



“十三五”普通高等教育本科规划教材

输电线路工程系列教材

输电线路工程概论

祝贺王娜主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科规划

输 电 线 路 工 程 系 列 教 材

输电线路工程概论

主编 祝 贺 王 娜

编写 孔 伟 肖 琦 龚 靖

白俊峰 王德弘 张纳川

主审 徐建源



中国电力出版社

CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育本科规划教材。

全书共分五章,包括电力系统及输电线路工程概述、输电线路设计、输电杆塔结构及基础设计、输电线路施工、输电线路运行与维护。本书符合现行各电压等级架空线路、绝缘架空线路和电缆线路的设计规程、运行规定、施工验收规范等一系列规程、规范。

本书可作为普通高等学校一级学科土木工程(输电工程方向)和相关专业的教材,也可作为高职高专及函授教材,也可供从事输电线路设计、运行、维护、检修等有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

输电线路工程概论/祝贺,王娜主编. —北京:中国电力出版社, 2017.1

“十三五”普通高等教育本科规划教材. 输电线路工程系列教材

ISBN 978-7-5123-8615-0

I. ①输… II. ①祝…②王… III. ①输电线路-电力工程-高等学校-教材 IV. ①TM726

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 236867 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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2017 年 1 月第一版 2017 年 1 月北京第一印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.75 印张 335 千字

定价 30.00 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

随着电力工业的迅速发展,需要大批输电线路工程方面的专业技术人才。同时,大容量、超高压以及特高压输电线路的出现,对输电线路人才技术水平的要求也越来越高。为此,各大院校也相继增设了输电线路工程专业,为电力建设培养高级技术人才。

本书的目的是培养面向输电工程的集成化、系统化,具有输电线路工程基础知识的宽口径人才。在保持必须的理论系统性前提下,力求避免本书与其他科目教材重复叙述,删除了与输电工程相关专业书中的烦琐叙述,使本书作为从输电线路工程基本知识向输电线路工程专业知识过渡的专业基础课教材。

本书共分为五章。第一章电力系统及输电线路工程概述由祝贺、王娜编写;第二章输电线路设计由孔伟、肖琦编写;第三章输电杆塔结构及基础设计由龚靖、白俊峰编写;第四章输电线路施工由王德弘编写;第五章输电线路运行与维护由张纳川编写。东北电力大学硕士研究生刘程、于卓鑫、严俊韬在绘图、材料整理等方面付出了辛勤的劳动。

本书在编写过程中,得到了东北电力大学有关部门和出版单位的多方面关怀和大力支持。全书由徐建源担任主审,他对本书提出了许多宝贵意见和建议。在此一并致以谢意!

由于编者经验不足,写作水平有限,书中难免有不当之处,敬请广大同行和读者批评指正。

编 者

2016 年 10 月

目 录

前言

第一章 电力系统及输电线路工程概述..... 1

 第一节 电力系统概述..... 1

 第二节 输电线路工程概述..... 4

第二章 输电线路设计 11

 第一节 设计用气象条件 11

 第二节 输电导线的机械物理特性和比载 17

 第三节 均布荷载下输电导线的计算 26

 第四节 气象条件变化时输电导线的力学计算 33

 第五节 连续档输电导线的应力和弧垂 39

 第六节 输电导线的断线张力与不平衡张力 44

 第七节 线路路径选择和杆塔定位 48

第三章 输电杆塔结构及基础设计 57

 第一节 输电杆塔的基本概念 57

 第二节 杆塔外形尺寸确定 59

 第三节 输电杆塔荷载计算条件及其计算原理 67

 第四节 输电杆塔荷载计算 72

 第五节 拉线式输电杆塔内力分析原理 78

 第六节 自立式输电杆塔内力分析原理 88

 第七节 钢结构构件截面选择及连接件设计..... 111

 第八节 杆塔基础形式及设计..... 124

第四章 输电线路施工..... 134

 第一节 输电线路施工工艺流程..... 134

 第二节 线路复测与分坑..... 137

 第三节 杆塔组立..... 145

 第四节 杆塔组立常用工器具..... 147

 第五节 整体组立杆塔..... 152

 第六节 分解组立杆塔..... 161

 第七节 非张力放线及紧线施工..... 165

 第八节 张力架线及紧线施工..... 183

第五章 输电线路运行与维护..... 197

 第一节 认识输电线路运行与维护..... 197

第二节	输电线路弧垂观测.....	200
第三节	输电线路导线风偏.....	202
第四节	输电线路覆冰.....	205
第五节	输电线路杆塔倾斜.....	210
第六节	输电线路导线舞动.....	211
参考文献		214

第一章 电力系统及输电线路工程概述

第一节 电力系统概述

一、电力系统的形成

在电力工业发展的初期,发电厂都建在电能用户附近,电厂的规模很小,一般都是孤立运行的,那时,发电用的燃料主要是煤炭,把煤从煤矿运到位于用户附近的电厂,需要支付相当数量的燃料运输费。

