版者书面许可,本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。

版权所有,侵权必究。

本书北京市版权局著作权合同登记:图字01-2012-4222号

图书在版编目(CIP)数据

超高压远距离输电/(俄罗斯)雷日奥夫著;王承民,姜松涛译.

—北京:机械工业出版社,2013.12

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文:Extra high voltage and long distance power transmission

ISBN 978-7-111-44728-3

I. ①超… II. ①雷…②王…③姜… III. ①超高压-长线路-输电
IV. ①TM722

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第267763号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:赵玲丽 责任编辑:赵玲丽 版式设计:霍永明

责任校对:张晓蓉 封面设计:赵颖喆 责任印制:李洋

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2014年4月第1版第1次印刷

169mm×239mm·18.25印张·414千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-44728-3

定价:80.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

译者序

电力工业为国民经济各部门提供基本的动力，其发展程度是衡量一个地区经济社会发展水平的关键性指标之一。由电能的生产、输送和消费环节构成的电力系统是当今世界分布范围最广的人造复杂系统。而对电力系统运行的基本要求包括：安全性、优质性和经济性等几个方面。输电系统是电力系统的中间环节，也是其最重要组成部分之一。对输电系统的规划、设计、建设和运行需要考虑其安全性、可靠性、经济性和扩展性等多方面要求。

我国幅员辽阔，但资源分布不均：西部地区水电、火电资源相对充裕，但负荷需求总体较小；东部地区用于发电的一次能源分布相对较少，但负荷集中、而且总体需求较大。因而，实施西电东送，进一步地实施远距离输电是十分必要的。为此，我国已经建设了多条超高压（乃至特高压）远距离输电线路，已经基本形成了全国联网的统一互联电力系统。这将使得不同区域的资源能够相互补充、通过事故时互相支援来减少总的备用容量等，从而提高电网的经济性和稳定性。此外，超高压远距离输电线路作为电网的骨架，是连接各个区域性电力系统的主干线，其意义十分重大。

现代电力系统中的超高压输电技术除包含传统的超高压交流输电外，还包含后来发展起来的柔性交流输电技术和超高压直流输电技术。超高压交流输电的发展呈现出电压等级不断提高、输电能力不断增强等特点。本书相关章节详细讨论了超高压输电线路本身的特性、线路上电压和无功功率的流动及分布特性、各种运行方式下的状态等内容。柔性交流输电的核心是电力电子技术在输电系统中的应用，通过对输电系统的电压、阻抗、功率角、潮流等的控制，来提高电网的灵活性。本书阐述了其基本原理和控制技术。与交流输电相比，超高压直流输电不存在同步稳定性方面的问题，而且较适合于远距离和超远距离输电。在技术方面，超高压直流输电可分成直流输电线路和直流换流站两部分内容。本书着重分析构成直流换流站的变流器的工作原理。

本书的俄文原版是莫斯科动力学院电力系统专业的教材。受莫斯科动力学院电力系统教研室 Ю. П. Рыжов 教授委托，全书的翻译工作由上海交通大学的王承民老师完成，莫斯科动力学院的博士研究生姜松涛参与了本书的部分翻译工作。此外，上海交通大学的史伟伟老师、谢宁老师、博士研究生衣涛、张庚午参与了本书的整理和校对工作。不幸的是，Ю. П. Рыжов 教授在 2013 年去世了，在此向他表示哀悼。

由于时间和水平所限，书中难免存在错误和纰漏，恳请各位专家、读者批评指正！

原 书 序

“远距离交流输电”和“直流接入与电力传输”是莫斯科动力学院（技术大学）电力系统及相关专业大学生的专业课程，本书包含了上述两门课程的主要内容，阐述了与电能远距离传输相关的各种问题，其内容对于学习其他课程也是有益的。

从20世纪60年代开始，莫斯科动力学院就开设了上述两门课程，是由电力系统教研室主任В. А. Веникова教授所创立的，只是在不同的时期，这些课程的名称和内容会有或多或少的不同。В. А. Веникова教授和教研室的同事们以古比雪夫——莫斯科输电线路为例，建立了其物理模型，在此基础上进行了大量的研究工作，并在1960年出版了著作《远距离输电》。在1972和1985年，又出版了与这些课程相关的两本教材，现在已成为绝版的好书。此外，也制定了一系列与实验、分析计算和课程设计相关的手册，并引入到教学过程中。

在本书的完成过程中，借鉴了莫斯科动力学院电力系统教研室在相关课程上所积累的全部教学经验。为了适应教学要求，本书将一些专业出版物和文章中的数据进行了系统整理，阐述了与直流和交流电力传输相关的基本理论。同时，重点关注了电力传输的特征和特性。

