

JINCOUXING SHUDIAN JISHU YU YINGYONG

# 紧凑型输电 技术与应用

华北电力科学研究院有限责任公司

北京电机工程学会

国家电网公司华北分部

编著



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



JINCOUXING SHUDIAN JISHU YU YINGYONG

# 紧凑型输电 技术与应用

华北电力科学研究院有限责任公司

北京电机工程学会

国家电网公司华北分部

编著



中国电力出版社

CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

紧凑型输电技术作为一项新型输电技术,能够有效压缩线路走廊、占地面积,大幅度提高自然输送功率,是一种资源节约、环境友好、输送能力强的高效输电方式。国网冀北电力有限公司电力科学研究院(华北电力科学研究院有限责任公司)依托国网高电压紧凑型输电技术实验室,对我国紧凑型输电线路的设计、建设和维护做了大量的研究工作,本书即是对多年来的研究成果进行的系统总结。本书共分十一章,主要内容涉及紧凑型输电技术的起源和优势,紧凑型输电技术在国内外的发展情况,紧凑型输电线路的基本原理,紧凑型输电线路在导线排列、间隙距离、绝缘子串和金具等方面的选型原则,以及同塔双回紧凑型输电线路的设计情况,紧凑型输电线路的防舞动技术,防雷技术和防冰、防风、防污、防鸟技术,紧凑型输电线路的带电作业方法,紧凑型输电线路的运行维护和检修方法,紧凑型输电线路的混合传输技术、同塔双回紧凑型输电线路的并联补偿特性等其他的一些技术问题。

本书可供从事紧凑型输电线路研究、设计、建设、运行维护等人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

紧凑型输电技术与应用 / 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京电机工程学会, 国家电网公司华北分部编著. —北京: 中国电力出版社, 2017. 3

ISBN 978-7-5123-8354-8

I. ①紧… II. ①华…②北…③国… III. ①输电技术—研究 IV. ①TM72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 236157 号

---

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 易 攀 (010-63412355)

责任校对: 郝军燕

装帧设计: 左 铭

责任印制: 邹树群

---

印 刷: 三河市百盛印装有限公司

版 次: 2017 年 3 月第一版

印 次: 2017 年 3 月北京第一次印刷

开 本: 710 毫米 × 980 毫米 16 开本

印 张: 15.5

字 数: 286 千字

印 数: 0001—1000 册

定 价: 65.00 元

---

版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

## 本书编委会

主任委员：赵玉柱

副主任委员：牛晓民 邓 春 朱晓岭 刘亚新 王金萍

主 编：刘 亮

编写人员：胡应宏 卢 毅 郑永平 王 辉 赵 媛

李 雨 陈 原 郝旭东 蔡 巍 赵雪松

张 旭 陈 华 李 宁 戴建国 杨 静

张吉飞 蒋 鑫 魏 苒 王 馨 王 萍

紧凑型架空输电线路技术（简称紧凑型输电技术）是 20 世纪 70 年代，由前苏联圣彼得堡工业大学的阿历克山德罗夫教授基于交流输电的基本原理提出的。该项技术是在保证线路安全运行的前提下，将三相导线布置在一个塔窗内，通过缩小相间距离、优化导线排列、增加相分裂子导线根数和相导线等效半径等改变线路几何结构的方法，从而压缩线路走廊占地面积并大幅度提高自然输送功率的新型输电技术。

二十多年来，紧凑型输电技术在我国得到迅速研究、发展和应用。目前，我国已成为国际上拥有紧凑型输电线路最多的国家，累计里程高达 8000km。多年运行经验表明，紧凑型输电线路能满足我国电力工业持续发展对超高压、远距离输电、减少占地、降低单位输送功率工程综合造价的要求，丰富了输电方式。

近年来，部分紧凑型输电线路的自然环境恶劣区段多次发生舞动和冰害引发的放电等故障。鉴于此，对紧凑型输电线路故障原因、对应措施和适用性的探讨成为了电网关注的重要问题。国家电网公司于 2012 年组织国网高电压紧凑型输电技术实验室，对故障频发的原因进行了初步分析，并出台了主要针对舞动和覆冰灾害的紧凑型输电线路反事故措施，对紧凑型输电线路的设计、运维工作提出了明确要求。但受此类停电故障频发的影响，从 2013 年起，紧凑型输电线路的规划和建设暂时停滞。