发电用的资源和电力负荷往往不在一个地区,水能资源集中在河流的水位落差较大的地方,燃料资源集中在煤、石油、天然气的矿区;大工业、大城市和其他用电部门则因原料产地、消费中心或受历史、地理条件的限制,可能与动力资源地区相隔较远,水电厂只能就地建电厂发电,通过高压输电线路把电能送到负荷地区才能使水能得到充分利用。火电厂虽然能通过燃料运输实现在用电地区建厂,但随着机组容量的增大,运输燃料常常不如输电经济,即把火电厂建在矿区,通过升压变电站、高压输电线、降压变电站,把电能送到离电厂较远的负荷地区,如果负荷地区已经有了当地电厂,需将远方电厂和当地电厂联系起来,并列运行。随着高压输电技术的发展,并联电厂的数量越来越多,线路电压越来越高,装机容量越来越大,开始是在一个地区之内,后来发展到地区之间相互联系,形成大区电力系统、跨大区电力系统。直到全国联合电力系统,甚至是跨国家的超大规模电力系统。

锅炉、汽轮机、水库、水轮机等是电力生产系统的动力部分。其功能是把能源中的能量转化为机械能,带动发电机旋转,发电机把机械能转化为电能。电能经变压器、电力线路输送分配给用户,再经电动机、电炉和电灯等用电设备,把电能转化为机械能、热能和光能,发电机、变压器、电力线路和各种用电设备构成电能生产系统的电力部分。动力部分和电力部分相互协调、相互配合,构成动能和电能生产的统一体称为电力系统。

动力部分和电力部分在生产上是不可分割的,但这并不表明二者的分析也是不可分的。有些问题必须把动力部分和电力部分当成一个整体进行综合分析才能得出正确的结果,但有些问题可对二者解耦处理,单独对电力(或动力)部分进行分析就可以解决问题。动力部分与电力部分之所以能够解耦,是因为二者的状态变化过程有很大差别。相对来说,动力部分的状态变化表现为慢过程,电力部分的状态变化则表现为快过程,分析电力部分过程的响应时,可以认为动力部分的状态是不变的,它的作用是给电力部分提供所需的边界条件。这样处理以后,进行电力部分的过程分析时,不需考虑动力部分的数学模型,从而使系统分析大为简化。简化后的系统仍称电力系统,因为它具有未经简化电力系统的特征。

总之,电力系统可有广义和狭义两种理解。广义理解的电力系统包括动力和电力两部分,狭义理解的电力系统则只包括电力部分。使用电力系统这个术语时,一般不需明确区分广义和狭义,因为根据讨论问题的性质,意义是自明的。

发电机并网运行形成电力系统在技术上和经济上有十分明显的优越性,主要有以下几

方面:

1. 减少总备用容量的比重

电力系统在运行中难免有些发电机要出故障,有些发电机要停机检修。如果电力系统中总装机容量正好等于该系统的最大负荷,则当某一机组发生故障时,势必引起对一部分用户停电,给用户造成损失。为避免这种情况发生,一般都是使装机容量稍大于最大负荷,这部分容量称为备用容量。由于备用容量在电力系统中是可以相互通用的,所以电力系统容量越大,它在总装机容量中占的百分比就越小。

2. 可以采用高效率的大容量机组

大容量机组效率高、节省原材料、占地少、运行费也少。但是,孤立运行的电厂或者总容量较小的电力系统,因为没有足够的备用容量,不允许采用大机组。否则,一旦机组因事故或因检修退出工作,将造成大面积停电,给国民经济带来极大损失。大电力系统,特别是大型联合电力系统,拥有足够的备用容量,非常有利于采用高效率的大容量机组。

3. 可充分利用水电厂的水能资源

水电厂发电受到季节的影响,在夏、秋丰水期水量过剩,在冬、春枯水期水量短缺,水电厂单独运行或在地区性电力系统中水电厂容量占的比重较大时,将造成枯水期缺水,丰水期弃水的后果。组成大电力系统后,水火电厂联合运行。丰水期水电厂多发电,火电厂少发电,并适当安排检修;枯水期火电厂多发电,水电厂少发电并安排检修。这样可扬长避短,充分利用水能资源,减少煤炭消耗。不仅如此,水电厂进行增减负荷的调节比较简单,因而有水电厂的电力系统调频问题往往比较容易解决。

4. 减少总负荷的峰值

不同的地区由于生产、生活及时差、季节等各种条件的差异,它们的最大负荷出现的时间不同,如一个区域最大负荷出现在17点,另一个区域出现在17点半,两个区域连成电力系统后,最大负荷小于两个区域电力系统最大负荷之和,因而减少了需要装机的容量。

5. 提高供电可靠性

电力系统中有大量的发电机、变压器和输电线路,这些设备运行中难免发生故障。因为电力系统中所有电厂同时发生事故的远较单一电厂发生事故的远小得多,所以组成电力系统后提高了对用户供电的可靠性,特别是增加了对重要用户供电的可靠性。

正是由于上述这些优点,世界上工业发达国家大多数都建立了全国统一电力系统。甚至相邻国家间的电力系统也用联络线连接起来,组成互联电力系统。

二、电力系统运行的特点及要求

电能的生产、输送、分配和使用与其他工业部门产品相比有明显的特点。

(1) 暂态过程非常迅速。电能以电磁波的形式传播,传播速度为 300km/ms ;发电机、变压器、线路、用电设备的投入或退出运行,都在一瞬间完成;故障的发生和发展时间都十分短促。