为了与教学计划相对应，其他与远距离输电相关的一些重要问题，如过电压和绝缘、线路结构、电力传输的经济性指标等，将在其他课程中阐述，在此只是简单提及或者完全忽略。

可以肯定的是，尽管有上述限制，本书仍不仅仅适用于大学生和研究生，对于输电领域的科研工作者以及工程师也同样很有借鉴意义。

作者也意识到，本书在写作过程中不可避免地存在一些缺陷和不足，如读者在阅读本书时能提出意见和建议，作者将非常感谢并全部采纳。

如有意见和建议，请寄如下地址：111250，莫斯科，Красноказарменная大街14号，莫斯科动力学院出版社。

目 录

译者序

原书序

第 1 章 现代电力系统中超高压输电的作用 1

1.1 超高压输电的发展过程 1

1.2 世界各国的电压等级及其应用 6

1.3 现代电力系统中超高压输电的应用范围 9

1.4 超高压输电线路的特性和主要要求 12

1.5 超高压输电线路的实现方式 14

测验题 16

第 2 章 超高压输电线路单位长度参数和相结构 17

2.1 超高压输电线路的结构特性 17

2.2 输电线路导体上的电晕 19

2.3 超高压架空线路的相结构及参数选择 22

2.3.1 超高压架空线路的相结构 22

2.3.2 相结构参数的选择 23

2.3.3 超高压输电线路的单位长度参数 29

测验题 30

第 3 章 无补偿交流线路的主要特性 31

3.1 长线路方程 31

3.2 线路的波特性 36

3.3 理想线路方程 38

3.4 线路的自然功率 39

3.5 长线路的标么制方程 42

3.6 理想线路的相量图和功率圆图 45

3.6.1 1500km 长线路相量图 45

3.6.2 理想线路的功率圆图 48

3.7 线路末端的无功功率及沿线状态参数分布 51

3.7.1 理想线路的无功功率 51

3.7.2 实际线路的无功功率 54

3.7.3 超高压线路电压、电流和无功功率分布	56
3.8 轻负荷运行方式下线路中间点上的电压极值	60
3.9 长度为 1500 ~ 3000km 无补偿线路的状态特性	62
测验题	68
第 4 章 远距离交流输电线路的等效电路	69
4.1 线路的数学模型	69
4.2 输电线路等效电路参数的计算方法	71
4.2.1 等效电路参数的直接计算法	71
4.2.2 修正系数法	72
4.2.3 Гореv 方法	73
4.3 集中参数输电线路元件计算	77
4.3.1 线路串联元件的计算	77
4.3.2 线路并联元件的计算	79
4.3.3 线路组合元件的计算	80
4.4 等值二端口模型法	80
4.5 线路的自阻抗、互阻抗和输入阻抗	86
测验题	88
第 5 章 补偿线路、功率圆图、电压和无功功率分布	89
5.1 功率圆方程	89
5.2 补偿线路功率圆	90
5.2.1 带并联电抗器线路	90
5.2.2 带纵向容性补偿装置的线路	92
5.3 补偿线路电压和无功功率分布	94
5.3.1 带并联电抗器线路	94
5.3.2 带纵向容性补偿装置的线路	98
测验题	102
第 6 章 超高压输电线路正常和事故后运行方式下的状态分析及损耗计算	103
6.1 概述	103
6.2 无中间变电站的超高压输电线路状态计算	104
6.2.1 输电线路的接线方式	104
6.2.2 原始数据的设定和基本方程	106
6.2.3 线路两端状态参数的计算方法和“内部”无功功率的确定	108
6.2.4 最大和最小负荷水平下的状态计算	111
6.3 有中间变电站的超高压输电线路状态计算	118

6.3.1 输电线路接线方式及其状态计算方法	118
6.3.2 中间变电站上有补偿装置的接线方式	121
6.3.3 中间变电站无补偿的接线方式	125
6.3.4 单回路有中间变电站的输电线路	127
6.4 输电线路事故后和检修状态计算的特点	128
6.5 保障输电线路节点无功功率平衡的措施	129
6.6 超高压线路上的有功功率和电能损耗	133
测验题	138
第7章 超高压远距离输电线路的单向连接状态	140
7.1 输电线路单向连接状态的基本特性	140
7.2 无补偿输电线路的单向连接状态	140
7.3 带并联电抗器输电线路的单向连接状态	146
7.4 超高压远距离架空线路上发电机的自励磁	153
7.4.1 自励磁的形式及其产生条件	153
7.4.2 消除发电机自励磁的措施	157
7.5 带一个中间变电站输电线路的同步状态	159
测验题	162
第8章 超高压线路的输电能力及其提高措施	163
8.1 超高压架空线路输电能力的概念	163
8.2 提高超高压线路输电能力的方式	165
8.2.1 提高额定电压	165
8.2.2 改变线路的波特性	167
8.2.3 使用可控横向补偿	172
8.2.4 使用可控纵向容性补偿	174
测验题	177
第9章 可控(柔性)交流输电线路	179
9.1 柔性线路的用途和沿线传输功率的控制方法	179
9.2 实现柔性输电的技术手段	180
9.2.1 线路两端电压的控制装置	180
9.2.2 控制线路电磁特性的装置	186
9.2.3 线路传输功率的组合控制装置	190
9.3 相量控制线路的状态特性	194
测验题	195