紧凑型输电线路只要规划合理，避开环境严重恶劣区域，采取技术措施，就能有效避免线路发生舞动和冰灾导致的相间、相地放电故障，从而保证发挥紧凑型技术的优势，避开劣势。因此，紧凑型输电技术作为在我国落地生根并发扬光大的一项技术，有其生存发展的空间；现有逾八千公里的紧凑型输电线路的安全稳定运行的现实需要，均需业内人员继续关注并进一步研究其适用范围，开发出更多有效的故障预防和治理手段。

本书总结了近年来相关技术成果，结合大量的运行经验对紧凑型输电线路的故障类型、原因与防治措施、线路的运维方式进行了细致分析和阐述。本书力图全面介绍紧凑型输电技术，覆盖了紧凑型输电技术的原理、设计和运行各个领域，对输电线路技术领域的人员具有重要的指导意义。

结合近年电网发展的趋势来看，高电压等级、大容量、小走廊输电是未来输电领域发展的重要方向之一。因此，现有紧凑型输电技术完善，新型交、直流大容量紧凑型输电技术研发将形成新的技术突破点。本书中的部分内容，将有助于拓展技术人员的研究思路，具有学术参考价值。

编者

2017年1月

## 目 录

## 前 言

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 第一章 概述 .....                  | 1  |
| 第二章 紧凑型输电技术的发展 .....          | 4  |
| 第一节 紧凑型输电技术在国外的发展概况 .....     | 4  |
| 第二节 紧凑型输电技术在我国的发展概况 .....     | 8  |
| 第三节 国家电网公司紧凑型输电技术的运行与发展 ..... | 12 |
| 第三章 紧凑型输电技术的基础理论 .....        | 20 |
| 第一节 紧凑型输电技术提升自然功率的原理 .....    | 20 |
| 第二节 自然功率与分裂导线结构的关系 .....      | 22 |
| 第三节 分裂导线的布置方式和数目的影响 .....     | 25 |
| 第四节 一般紧凑型输电线路的杆塔型式 .....      | 30 |
| 第四章 紧凑型输电线路设计 .....           | 34 |
| 第一节 导线排列和布置 .....             | 34 |
| 第二节 最小空气间隙 .....              | 40 |
| 第三节 绝缘子串和金具 .....             | 42 |
| 第四节 双回紧凑型输电线路 .....           | 52 |
| 第五章 紧凑型输电线路防舞动技术 .....        | 56 |
| 第一节 我国舞动灾害概述 .....            | 56 |
| 第二节 紧凑型输电线路舞动故障情况 .....       | 58 |
| 第三节 舞动的气象特点分析 .....           | 62 |
| 第四节 紧凑型输电线路舞动典型故障 .....       | 68 |
| 第五节 紧凑型输电线路防舞措施 .....         | 74 |
| 第六节 防舞治理的下一步规划 .....          | 89 |
| 第六章 紧凑型输电线路防雷技术 .....         | 91 |
| 第一节 紧凑型输电线路的防雷运行分析 .....      | 91 |

|             |                                |            |
|-------------|--------------------------------|------------|
| 第二节         | 紧凑型输电线路防雷特性的计算分析 .....         | 95         |
| <b>第七章</b>  | <b>紧凑型输电线路其他故障及防治 .....</b>    | <b>119</b> |
| 第一节         | 紧凑型输电线路的防冰 .....               | 119        |
| 第二节         | 紧凑型输电线路的防风 .....               | 122        |
| 第三节         | 紧凑型输电线路的防污 .....               | 124        |
| 第四节         | 紧凑型输电线路的防鸟 .....               | 127        |
| <b>第八章</b>  | <b>紧凑型输电线路的带电作业 .....</b>      | <b>133</b> |
| 第一节         | 500kV 紧凑型输电线路及其带电作业 .....      | 133        |
| 第二节         | 带电更换 500kV 紧凑型输电线路耐张绝缘子串 ..... | 140        |
| 第三节         | 500kV 紧凑型输电线路在高海拔地区带电作业 .....  | 143        |
| 第四节         | 500kV 同塔双回紧凑型输电线路带电作业 .....    | 157        |
| <b>第九章</b>  | <b>紧凑型输电线路的运维 .....</b>        | <b>166</b> |
| 第一节         | 线路巡视基本方法与内容 .....              | 166        |
| 第二节         | 紧凑型输电线路运维技术 .....              | 168        |
| 第三节         | 经典案例分析与运维经验 .....              | 181        |
| <b>第十章</b>  | <b>紧凑型输电线路的检修 .....</b>        | <b>186</b> |
| 第一节         | 检修原则、内容和基本方法 .....             | 186        |
| 第二节         | 紧凑型输电线路检修技术 .....              | 188        |
| <b>第十一章</b> | <b>紧凑型输电线路其他技术问题 .....</b>     | <b>193</b> |
| 第一节         | 混合传输技术及其对自然功率的影响 .....         | 193        |
| 第二节         | 导线等边布置和等腰布置的技术比较 .....         | 195        |
| 第三节         | 同塔双回紧凑型输电线路并联补偿特性 .....        | 201        |
| <b>参考文献</b> | .....                          | 233        |
| <b>结语</b>   | .....                          | 235        |