(2) 和国民经济各部门间的关系密切。由于电能具有使用灵活、控制方便等优点,国民经济各部门广泛使用电能作为生产动力,人民生活用电也日益增加,电能供应不足或突然停电将给国民经济造成巨大损失,给人民生活带来不便。

根据这些特点,对电力系统提出了保证供电可靠性、保证供电质量等要求。

(1) 保证供电可靠性。中断用户供电, 会使生产停顿, 生活混乱, 甚至危及人身和设备的安全, 给国民经济造成极大损失。停电给国民经济造成的损失远远超过电力系统少售电造成的损失。一般认为, 由于停电引起国民经济的损失平均值约为少售电量损失的 30~40 倍。因此, 电力系统运行的首要任务是满足用户对供电可靠性的要求。

造成对用户停止供电的原因可能是由于电力系统的元件(如发电机、变压器、线路等)发生了故障, 也可能是因为系统运行的全面瓦解(如稳定性破坏)。前者属于局部事故, 停电范围和造成的损失比较小; 后者是全局性事故, 停电范围大, 重新恢复供电需要很长时间, 引起的损失很大。

保证供电可靠性, 首先要求系统元件的运行具有足够的可靠性, 元件发生事故不仅直接造成供电中断, 而且可能发展成为全局性的事故。经验表明, 电力系统的全局性事故往往是由于局部事故扩展而成。其次, 要求提高系统运行的稳定性, 增强抗干扰能力, 保证不发生或不轻易发生造成大面积停电的系统瓦解事故。为此, 除了要不断提高运行人员的技术水平和责任心外, 要采用现代化的监测、保护和自动控制设备。

随着技术的进步, 供电可靠性正在不断提高, 但是保证所有用户的供电绝对可靠是困难的。考虑到不同用户因停电造成的损失相差很大, 按其对于供电可靠性的要求不同, 将负荷分成 3 类:

第Ⅰ类负荷: 这类用户停电将造成人身事故、设备损坏、产品报废、生产秩序长期不能恢复、市政生活混乱等。

第Ⅱ类负荷: 该类负荷供电中断将造成大量减产, 使人民生活受到影响。

第Ⅲ类负荷: 不属于第Ⅰ、Ⅱ类的负荷, 如工厂的附属车间、小城镇及农村公用负荷等。

依据这种分类, 供电企业可以采用不同的技术措施, 满足各自的供电可靠性要求。

(2) 保证电能质量。电能质量以电压、频率以及正弦交流电的波形来衡量。用电设备是按额定电压设计的, 实际供电电压过高或过低都会使用电设备的运行技术指标、经济指标下降, 甚至不能正常工作。一般规定, 电压偏移不应超过额定电压值的 $\pm 5\%$ 。频率的变化同样影响用户设备的正常工作。以电动机为例, 频率降低引起转速下降, 频率升高则转速上升, 对转速有严格要求的用户, 如纺织厂, 其产品的质量可能降低。电力系统规定, 频率偏移应不超过 $\pm 0.2 \sim \pm 0.5 \text{ Hz}$ 。

随着自动化及电子技术应用的发展, 接入系统整流设备的增多, 引起谐波比重增大, 如不采取严格的滤波措施, 将对用户产生不利影响。因此, 检测和控制谐波成为维持电能质量的重要一环。

(3) 提高电力系统运行的经济性。节约能源是当前各国普遍关注的一个大问题。电能生产的规模很大, 消耗大量一次能源, 在电能生产过程中应力求节约, 减少能量消耗, 最大限度地降低电能成本。为了达到运行经济的目的, 要首先采用高效、节能的发电设备, 提高发电运行的经济性, 降低发电过程中的能源消耗; 要合理发展电力网, 降低电能输送、分配过程中的损耗; 要大力开展电力合理分配电厂之间的负荷, 让经济性能好的发电厂多发电、差的少发电; 充分利用水资源, 注意水、火电厂之间的合理调配, 力求以少的水耗获得更多的电能。

第二节 输电线路工程概述

一、输电线路的作用

输电线路的任务就是输送电能，并联络各发电厂、变电站之间并列运行，实现电力系统联网。高压输电线路是电力工业的大动脉，是电力系统的重要组成部分。

二、输电线路的特点

输电线路是将输电导线用绝缘子和金具架设在杆塔上使导线对地面和建筑物保持一定的距离。架空输电线路具有投资省、建设速度快、施工简便、易于发现故障、便于维修等特点，远距离输电线路多采用架空输电线路。线路输送容量越大输送距离越长，要求线路电压越高。输电线路的输送容量和线路电压的平方成正比与输电线路的阻抗成反比。其缺点是易遭受风雪、雷击等自然灾害影响，因而发生事故的机会多。

表 1-1 列出了输送线路的电压、输送容量和输送距离的关系。

表 1-1 交流输电电线的电压、输送容量和输送距离

线路电压 (kV)	输送容量 (MVA)	输送距离 (km)
35	2~10	20~50
110	10~50	50~150
220	110~500	100~300
330	200~800	200~600
500	1000~1500	150~850
750	2000~2500	500~1000
1000~1150	4000~6000	1000~2000