第 10 章 超高压直流输电线路	197
10.1 直流输电线路和换流站的应用范围	197
10.2 直流输电线路和换流站的接线模式	201
10.3 单桥式变流器的等值电路	209
10.4 变流器的数学模型	215
10.5 整流器工作状态	217
10.5.1 小电流状态 (状态 2)	217
10.5.2 工作电流状态 (状态 2-3)	224
10.5.3 整流器的外部特性以及整流器过渡到逆变状态的条件	233
测验题	234
第 11 章 变流器的逆变工作状态以及整流器和逆变器的协同工作	235
11.1 单桥式逆变器的工作状态	235
11.2 双桥式变流器的特性	242
11.3 直流线路的等值电路	245
11.4 整流器和逆变器的协同工作	247
11.4.1 不可控整流器和逆变器的协同工作 ($\alpha = \text{常数}$, $\beta = \text{常数}$)	247
11.4.2 整流器 ($\alpha = \text{常数}$) 和逆变器 ($\beta = \text{常数}$) 的协同工作	249
11.4.3 可控整流器和逆变器的协同工作	250
测验题	253
第 12 章 变流器的电能特性、直流架空和电缆线路以及直流换流站的基本设备	255
12.1 变流器的电能特性	255
12.1.1 $\gamma = 0$ 时变流器的谐波电流构成	255
12.1.2 实际变流器中的谐波电流	258
12.1.3 高次谐波对电力系统的影响	260
12.1.4 高次谐波的补偿措施	262
12.2 变流器的输入功率	266
12.3 变流器的无功功率补偿	268
12.4 直流输电的功率和电能损耗	270
12.5 直流架空和电缆线路以及直流换流站的基本设备	274
12.6 直流输电的技术和经济指标	280
测验题	281

第1章 现代电力系统中超高压输电的作用

超高压输电在现代电力系统中占据特殊的地位。其具有较高的输电能力，是输电网络的骨干线，能够提高电力系统运行的可靠性和经济性。除此之外，超高压输电线路也是保障互联电力系统之间功率传输的联络线，能够提高互联电力系统工作的稳定性。

目前，国际大电网会议对输电线路进行了如下分类：相间和相对地（极间）电压在400kV以下的交流和直流输电线路被定义为高压线路；相间和相对地（极间）电压在1000kV以下的交流和直流输电线路被定义为超高压线路；相间和相对地（极间）电压达到1000kV及以上的交流输电线路被定义为特高压线路。

在俄罗斯本国的电力发展过程中，把330kV线路归到了超高压线路的范围，因为它具有很多超高压线路的特性。

1.1 超高压输电的发展过程

最初的电能远距离传输起始于19世纪70~80年代，其传输距离（以千米进行度量）还是很短的。那时已经有了单相交流和直流两种类型的电流，在这种情况下，只有直流被作为主要的载能体。因为那时已有的单相交流电动机具有非常低的、实际上是零的起动转矩，不得不使用其他的辅助机械来起动，而当时的直流发电机和直流电动机的特性是完全可以接受的，并能够在工业中进行实际应用。因此，最初的输电方式是直流的。

1873年，法国工程师И. Фонтен（伊·方特恩）在维也纳的国际展览会上展示了距离略微超过1km时电能传输的可能性，在发电机和电动机之间采用了相应长度的电缆，带动人工瀑布的水泵转动。然而能量传输的目的不在于距离的远近，而是必须保证为人工瀑布提供动力的水泵电动机电压。所传输的功率大概是1kW，由于电缆上的功率损耗较大，这种传输方式的效率是很低的。但重要的是，电能在此距离上传输的可能性被证实了。

那时已经清楚的是，提高输电效率的手段可以是增加导线截面积，或者是提高输电电压。但利用就当时的技术提高直流电源的电压是不可能的，因此，那个时代的电气工程师们便努力去寻找增加输电线路导线横截面积的途径。

大约在1874年，俄国军事工程师Ф. А. 皮劳茨克伊提出了使用铁轨作为电能传输的载体，因为铁轨的横截面积大概是钢制电报线的600倍。实验在谢斯特罗列茨克铁路上进行，铁轨之间使用枕木、油浸的帆布进行相互绝缘，铁轨的底部与大地之间使用沥青制成的油漆进行绝缘，电能传输的距离在1km左右。