# 第一章

## 概述

伴随着世界经济的发展和文明的进步，人类对电能的需求与日俱增，同时也越来越清醒地认识到土地、资源、环境等因素对人类进一步发展的重要性，从而开始探索资源节约、环境友好、输送能力强的高效输电模式。20 世纪 70 年代，前苏联圣彼得堡工业大学的阿历克山德罗夫教授，基于交流输电的基本原理，提出紧凑型架空输电线路技术（简称紧凑型输电技术）。紧凑型输电技术是在保证线路安全运行的前提下，通过缩小相间距离、优化导线排列、增加相分裂子导线根数和相导线等效半径等改变线路几何结构的方法，从而压缩线路走廊、占地面积，并大幅度提高自然输送功率的新型输电技术。紧凑型输电技术具有提高输电线路输送能力，压缩走廊宽度，减少线路对环境的电磁污染等特点，这也使该项技术被国内外电力系统广泛的研究和采用，并取得了明显的经济效益和社会效益。近十年来，紧凑型输电技术作为一项重大输电技术，在中国迅速得到研究、发展和应用。

紧凑型输电线路分为高自然功率紧凑型输电线路和一般紧凑型输电线路。高自然功率紧凑型输电线路突破传统的设计原则，通过采用加大分裂间距、增加分裂数目和改造分裂结构，优化导线排列等方法，增大导线的电容，减少线路的波阻抗，从而大幅度提高线路的输电能力。高自然功率紧凑型输电线路通常能将线路的传输功率提高 50%~70%。高自然功率紧凑型输电线路子导线表面的场强分布比常规线路的分布要均匀得多，从而大大提高了导线表面的利用率，使得无线电干扰和电晕损失等方面均能控制在一个可以接受的水平。但高自然功率紧凑型输电线路子导线的排列一般呈椭圆型、抛物线型等不规则不对称分布，各个相邻子导线间的距离又有差异，因此线路导线结构往往过于复杂，增加了线路工程建设和运行维护检修的复杂性，所以高自然功率紧凑型输电线路的实际应用在国内外并不多见。

相比常规线路，一般紧凑型输电线路的导线结构和杆塔形式并不作重大改变，只是增加了相分裂子导线根数，取消杆塔的相间立柱，三相导线都布置在塔窗之内；同时，三相导线常采用三角形排列、V 型绝缘子串以限制摇摆幅度，缩

小相间距离等简单措施。一般紧凑型输电线路通常能将线路的传输功率提高30%左右。一般紧凑型输电线路的相导线布置和分裂导线结构全部采用对称分布,便于施工和维护,国内外已有长期安全运行和维护的经验。

紧凑型输电线路相比常规输电线路,直接经济效益巨大,其表现主要有:

(1) 使线路的走廊宽度显著减小,不含防护通道情况下,220kV线路的宽度可从13m最小减少为3.4m,500kV线路的宽度(以内部过电压1.8倍计)可从23~24m减为7.5m,大量节约走廊占地。

(2) 减少对环境的污染,紧凑型输电线路导线离地面1m高度处电场强度超过4kV/m的高电场区的宽度仅是常规线路的约1/3,降低了电磁污染对周围居民区及生态的影响,有利于环保。

(3) 大幅提升线路传输的自然功率,220kV紧凑型输电线路较常规输电线路,提高自然输送功率约60%,330kV紧凑型输电线路较常规输电线路,提高自然输送功率约44%,500kV紧凑型输电线路较常规输电线路,提高自然输送功率约34%,而自然功率高的线路有利于系统稳定。

(4) 紧凑型输电线路运行中的电能损耗和电压降远低于传统结构线路,特别适用于远距离大容量输电,可大大减少系统无功电源的需要量。

(5) 紧凑型输电线路倒三角排列的三相导线对称性好于常规线路,即使300km长的线路也不需换位。

多年运行经验表明,紧凑型输电线路能满足我国电力工业持续发展对超高压、远距离输电、减少占地、降低单位输送功率工程综合造价的要求,提高输电技术的整体水平。

20世纪90年代初,我国开始了紧凑型输电线路的设计和研发工作,并于1994年建成了第一条220kV紧凑型输电线路——安廊线、1999年建成第一条500kV紧凑型输电线路——昌房线。至今,紧凑型输电线路在我国已有20年的运行经验,涵盖220kV、330kV和500kV三个电压等级,线路形式包括单回线路和同塔双回线路,线路总长度已接近8000km。