三、输电线路的分类

输送电能的线路通称为电力线路。电力线路分为输电线路和配电线路。由发电厂向电力负荷中心输送电能的线路以及电力系统之间的联络线路称为输（送）电线路。由电力负荷中心向各个电力用户分配电能的线路称为配电线路。

输电线路按电压等级分为高压、超高压和特高压线路。35~220kV 的线路为高压（HV）线路，330~750kV 线路为超高压（EHV）线路，750kV 以上的是特高压线路。一般地说，输送电能容量越大，线路采用的电压等级就越高，相邻的电压等级通常相差 2~3 倍。目前我国输电线路的电压等级有 35、（66）、110、（154）、220、330、500、750、1000kV，其中 66、154kV 新建线路不再使用。采用超高压输电，可有效地减少线损，降低线路单位造价，少占耕地，使线路走廊得到充分利用。我国第一条世界上海拔最高的“西北 750kV 输变电示范工程”——青海官亭至甘肃兰州东 750kV 输变电工程，于 2005 年 9 月 26 日正式投入运行。“1000kV 交流特高压试验示范工程”——晋东南—南阳—荆门 1000kV 输电线路工程，于 2006 年 8 月 19 日开工建设，2008 年 12 月全面竣工，12 月 30 日完成系统调试投入试运行，2009 年 1 月 6 日 22 时完成 168 小时试运行投入商业运行。该工程起自晋东南 1000kV 变电站，经南阳 1000kV 开关站，止于荆门 1000kV 变电站，线路路径全长约 650.677km。

输电线路按架设方式分为架空线路和电缆线路。架空线路是电力系统中电能传输、交换、调节和分配的主要环节。通过架空输电线路,可实现远距离输电,还可以进行系统联网。而且可以增强系统稳定性提高系统抗冲击负荷的能力。架空线路由于结构简单、施工简便、设备费用低、施工周期短、检修维护方便、技术要求较低等优点,得到广泛地使用。但是,线路设备长期露置在自然环境中,易受各种气象条件(如大风、覆冰雪、气温变化、雷击等)的侵袭、化学气体的腐蚀以及外力的破坏,出现故障的概率较高。电缆线路受外界环境因素的影响小,但需用特殊加工的电力电缆,费用高、施工及运行检修的技术要求高,目前仅用于城市居民稠密区和跨海输电等特殊情况。

输电线路按输送电流的性质分为交流线路和直流线路,最常见的是三相交流线路。与交流线路相比,在输送相同功率的情况下,直流线路需要的投资较少,主要材料消耗低,线路的走廊宽度也较小;作为两个电力系统的联络线,改变传送方向迅速方便,可以实现相同频率至不同频率交流系统之间的不同步联系,能降低主干线及电力系统间的短路电流。随着换流技术的不断完善和换流站造价的降低,超高压直流输电有着广泛的应用前景。1987年9月我国建成了第一条 $\pm 500\text{kV}$ 超高压直流输电工程——葛(葛洲坝)上(上海)线。该工程全长 1051km ,每极采用 $4\times\text{LGJQ}-300$ 型导线,输送容量 1200MW 。云广 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程,于2006年12月19日开工建设,线路全长 1438km ,西起云南楚雄州禄丰县,东至广州增城市,额定输电容量达 5000MW 。

输电线路按杆塔上的回路数目分为单回路、双回路和多回路线路。除架空地线外,单回路杆塔上仅有一回三相导线,双回路杆塔上有两回三相导线,多回路杆塔上有三回及以上的相导线。

输电线路按相导线之间的距离分为常规型线路和紧凑型线路。

四、输电线路的构成

输电线路的构成元件主要有导线、避雷线(或称地线)、金具、绝缘子(绝缘子串)、杆塔、基础及接地装置等。输电线路元件组成如图1-1所示。

1. 导线

导线用以传导电流,输送电能。它通过绝缘子悬挂在杆塔上。导线常年在大气中运行,长期受风、冰、雪和温度变化等气象条件的影响,承受着变化拉力的作用,同时还受到空气中污物的侵蚀。因此导线除应具有良好的导电性能外,还必须有足够的机械强度和防腐性能,并要质轻价廉。

2. 地线

地线又称避雷线,是悬挂在导线上方的一根或两根金属线,主要作用是防止雷电直击导线,同时在雷击杆塔时起分流作用,对导线起耦合和屏蔽作用,降低导线上的感应过电压。

3. 绝缘子

绝缘子用来支持或悬挂导线和地线,保证导

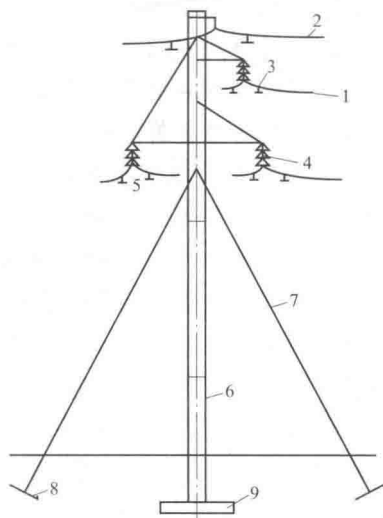


图 1-1 输电线路元件组成

1—导线；2—避雷线；3—防震锤；4—绝缘子；
5—线夹；6—杆塔；7—拉线；8—拉线盘；9—底盘

线与杆塔间不发生闪络,保证地线与杆塔间的绝缘。绝缘子长期暴露在自然环境中,经受风、雨、冰霜及气温突变等恶劣气候的考验,有时还受到有害气体的污染,因此绝缘子必须具有足够的电气绝缘强度和机械强度,并应定期检修。