应当指出，Ф. А. 皮劳茨克伊不是唯一一个进行增大导线横截面积、提高传输容量尝试的工程师。德国著名的电气工程师艾·西门子（他曾在1875年对尼亚加拉大瀑布

的能量进行评估)发现,电能传输距离达到 50km 时,要求导线的横截面积为 17663mm^2 。

尽管 ϕ . A. 皮劳茨克伊关于电能传输的建议没有被接受,但是后来其在铁路电气化的过程中还是得到了应用。

另一个提高输电效率的途径是提高输电电压。人们对这种方法的经历经历了较长的时间,尽管在今天来说是显而易见的,但是当时对其机理还不是很清晰。在此应该提到法国工程师 M. 德普列(后来的科学院院士)和圣彼得堡林业研究所的物理学教授 Д. A. 拉齐纳瓦所做的工作。

在 1882 年, M. 德普列和德国工程师米列尔建造了世界上第一条直流输电线路,它是从米斯巴赫到慕尼黑,长度达到 57km。这条输电线路的电压是 $1.5 \sim 2.0\text{kV}$, 使用了 4.5mm^2 的钢导线,传输的效率不超过 25%。尽管有着如此低的传输效率,这条输电线路还是有很重要的意义,因为它证明了电能传输在足够长距离(数十千米)上的可能性。

在 1885 年, M. 德普列建造了一条新的从克雷到巴黎、长度为 56km 的输电线路,使用了电压为 6kV、重量达到 70t 的直流发电机作为电源,电能传输的效率可以达到 45%。

但是,在进一步提高直流发电机的输出电压时遇到了严重的困难,主要体现在发电机整流器和电刷设备的绝缘上。

进一步提高输电电压的方法是由 Д. A. 拉齐纳瓦提出的,他建议在一条线路的终端串联几个发电机。在这种情况下,每个发电机的输出电压较低,因此可靠性也较高。但是,由于每个串联发电机对地的电势提高了,发电机的外壳必须对地绝缘,需要使用绝缘套管连接涡轮机轴或者是转动的发电机组。

瑞士工程师勒·秋里建造了采用这种形式的最大功率输电线路。该线路从法国阿尔卑斯山山麓的穆塔水电站到里昂,于 1906 年投入运行,长度达到 180km,在输出电压为 57kV 的情况下,输出功率达到 5MW。在穆塔水电站一端,直流发电机被串联在一起,使用绝缘套管对地和旋转的涡轮机绝缘;而在里昂一端,同样装设了串联的直流电动机,这些电动机被接到了含有三相发电机的交流电网上。在 1927 年,这条线路被改造,除了和原来的水电站串联,又有两座水电站投入运行,此时的线路长度增加到了 80km,电压也升高到了 125kV。这条线路一直使用到将近第二次世界大战开始前,到 1938 年才被三相交流线路替代。这种形式的输电线路共建设了 15 条,其中 1 条在俄罗斯,后来均陆续地被三相交流输电线路所替代。

在那个时代,只是使用直流来解决电能传输问题的尝试并没有取得成功。这个时期的直流输电具有很大的缺点,其中最重要的是,在保证足够高输电效率和降低输送功率选择困难的情况下,不可能再通过进一步地提高输电电压将电能输送到较远的距离。

在 19 世纪 80~90 年代,与直流输电建设同时开展的一些研究工作,是在工业用户中进行的交流电应用。在 19 世纪 80 年代, H. 特斯拉提出了两相系统,从而可以得到旋转磁场,以产生电动机的初始转矩。但是这个系统具有一系列的缺点,因此并没有被推广应用。

从 M. O. 达利沃·岛博拉沃尔斯科开始提出三相系统,三相系统就得到了广泛的应用。应该说明的是,那时有很多学者在此方向上进行研究,但只有 M. O. 达利沃·岛博拉沃尔斯科最为成功。他的成果还包括笼型和绕线转子式的无凸极三相异步电动机、三相变压器以及带零线的三相四线系统。也就是说,在 2~3 年的时间内,所有三相系统的主要元器件都被研制出来了。这个成就的取得,主要是因为当时存在迫切的实际需求。

经过周密的考虑,第一个三相交流输电工程方案被最终确定,在一年的时间内设计和制造出了所有设备。这个输电工程被完成应该是在 1891 年的国际电工技术展览会开幕前。它从内卡河附近小镇劳芬(德国)的水电站开始到展览会开幕地法兰克福,全长 170km,发电机功率为 230kVA,电压为 95V,连接到浸入油箱的三相变压器上。三相线路采用 4mm^2 的铜导线,通过针式磁绝缘子固定在跨度为 60m 的木架上。线路的电压可达到 15kV(试验电压可达 25kV)。受电端安装有降压变压器,把电压变到 65V 后向负荷供电,负荷包括功率大约为 100 马力^①的液压泵电动机和大量的照明灯泡。

这个输电工程于 1891 年的 8 月 25 日开始启用,输电效率在线电压为 15kV 时可达到 75.2%,而当电压升高到 25kV 时可达到 78.9%,远远高于预想的 50%。从那时起,三相交流输电被广泛地应用于实际当中。