2007年起,我国500kV紧凑型输电线路屡次发生覆冰舞动故障,尤其在2010~2012年间,累计发生覆冰舞动故障近40次,直接影响了送电安全。受此影响,业内对紧凑型输电线路抗灾能力的质疑也愈发明显。但不可否认的是,2007年以前建设的紧凑型输电线路,并未有发生覆冰舞动故障的报道。而发生舞动的紧凑型输电线路,大多数是2007年以后新建的紧凑型输电线路,且多位于高山丘陵地带,自然环境较为恶劣。且同区域的常规输电线路,也存在发生舞动跳闸的案例。

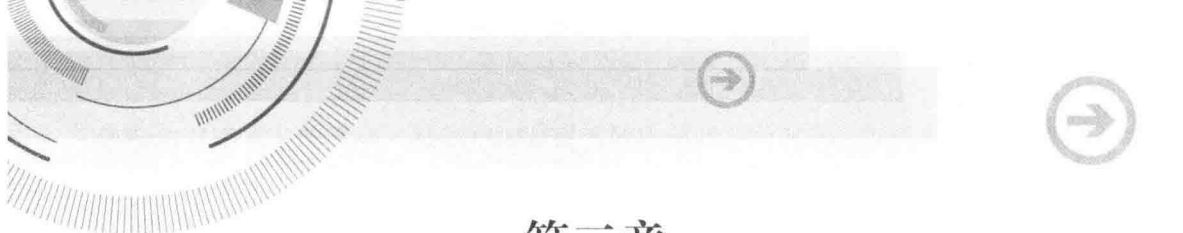
由于紧凑型输电线路相间、相地距离较短的技术参数特征,其抑制由于舞动

和覆冰造成的相间、相地放电的能力弱于常规输电线路。而舞动和冰害往往造成电网大面积、长时间停电,给社会和居民带来了不可弥补的损失。鉴于此,对紧凑型输电线路故障原因、对应措施和适用性的探讨成为了电网关注的重要问题。国家电网公司于2012年组织国网高电压紧凑型输电技术实验室,对故障频发的原因进行了初步分析,并出台了主要针对舞动和覆冰灾害的紧凑型输电线路反事故措施,对紧凑型输电线路的运维情况提出了明确要求。2013年,国家电网公司对处于故障频发区段的紧凑型输电线路进行了大面积改造为常规型输电线路,有效降低了由于舞动造成线路放电的概率。

值得注意的是,DL/T 5217—2005《220kV~500kV紧凑型架空送电线路设计技术规定》中曾明确规定,紧凑型输电线路不适宜建立在风速较高的山区。而发生舞动、覆冰灾害较多的紧凑型输电线路区域,恰恰位于风速很高的山区。因此,紧凑型输电线路故障多发的原因之一也是由于规划设计环节仍不完善,在不适宜建立紧凑型输电线路的地区建设了相关线路。从这个角度也表明,紧凑型输电技术本身仍是值得推广和应用的,但线路的适用性,必须经过专项的分析和检验,从而给出明确的指导。我国对于紧凑型输电线路的设计已经有了国家电网公司企业标准Q/GDW 110—2003《500kV紧凑型架空送电线路设计技术规定》,以及电力行业标准DL/T 5217—2005《220kV~500kV紧凑型架空送电线路设计技术规定》。从目前的技术水准、国内外发展情况分析,紧凑型输电线路的相关参数如分裂导线、子导线半径、相间距离等都有进一步优化的空间,相关标准也有修订的必要。

为了更好地解释紧凑型输电线路多个方面的技术问题,普及紧凑型输电线路的相关知识,保障紧凑型输电技术的顺利发展,国家电网公司高电压紧凑型输电技术实验室的研究人员将多年的研究成果进行总结,撰写了本书。该书将重点对紧凑型输电线路的应用情况作详细介绍,并结合实际案例,初步分析紧凑型输电线路的技术特征。