4. 线路金具

线路金具是输电线路所用金属部件(除杆塔螺栓外)的总称。线路金具种类繁多,用途各异,常用的有线夹、接续金具、连接金具、保护金具以及拉线金具等。线路金具通常承受较大的荷载,需要有足够的强度。与导线相连的金具,还必须具有良好的电气性能。金具质量的好坏,使用和安装是否正确,对安全输电有很大的影响。在设计线路时,应尽量选择标准金具。

5. 杆塔和拉线

杆塔用来支持导线、地线及其他附件,使导线以及地线之间彼此保持一定的安全距离,并保证导线对地面、交叉跨越物或其他建筑物等具有允许的安全距离。目前常用的杆塔有钢筋混凝土电杆和铁塔两种。在线路总投资中,杆塔部分约占40%,因此设计时应尽量做到杆塔结构简单、材料消耗量少、机械强度高、便于施工安装和维护。

拉线用来平衡杆塔的横向荷载和导线张力,减少杆塔根部的弯矩。使用拉线可减少杆塔材料的消耗量、降低线路的造价。

6. 杆塔基础

杆塔基础的作用是支撑杆塔,传递杆塔所受荷载至大地。杆塔基础的型式很多,应根据所用杆塔的型式、沿线地形、工程地质水文和施工运输等条件综合考虑确定。

7. 接地装置

接地装置的作用是导泄雷电流入地,保证线路具有一定的耐雷水平。

五、输电线路发展现状

改革开放以来,我国电力工业一直以较快的速度发展,经历了机组由小到大和电网由小到大、由弱到强、电压等级逐步提高的发展历程,技术和管理水平不断提升,走出了一条具有中国特色、符合我国国情的发展道路。进入21世纪后,电力工业更是取得了前所未有的成就,国家在电网领域加大了投资、建设力度,电网发展与电源建设相协调,电网的可靠性、灵活性和经济性显著提高。

2014年,全国发电装机容量达到13.60亿kW,同比增长8.2%。其中火电91569万kW,水电30183万kW(含抽水蓄能2183万kW),风电9581万kW,核电1988万kW,太阳能2652万kW。全社会用电量达到5.55万亿kWh,同比增长3.8%,有力支撑了国民经济快速发展和人民生活水平的不断提高。

全国联网格局已基本形成,大电网的规模效益初步显现。形成了华北、华中、华东、东北、西北、南方6个主要同步电网,除台湾外,实现了全国联网。华北、华中通过1000kV交流同步联网,东北与华北通过高岭直流背靠背实现异步联网,西北与华中通过灵宝直流背靠背、德阳—宝鸡±500kV、哈密南—郑州±800kV直流工程实现异步联网,西北与华北通过宁东(银川东)—山东(青岛)±660kV直流实现异步联网,华中与华东通过葛洲坝—上海(南桥)、三峡(龙泉)—江苏(政平)、三峡(宜都)—上海(华新)、三峡(荆门)—上海(枫泾)4回±500kV直流以及金沙江(向家坝)—上海(奉贤)、雅砻江(锦屏)—江苏(同里)、金沙江(溪洛渡)—浙西(金华)3回±800kV直流工程实现异步联网,华中与南方通

过三峡(荆州)—广东(惠州)±500kV 直流实现异步联网。西藏与西北电网通过青海—西藏±400kV 直流工程实现异步联网,2014 年 11 月建成川藏电力联网工程。

国家电网公司(以下简称“公司”)经营区域覆盖国土面积的 88%,供电人口超过 11 亿人,占全国人口的 80%以上。截至 2014 年底,公司经营区域内装机容量达到 10.49 亿 kW,全社会用电量 4.4 万亿 kWh,分别占全国 77%和 79%。110(66)kV 及以上输电线路长度达到 83 万 km,变电容量达到 33 亿 kVA。

目前,国家电网形成了 1000/500/220/110(66)/35/10/0.4 和 750/330(220)/110/35/10/0.4kV 两个交流电压等级序列和±500(±400)、±660、±800kV 直流输电电压等级序列;形成了华北、华中、华东、东北、西北 5 大区域电网,西北以 750kV 为主网架,其他区域以 500kV 为主网架,华北、华中、华东电网电压等级提升到 1000kV,建成晋东南—南阳—荆门、淮南—皖南—浙北—上海、浙北—浙中—浙南—福州特高压交流工程;建成 1 回±400kV、7 回±500kV、1 回±660kV、4 回±800kV 直流输电工程和 3 个直流背靠背工程;配电网在网架结构、设备状况、技术水平、管理水平等方面不断完善,2014 年,公司经营区供电可靠率城网为 99.967%、农网为 99.878%,综合电压合格率城网、农网分别为 99.982%、98.808%。