1901 年美国建造了 50kV 的输电线路,1903 年线路的电压升高到 60kV,在 20 世纪初,其传输的功率已经达到 17MW,在某个案例中输电线路的长度甚至达到了 350km。

在 20 世纪的前十年,所遇到的突出问题是输电线路的绝缘问题。在这之前使用的针式绝缘子电压不允许升高到 70kV 及以上。1906 年,美国研制出了悬挂式蝶形绝缘子,解决了输电线路电压升高的问题,这些绝缘子是现代绝缘子的雏形。伴随着这些绝缘子的应用,在 1908~1912 年美国 and 德国建造了第一批 110kV 的输电线路。而在 20 世纪的 20 年代,输电线路的电压又被提高了两次,在 1920 年达到 165kV,在 1922 年达到 220kV,输电功率也相应地增加了。

随着输电线路电压的升高,电晕及电晕损耗问题也开始产生。在美国、英国和俄罗斯的大量研究证实,可以通过两种途径解决这个问题。其中之一是,在某相的一根导线上增加导线的直径,从而降低其表面的电场强度;其二是(B. Φ. 密特科维奇于 1910 年提出),在输电线路的每相中使用分裂导线。

这两种方式都被应用,并且一直应用到现在。

输电电压和功率的增加使得电能既可以从小型电站输送给部分企业、甚至是住宅,也可以从大型电站输出,从而保证整个工业区的电力供应。

在十月革命前的俄国,大约建造了 200km 的输电线路,电压等级包括 10kV、35kV、70kV。在十月革命后,按照俄罗斯国家电气化委员会(创立于 1920 年)的规划,建造了从卡希拉到莫斯科的第一条 110kV 线路。而在建设德涅普拉盖斯水电站时,为了输送其功率,于 1932 年建成并投入使用了 150kV 的输电线路。1933 年,苏联开始建造连接拉多加湖和奥涅加湖的第一条 220kV 线路,这条线路从下斯维尔斯卡娅水电站修到了列宁格勒。

① 1 马力 = 735.499W。

俄罗斯国家电气化委员会的规划奠定了俄罗斯电力系统建设的基础。首批电力系统于1921年在莫斯科和彼得堡建成。在19世纪20年代的后半期,伊万诺夫、拉斯托夫、乌克兰顿巴斯、乌拉尔等地区的电力系统也相继被建成。

与单个发电厂的独立运行相比,多个发电厂的并行工作具有很多重要的优点。首先,发电厂的协同工作降低了必要的运行和检修备用容量,使得不对用户停电检修主设备成为可能;其次,有条件更有效地利用水电站以补偿火电厂的发电。

在20世纪30年代初,110kV电网开始被广泛地建设,覆盖了俄罗斯中央区、顿巴斯地区、乌拉尔地区的大部分区域,从这时起,电网之间的连接开始出现。在1933年,伊万诺夫和高尔克夫、顿巴斯和拉斯托夫的电网实现互联。在1935年,莫斯科和拉斯托夫的系统实现了互联。也就是说,这时互联电力系统(或者称为联合电力系统)产生了。

此时,220kV输电线路快速发展,开始作为大功率互联电力系统中的主干线路。在1940年,建成了连接顿巴斯和基辅电力系统的第聂伯—顿巴斯220kV线路,从而形成了南方互联电力系统,此互联电力系统已经具有自己的调度中心。在1941年,雷宾斯克水电站、乌格利奇水电站、莫斯科之间的220kV线路投入工作。第二次世界大战后互联电力系统的建设继续进行。

按照俄罗斯国家电气化委员会的规划,对一批电力工业中的工厂进行现代化改造,这是后来国家电气化建设的关键。

还在苏联卫国战争之前,就开始研究更高电压等级——400~500kV线路设备了。第二次世界大战后这些研究继续进行,最终在1956年建成并投入使用了从古比雪夫水电站到莫斯科的400kV输电线路。调试和最初运行的经验证实,400kV线路设备在绝缘方面还有一定的裕度,在略微的改造后,使得500kV电压等级线路的建设成为可能。在1959年和1960年,伏尔加格勒—莫斯科的第一条和第二条500kV输电线路相继投入运行。在20世纪60年代初,古比雪夫水电站—莫斯科的输电线路的电压也被提高到500kV,从那时起,500kV输电线路在苏联被广泛地使用。

在20世纪50年代末,第一批330kV线路被建设,并得到了推广,其主要是在苏联的西北部、乌克兰和北高加索地区应用。

第二次世界大战后,工业的发展使得电力需求增加,也就是要增加发电容量。在这个时期,功率为300MW、500MW、800MW的火电机组和640MW的水电机组被研制,而核电站的机组功率达到了1000MW。最终部分火电厂的装机容量达到了2400MW,核电站的功率达到了4000MW,而水电站达到6000MW。未来俄罗斯水电站的装机容量将达到15~20GW。