六、我国目标网架发展前景

根据我国“西电东送、北电南供”电力流特点,国家电网发展呈现东北、西北、西南为送端,华北、华中、华东为受端的基本格局,考虑到华北、华中、华东同处电力流受端,且彼此为邻,网间距离短,将“三华”作为一个整体开展多方案综合比较研究。综合送端地区大型能源基地电力外送、省间电力流向及规模,对东北、西北、西南送端电网目标网架结构进行研究。考虑周边国家能源资源、合作意愿、实施条件等因素,开展与周边国家电网互联互通规划研究。

1. “三华”目标网架规划

到 2020 年,“三华”特高压同步电网将建成“四纵七横”特高压目标网架和 19 回特高压直流,其中,四纵:蒙西—湘南、张北—赣州、锡林郭勒盟—南京、潍坊—厦门,七横:蒙西—天津南、榆横—潍坊、晋东南—临沂、南阳—淮南、荆门—皖南、长沙—浙南、湘南—厦门。

到 2025 年,建设乌东德—温州、白鹤滩—鄂东、呼盟—东明、阿坝—河南、澜沧江上游—鄂北等特高压直流工程,适时新建、扩建特高压交流变电站,保证电力的合理输送和消纳。到 2030 年,建设怒江上游—泉州、雅鲁藏布江大拐弯—长沙、雅鲁藏布江大拐弯—湘南、雅鲁藏布江大拐弯—安庆、雅鲁藏布江大拐弯—厦门等多回特高压直流工程。

2. 东北目标网架规划

东北是国家规划的重要煤电、风电能源基地,东北电网是国家电网的主要送端之一,电力流总体呈现“西电东送、北电南供”的格局。着眼于长期能源资源优化配置需要,建设覆盖东北黑、吉、辽三省和蒙东的坚强网架结构,提高电网供电水平和“西电东送、北电南供”通道输电能力,满足经济社会发展的用电需要;建设跨区特高压直流输电通道,汇集区域内煤电和风电,扩大电力消纳范围,根本解决东北近期“窝电”“弃风”问题;构筑连接东北大型能源基地的电力交换平台,形成“强交强直”的坚强送端电网,支撑特高压直流安全稳定运行。

到2020年,规划建设覆盖东北黑、吉、辽三省和蒙东的特高压交流环网,形成纵向“西通道”呼盟—大庆西—白城—扎鲁特—锦州、“东通道”哈尔滨东—长春东—沈阳东—营口,以及横向大庆西—哈尔滨东、扎鲁特—沈阳东2个通道,汇集黑龙江西部、蒙东兴安地区和吉林松白地区风电、蒙东呼伦贝尔和黑龙江东部煤电,以及通辽地区煤电和风电,保障东北中心城市供电安全,提高省间断面输电能力,满足辽宁经济发展电力需求。以覆盖黑、吉、辽和蒙东的坚强送端电网为支撑平台,配合蒙东、吉林、黑龙江三个风电基地的开发,建成扎鲁特—青州±800kV直流输电“三华”电网,解决东北“窝电”问题。

2021~2030年,继续加强东北特高压网架,提高电网资源优化配置能力和安全运行水平,建设白城—长春东、锦州—营口特高压横向通道,并向北延伸至黑龙江东部能源基地,建设佳木斯特高压站,形成覆盖东北黑、吉、辽三省和蒙东的目字形特高压交流环网;提高东北电力外送能力,建设呼盟—东明±800kV直流输电“三华”电网。

3. 西北目标网架规划

西北是国家规划的重要煤电、风电、太阳能能源基地,西北电网是国家电网的主要送端之一,整体电力流向呈“西电东送”格局。加强西北省间750kV主干通道建设,围绕各省负荷中心形成坚强750kV网架结构,满足区内电力供应,实现水、火、风互济运行;形成坚强的西北送端电网,保证西北地区大型能源资源的可靠送出,为准东、哈密、伊犁等大型能源基地开发外送提供坚强支撑。

到2020年,西北规划建成全面覆盖陕、甘、青、宁、新五省(区)的750kV骨干网架,通过750kV电网紧密连接黄河上游水电基地,陕北、宁东、新疆能源基地,省间形成甘陕断面4回、甘宁断面4回、甘青断面6回、新疆与西北主网断面6回750kV线路的电网结构。陕西新建陕北至关中750kV第二输电通道,甘肃新建张掖—河西750kV输电通道,青海新建鱼卡—德令哈—海西、玛尔挡—西宁750kV输电通道,宁夏新建沙坡头等750kV变电站,陕甘青宁围绕关中、银川等主要负荷中心形成750kV环网结构;新疆建成环绕天山东部、天山西部以及塔里木盆地的3个大环网和围绕乌鲁木齐负荷中心的小环网结构。以西北750kV电网为坚强送端支撑,配合哈密、准东、宁东、酒泉、陇东、彬长等大型综合能源基地开发,建成哈密南—郑州、宁东—绍兴、陇彬—徐州、陕北—湘南、酒泉—湖南±800kV直流,准东—成都、准东—皖南±1100kV直流输电“三华”电网。陕北等能源基地电力通过榆横—晋中特高压通道输电“三华”受端电网。

2021~2030年,新疆750kV电网继续向北延伸,新建克拉玛依、布尔津、塔城750kV输变电工程,形成北疆三地市至新疆主网的第二回750kV通道,围绕塔里木盆地形成750kV双环网,满足当地负荷发展及水电、新能源大规模开发外送需要。青海规划建成德令哈—海晏—西宁北输变电工程,形成海西至主网的第二回通道;甘肃规划建成桥湾—玉门—酒泉—张掖—武威—白银750kV河西第二通道,围绕兰州负荷中心形成环网结构;陕西规划在关中新增西安西、西安东站,宁夏新增吴忠站。西北地区新增伊犁—四川±1100kV特高压直流,哈密北—重庆±800kV特高压直流,准东—西宁±660kV直流工程。

4. 西南目标网架规划

西南是国家规划的重要水电基地,西南电网是国家电网的主要送端之一,整体电力流向呈“西电东送”格局。考虑川藏水电外送规模大,“强直弱交”电网结构安全风险突出,统筹水电开发与输电通道建设,适时将川渝电网与华中电网采用直流背靠背联网,构建覆盖

川、渝、藏负荷中心和水电基地的西南送端同步电网。大型水电外送主要采用直流方式，送往华中、华东电网，中小水电主要采用交流方式汇集送往川渝电网；通过电网联网解决藏中供电问题，建设藏中电网与昌都电网联网通道，将西藏电网纳入西南电网统筹考虑，提高藏中电网供电能力，解决“大机小网”和缺电问题；建设新疆准东、哈密、伊犁能源基地至四川、重庆的特高压直流工程，实现水火互济运行，保证丰水期送得出、枯水期不缺能。

2020 年，川渝电网通过 2 个直流背靠背工程与华中、华东四省电网隔开；围绕四川、重庆负荷中心，建设绵阳—成都—铜梁—重庆—内江—雅安—重庆特高压交流工程，构建特高压交流双环网；建设德格—阿坝—绵阳、巴塘—甘孜—雅安两个特高压输电通道，特高压延伸到金沙江上游区域；新建雅中—南昌、金沙江上游—赣州 2 回特高压直流工程，与已有的向家坝—上海、锦屏—苏南、溪洛渡—浙西 3 回直流工程构成 5 回特高压直流外送通道，输电华中、华东地区；川渝负荷中心通过准东—成都直流接受新疆电力；西藏电网将乡城—巴塘—昌都川藏联网双回线路升压 500kV 运行，建设德格—昌都 2 回 500kV 线路，形成巴塘—芒康、德格—昌都 4 回 500kV 线路联网格局；藏中电网建成朗塘—拉萨—羊湖 500kV 线路，通过拉萨—朗县—林芝—波密—左贡—芒康 2 回 500kV 线路与昌都联网，向西延伸至日喀则地区。

2021~2030 年，通过巴塘—左贡、德格—昌都将特高压交流延伸至西藏；四川新建乌东德—浙江、白鹤滩—湖北、阿坝—河南 3 回特高压直流工程，西藏三江上游地建设澜沧江上游—湖北、怒江上游—福建 2 回特高压直流工程，输电华中、华东地区；雅鲁藏布江大拐弯地区，新建 6 回特高压直流工程，采用孤岛运行方式，4 回输电华中、华东，2 回输电川渝负荷中心；川渝负荷中心通过哈密北—重庆和伊犁—绵阳 2 回直流接受新疆电力；建设朗塘—那曲—丁青—昌都北双回 500kV 线路，藏中与昌都电网形成 2 个通道 4 回 500kV 线路联系，可以满足三江上游水电开发外送需要。

5. 与周边国家电网互联互通规划

根据国家战略、外交、经济需要，综合考虑双方合作意愿、前期工作基础、工程实施条件等因素，在分析周边国家煤电、风电等能源基地开发情况的基础上，提出了国家电网与俄罗斯、蒙古、哈萨克斯坦、巴基斯坦等国电网互联互通规划，并对跨国输电工程送受端、线路路径等进行了研究。2020 年，将建设 4 项与周边国家电网互联互通工程，2021~2030 年间，再建设 5 项。

七、科技创新

立足建设坚强智能电网的总体需求，以“新理论、新材料、新能源、新装备”的创新发展为主线，对发电、输电、变电、配电、用电、调度等智能电网各环节的关键技术开展攻关与集成创新。特高压、大电网和自动化等技术继续保持国际领先水平，占领世界新能源发电及接入技术制高点，引领世界智能电网技术发展方向，公司整体研发实力和技术达到国际先进水平。

1. 电网接纳大规模新能源关键技术

提出大规模间歇式新能源的安全稳定控制、大型能源基地的源网协调控制、新能源发电与储能系统及优化联合运行创新理论；突破大规模新能源发电集中外送、间歇式电源运行控制与调度、大容量电池储能系统集成、分布式新能源并网关键技术；研发大规模新能源并网平台及控制系统、新能源发电与储能系统优化联合运行控制系统，研制兆瓦级垂直轴风电机

组、大容量新型并网光伏逆变器、大容量长寿命储能电池等装置；建设大型风光储输联合发电、分布式供电和微网及十兆瓦级储能等示范工程；提高新能源发电装备水平和新能源发电与电网间协调运行控制性能。