功率为2.4~4.0MW的火电厂和核电站的建设要求进一步提高线路电压,以输出其功率。因此,还在20世纪50年代,苏联就开始了600~750kV线路设备的研究工作。在1967年,第一条卡纳卡瓦—莫斯科的750kV输电线路投入运行,长度大约为100km。随后在苏联建造了一系列的750kV线路。其中最著名的两条是,顿巴斯—文尼察—阿尔伯特尔沙(匈牙利)输电线路和列宁格勒—加里宁核电站—卡纳卡瓦—莫斯科输电线路。

在20世纪70年代,1150kV特高压输电线路设备开始被研究。世界上第一条

1150kV 输电线路，埃基巴斯图兹—科克舍套—库斯塔奈—车里雅宾斯克线路在 20 世纪 80 年代后半期被陆续投入运行，埃基巴斯图兹—巴尔瑙尔和巴尔瑙尔—伊塔特的 1150kV 线路也同样被建造，这些线路的总长度达到 2350km。

每个电压等级输电线路的投入运行都需要大量的科研工作，包括新设备的研制和生产。值得强调的是，所有的这些工作都是苏联国内的研究和设计团队完成的，所有的输电设备都是苏联国内的工厂生产的。

在俄罗斯国家电气化委员会规划完成过程中及完成后的一段时间内，苏联加强了电力系统的网络建设。特别是在第二次世界大战后，配电网的建设被重点关注。在那段时间，500~750kV 主干输电线路也在快速的增长和发展，如表 1.1 所示。

表 1.1 苏联独立电力系统 220~1150kV 电网输电线路的总长度和装机容量

指标	年份					
	1960	1965	1975	1980	1985	1991
装机容量/百万 kW	29.1	53.9	153.1	223.4	265.3	288.2
电网的最高点压/kV	500	500	750	750	750	1150
输电线路的总长度/千 km						
220kV	9.68	17.2	44.55	72.63	90.29	196.52
330kV	0.66	4.58	14.8	23.63	27.66	31.93
500kV	4.4	5.9	14.67	23.75	36.85	43.93
750kV	—	0.09	1.68	2.86	4.35	7.11
1150kV	—	—	—	—	0.89	1.9

在 1991 年前，110kV 电网输电线路总长度超过了 650000km。具有较高输电能力的 330—500—750—1150kV 输电线路的出现，使如下的系统性问题可以得到解决，即提高电力系统运行的可靠性以及建立覆盖大区域的互联电力系统，例如俄罗斯中央区互联电力系统、西北地区互联电力系统、中伏尔加区域互联电力系统，以及一些其他的互联电力系统等。

首批 500kV 线路的建设标志着苏联统一电力系统的开始。在 1956 年，随着第一条古比雪夫—莫斯科的 400kV 输电线路投入运行，俄罗斯中央区和中伏尔加地区的电力系统实现互联。在 1959 年，古比雪夫—布古尔玛—金口—斯维尔德洛夫斯克输电线路投入运行，使中伏尔加河沿岸电力系统与乌拉尔地区以及普列杜拉尔雅的系统互联。

苏联统一电力系统的建设工作一直在持续进行，哈萨克斯坦、中亚、西伯利亚互联电力系统的形成是以 500kV 线路作为主干网络的。到 1990 年之前，苏联统一电力系统实际上覆盖了除了远东和中亚共和国以外的所有地区。这带来了很多的益处，包括提高了供电可靠性、降低了检修备用容量、在负荷高峰时能够利用系统间的联络线转移功率，以及其他的一些优点。

苏联解体之后，俄罗斯境内电网的输电线路总长度为 454000km，在各个电压等级上分布如下（按照 2004 年的统计）：

电压/kV	110~150	220	330	500	750	1150
输电线路总长度/km	299	100.7	11.2	38.6	3.5	0.95

尽管存在一系列的问题，一直到现在，俄罗斯、独联体和波罗的海一些国家的电网一直是并联运行的。

在额定电压等级的发展、电力系统（包括互联电力系统）的形成方面，其他的国家也存在与俄罗斯相类似的进程，如美国、加拿大、欧洲国家以及其他国家等。图 1.1 显示了美国（包括加拿大）和苏联额定电压等级的发展过程。欧洲国家采取的最高电压等级为 380 ~ 420kV，500 ~ 550kV 输电在非欧洲国家当中得到了广泛的应用，包括美国、加拿大、日本、巴西、澳大利亚等国家。在美国、加拿大、巴西、委内瑞拉和南非等国家建造了 735 ~ 800kV 输电线路。东欧的国家，如匈牙利、波兰、保加利亚和罗马尼亚在苏联的帮助下，也建造了 750kV 输电线路。

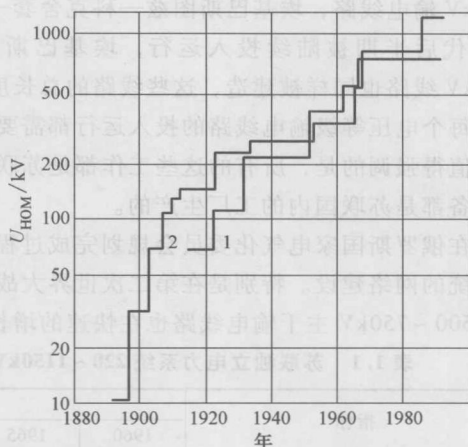


图 1.1 在苏联（1）和美国（2，包括加拿大）110 ~ 1150kV 输电线路额定电压等级的发展过程

在 20 世纪 70 年代，在世界上的一些主要国家中（美国、苏联、日本和意大利）开展了对电压超过 1000kV 的特高压输电设备的大规模研究。特高压输电线路在苏联（1984 年）和日本（1993 年）相继被建造。

能源领域的一体化进程一直在持续。在欧亚大陆，关于建立统一电力市场的一系列问题被广泛地探讨和研究。与波罗的海地区 11 个国家联网的波罗的海电力环网和黑海联合电力系统是其中的典型代表。埃及、伊朗、土耳其电网以及它们与中亚联合电网之间的互联方案，建立苏联、中国、日本和韩国等国家电网之间的互联等问题也正在被研究和探讨。

从 20 世纪 70 年代开始，实际上很多国家的学者和工程师致力于新型输电线路的研究，以使它们具有较高的输送能力，并且能够随着电力系统状态的变化对输送功率进行调节和控制。可控自动补偿线路、紧凑型输电线路（与传统的输电线路相比，缩小相间距离、改变相结构）和柔性交流输电都属于新型输电线路技术范畴。

对这些新型输电线路技术的试验设计和研究一直持续到现在。

为了解决一系列的电力传输问题，一些国家使用了直流输电技术。

1.2 世界各国的电压等级及其应用

在俄罗斯电网的发展过程中，存在两个电压等级序列，包括超高压和特高压。第一个是，110-150-330-750kV，第二个是 110-220-500-1150kV。在这个两个电压等级序列中，后面的电压等级大约是前面的两倍，也就是说输电能力大约提高为 4 倍。

这两个电压等级序列在不同的地区使用。第一个电压等级序列在俄罗斯的西北部地区、卡累利阿、克里木半岛和北高加索地区得到了推广，西北互联电力系统与克里木电

网通过 330kV 电压等级线路连接,西北地区互联电力系统与中央区电力系统通过 750kV 电压等级的线路连接。

第二个电压等级序列被应用在俄罗斯中央区和莫斯科东部地区。在中央区,上述的两个电压等级序列有时是交叉使用的(500kV 和 750kV 线路),而在俄罗斯东部地区,包括西伯利亚、远东地区只是使用第二个电压等级序列。从电网运行的角度来看,在不同的地区使用这两个电压等级序列有各自的优点。

在西欧有 UCPTE(西欧发输电协调联盟)联合电力系统,包括 12 个国家,现在东欧的国家也加入了。在北欧建立了 NORDEL(北欧电力联盟)互联电力系统,包括瑞典、挪威、芬兰和丹麦。英国电网通过水下直流输电与 UCPTE 并联运行,类似的输电线路将瑞典、丹麦和德国电网与瑞典和芬兰电网互联,俄罗斯电网通过维堡的直流换流站与 NORDEL 系统互联,交换功率达到 1420MW。英国和挪威的水下直流输电线路的输送距离达到 724km,输送功率达到 800MW。

加入 UCPTE 西欧国家的交流主干线路是电压等级为 380~420kV 的线路,而 230kV 和 110~150kV 的线路主要在配网中应用,500kV 和 750kV 电压等级在西欧并没有被使用。但是随着负荷的增长,法国环巴黎的 750kV 电压等级接入方案正在被考虑。同时,有建议提出重新使用双回路(塔)双分裂导线的 380kV 输电线路,其中一条回路上也可能悬挂 750kV 双分裂导线。

美国首批 110kV 电压输电线路的建造还是在 1910 年开始的,首批 220kV 线路是在 1922 年开始建造的。然后出现了一系列的其他电压等级,这些是被大量的生产电力设备的公司所推动的。在 20 世纪 50 年代,345kV 线路投入使用,在 1965 年第一条 500kV 输电线路投入使用,在 1969 年开始使用 765kV 输电线路。而在 1970 年,沿美国西海岸的、总长度为 1400km 的 ± 400 kV 直流输电线路(太平洋输电)投入使用。尽管美国的额定电压等级是五花八门的,也可以划分为在不同地区使用的两个电压等级序列。第一个电压等级序列是 138—345—765kV,是在西南部地区、中心地区和北部地区使用;第二个电压等级序列 115—230—500kV,主要使用在西部和东南部地区。