2. 大电网安全稳定新理论和电力自动化及通信新装备

研究提出大电网安全稳定及安全防御新理论，突破大电网在线分析、应急与恢复控制、电网防灾减灾、一体化调度、变电站智能化、大机组群优化运行控制、大容量高速光传输等关键技术，研发智能电网一体化调度等相关支持系统和控制平台，建设基于 WAMS 广域协调控制示范工程，建立健全技术标准体系；构建先进适用的电力通信技术体系和坚强可靠的通信网络体系；提高大电网调度的全景监视、综合智能告警及调度决策精益化、流程化和智能化水平。

3. 具有自主知识产权的输变电新装备

提出特高压直流输电技术体系、跨区跨省多级电力交易等理论与方法；突破超/特高压交直流同塔多回输电、 $\pm 1100\text{kV}$ 特高压直流输变电、大规模跨区域输电及转供电力交易运营等关键技术；研制特高压直流网侧电压提高到 750kV 和 1000kV 关键设备、多端特高压直流输电系统成套装备、可控潮流控制器、特高压可控串补等特高压灵活交流输电关键设备和跨区域输电交易及优化决策应用系统；建设超/特高压交直流同塔、多端柔性直流输电、 $\pm 1100\text{kV}$ 直流输电、输电及转供电力市场交易系统等试验和示范工程，提升电网优化资源配置能力。

4. 电网节能环保核心技术

研究智能电网节能调度和综合降损、输变电设备主要特征参量状态检测、绿色环保施工、噪声控制和有害气体回收等关键技术；建立全过程节能评价体系、设备状态诊断评估中心；研发实时电网能耗数据采集平台、节能调度系统、电网损耗评估分析与降损决策支持系统，提出降噪、绿色环保施工典型设计方案，全面提升公司节能降损和资产利用水平。

5. 智能配用电关键技术

开展配电网与主网协调规划、交直流混合配电、配电网自愈、城镇化农网典型供电模式、电动汽车充换电设施规划、定制电力电价政策、新一代用电信息采集等关键技术研究；研发智能配电网自愈控制系统、配电网电能质量控制系统、配电网规划辅助系统、电力用户用电信息采集系统、高级计量系统；研制智能交互终端、无线传感器、光电复合缆、电力线宽带芯片等设备；建设示范工程，打造安全可靠、节能高效、灵活互动的智能配电系统。

6. 电力信息应用和决策支持关键技术

研发新一代的一体化应用开发平台，实现企业各类数据和信息的高度融合、全面共享与深度利用；突破能源—电力—经济—环境协调发展、能源电力价格与政策模拟分析等关键技术，实现定性、定量方法综合集成和信息融合，建立综合性能源经济研究和企业经营管理研究支撑平台，全面有效提升决策支持技术支撑能力。

第二章 输电线路设计

第一节 设计用气象条件

一、主要的气象参数及其对线路的影响

架空输电线路常年在大气中运行，承受着四季气温、风、冰以及雷电等气象变化的影响，主要会引起输电导线载荷和悬挂曲线长度发生变化，使输电导线的张力（应力）、弧垂随之改变，进而影响到杆塔、基础所受荷载大小以及与其他物体间的电气安全距离。一般来说，雨难以在输电导线上停留，雪的密度较小、它们对线路影响不大。雷电对线路的影响，可以用加强防雷措施来解决。风、覆冰和气温对架空输电线路的机械强度和电气间距有较大影响，是线路设计需考虑的主要气象参数，称为气象条件三要素。

风作用于输电导线上形成风压，产生水平方向上的荷载。风速越高，风压越大，风载荷也就越大。风载荷使输电导线的应力增大，杆塔产生附加弯矩，会引起断线、倒杆事故。微风可以引起输电导线的振动，使其疲劳破坏断线。大风可以引起输电导线不同步摆动，特殊条件下会引起输电导线舞动，造成相间闪络，甚至产生鞭击。风还使悬垂绝缘子串产生偏摆，可造成带电部分与杆塔构件间电气间距减小而发生闪络。

覆冰是一定气象条件下输电导线和绝缘子串上出现的冰、霜、雨淞和积雪的通称。覆冰增加了输电导线的垂直载荷，使输电导线的张力增大同时也增大了输电导线的迎风面积，使其所受水平风载荷增加，加大了断线倒塔的可能。覆冰的垂直载荷使输电导线的弧垂增大，造成对地或跨越物的电气距离减小而产生事故。覆冰后，下层输电导线脱冰时，弹性能的突然释放使输电导线向上跳跃，这种脱冰跳跃可引起与上层输电导线之间的闪络。覆冰还使输电导线舞动的可能性增大。

气温的变化引起输电导线的热胀冷缩。气温降低，输电导线线长缩短，张力增大，有可能导致断线。气温升高，线长增加，弧垂变大，有可能保证不了对地或其他跨越物的电气距离。在最高气温下，电流引起的导线温升可能超过允许值，导线因温度升高强度降低而断线。

二、主要气象资料的搜集内容

为了保证架空输电线路的可靠运行，使其机械强度和电气间距在气象条件变化时满足要求，必须对沿线地区的气象情况进行全面了解，详细搜集线路设计所需要的气象资料。主要气象资料的搜集内容及用途，见表 2-1。

表 2-1 主要气象资料及其用途

序号	搜集内容	用 途
1	最高气温	计算输电导线的最大弧垂，保证对地或跨越物有一定的安全距离
2	最低气温	计算输电导线所产生的最大应力，检查输电导线的上拔、悬承绝缘子串的上扬等