在美国有一些互联电力系统(其中包含数量超过 30 万家的独立能源公司)中的一部分是被同一个调度中心控制的,而另外一些在负荷分配和频率控制时是并行工作的。345~765kV 线路是作为互联电力系统的主干线路和系统间的联络线。此外,1600kV 输电线路设备的研制工作也正在进行。

在北部,美国与加拿大的电力系统有紧密的联系,包括在东部边境的几条 765kV 线路,西部边境的几条 500kV 线路和 3 个直流换流站。

在 20 世纪 90 年代,建设了从位于魁北克(加拿大)的拉格兰德火电厂到波士顿(美国)的多馈入直流输电线路(1486km, ± 400 kV, 2000MW)。这条输电线路有 5 个换流站,其中的 3 个在加拿大,2 个在美国。除此之外,美国还有 3 条直流输电线路和 8 个直流站。美国电力系统的直流线路总长度超过 7000km。

在南部,美国电力系统通过 230~345kV 线路与墨西哥电网连接。加拿大、美国 and 墨西哥电力系统是并行工作的。

在加拿大的东部地区,735kV 输电线路被广泛地应用,在西部是 500kV 线路。发展

735kV 网络是为了保证世界上最大水电站之一——丘吉尔瀑布水电站（装机容量为 5.2GW），以及位于圣劳伦斯的一系列水电站的功率输出。为了保障尼尔森水电站的功率输出，纳尔逊河—温尼伯之间的直流输电线路被建造，它是长度为 800km 的双回线。第一回线路使用汞弧整流器（ $\pm 450\text{kV}$ ，1620MW），第二回线路使用高压晶闸管整流器（ $\pm 500\text{kV}$ ，2000MW）。除此之外，还有 320MW 的伊尔河直流站连接美国和加拿大的电网。在加拿大的西海岸，从陆地到温哥华岛敷设了两根交流电缆（138kV，120MW）和两根直流电缆（ $+260 \sim 280\text{kV}$ ，370MW）作为水下输电线路。而查图圭直流站（1000MW）连接的是美国的 765kV 网络和加拿大 735kV 网络。

加拿大西部 500kV 网络的发展，将大型发电厂和位于西部省份工业区的负荷节点连接起来。因为被山区所分隔，加拿大东西部电网之间没有直接的联系，而是经过美国电网连接的。在美国和加拿大的西部，这两个国家的电网通过 500kV 输电线路连接。

因此，在美国北部和加拿大南部有两个大型联合电力系统，分别由美国东北电网和加拿大东南电网以及美国西北电网和加拿大西南电网构成。

墨西哥电网的容量较小，与美国电网相比是不成比例的，主要的网络由 220kV 和 400kV 两个电压等级构成。

中美洲国家（巴拿马、哥斯达黎加、洪都拉斯、尼加拉瓜）形成了独立的区域电网，总装机容量不大（3~4GW），各国电网之间通过 230kV 线路连接。目前，在建设 230~500kV 输电线路的基础上，正在成立中美洲能源联合会。

在南美洲国家中，具有最大能源开发潜力的是巴西（54%）、阿根廷（20%）、委内瑞拉（10%），剩下的分布在其他大陆国家。目前，阿根廷电网是在南美洲国家当中最大的，最高电压等级为 500kV，这个电压等级线路的总长度将近 1 万 km。

在巴西，电网的最高电压等级是 765kV，还有 500kV、400kV 和 345kV 网络。在巴西世界上最大的水电站之一伊泰普水电站到圣保罗地区之间敷设有直流输电线路，这条输电线路是电压等级为 600kV 的双回线，长度超过 800km，总输送功率达到 6300MW。

在委内瑞拉，电网的最高电压等级为 400kV，在南美洲其他的国家中，电网的最高电压等级为 220kV。各个国家电网之间还有一些 220kV 的联络线。

由于额定频率不同（50Hz 和 60Hz），南美洲国家电网之间的大范围互联是困难的。在南美洲有两个直流站，其中一个功率为 50MW，连接巴拉圭和巴西电网；另一个功率为 2000MW，连接巴西和阿根廷电网。

非洲大陆的面积较大，但是总装机容量不大。其中大约一半的装机容量位于南非，埃及的装机容量占非洲的 10% 以上，其他的位于非洲大陆的其他国家。虽然非洲国家的电网装机容量较小，但是电压等级却足够高，因为其中一半电源距离负荷中心较远。埃及电网的最高电压等级为 500kV，南非为 400kV，尼日利亚、赞比亚和津巴布韦为 330kV，其他国家为 220~230kV。在非洲大陆有两条大功率的直流输电线路，从因加水电站—沙巴的输电线路连接两个最发达、但是独立的扎伊尔地区，另一条是从卡布巴萨水电站（莫桑比克）到阿波罗（南非）。

亚洲（不包括独联体国家）由于缺少足够的资料，对这个地区电网的介绍只能是概括性的。在印度、土耳其、伊拉克、伊朗电网中，主干线路的最高电压等级为