本书的第一章简要介绍了紧凑型输电技术的起源和优势。第二章介绍紧凑型输电技术在国内外的的发展情况,重点介绍了国家电网公司系统内紧凑型输电线路的发展、分布、运行、故障和措施情况。第三章详细介绍了紧凑型输电线路的基本原理,包括提升自然功率的理论,分裂导线的布置方式和杆塔型式。第四章从设计角度介绍了紧凑型输电线路在导线排列、间隙距离、绝缘子和金具等方面的选型原则,以及同塔双回紧凑型线路的设计情况。第五章~第七章分别介绍紧凑型输电线路的防舞动技术,防雷技术和防冰、防风、防污、防鸟等技术。第八章介绍了紧凑型输电线路的带电作业。第九章、第十章介绍了紧凑型输电线路的运维和检修。第十一章介绍了紧凑型输电线路的其他一些技术问题,包括混合传输技术、同塔双回紧凑型输电线路的并联补偿特性等。



## 第二章

# 紧凑型输电技术的发展

### 第一节 紧凑型输电技术在国外的发展概况

在国际上,美国、欧洲诸国、日本、前苏联、巴西、加拿大等国家和地区都曾经开发或者试验研究过紧凑型的输电方式。

#### 一、美国和欧洲诸国的发展概况

20 世纪 70 年代初,为了减小走廊宽度,提高单位走廊宽度输送容量,降低线路造价,美国能源部发起和组织进行了紧凑型输电线路的研究。采用的方法是将三相导线置于同一塔窗或构架内,使相间无接地构架,研究了相导线水平、三角和倒三角等几种布置方式。通过技术经济比较,认为采用三角布置的紧凑型输电线路所需走廊宽度可大大小于常规线路,相当于低一个甚至两个电压等级常规线路所需走廊宽度。但是,相间距离减小,将使导线表面场强增加,为了使可听噪声和无线电干扰保持原来水平,则需要适当增大子导线直径。

美国还研究了采用多相输电的方法来减小线路走廊和提高输送能力,这实质上也是一种紧凑型输电线路,即用六相或十二相送电线路代替传统的三相线路。在相同的相对地电压下,多相制的相间电压小于三相制,从而可减小相间距离,使线路更为紧凑。多相送电一般是将所有导线排列成一圆环形。

目前美国输电系统中存在三种不同时代的 500kV 输电线路。早期的 500kV 输电线路,每相导线采用单根直径为 64mm 导线,三相导线呈水平布置,采用 I 型绝缘子串悬挂。中期的 500kV 输电线路,每相导线采用两根 Chukar 导线(导线铝总截面为  $2 \times 903\text{mm}^2$ ),三相导线呈三角布置,采用 I 型绝缘子串悬挂。近期的 500kV 输电线路均采用紧凑型输电线路型式,每相导线采用三根 Chukar 导线(导线铝总截面为  $3 \times 903\text{mm}^2$ ),三相导线呈三角布置,采用 V 型绝缘子串悬挂。美国西北电力管理局(BPA)建设紧凑型输电线路的目的是节省输电线路建设投资,根据 BPA 的经验,500kV 紧凑型单、双回输电线路,较一般型输电线

路可降低建设投资约 10% 和 17%。

欧洲的意大利和比利时曾对世界上已有和正在研究的紧凑型塔, 从塔型、导线布置和绝缘子串进行了综合分析比较。与常规拉线 V 形塔相比, 采用导线水平布置的紧凑型输电线路, 可以节省 19%~32% 的走廊宽度, 单位走廊宽度可增加 52%~82% 的输送能力; 导线采用倒三角布置的紧凑型输电线路, 可节省 38%~44% 走廊宽度, 可增加 78%~134% 单位走廊宽度输送能力。与采用常规拉线 V 形塔的线路相比, 输送单位 MW 功率的线路本体投资, 采用自立式铁塔的紧凑型输电线路约贵 9%~20%, 采用拉线塔可节省 5%~7%。

意大利和比利时还对 525kV 六相制和 525kV、800kV 三相制紧凑型输电线路进行了技术经济比较, 认为 525kV 六相输电线路和 800kV 三相紧凑型输电线路相比, 在输送的功率相同时, 前者线路走廊可以减小 17%, 使土地得到更为有效的利用, 然而每 MW 的造价要高出 26%~31%, 因此, 对长距离输电, 紧凑型三相制在投资上要优于六相制。

瑞典对已运行多年的 6 条 220kV 线路, 用两条 420kV 线路代替其中 5 条。为此对 420kV 多种塔型进行了研究分析, 认为采用将导线按紧凑型倒三角布置的拉线 V 形塔, 可大大减小线路走廊和杆塔建设费用, 而且采用这种导线布置, 线下电磁场分布可减小到相当于 220kV 线路的相应水平。因此, 他们决定在拟建的 420kV 线路中, 大部分采用该种塔型。

原联邦德国由于人口密度大, 获得线路走廊非常困难。他们很早就结合保护环境 and 风景区等要求, 采用同杆架设多回紧凑型输电线路的办法来解决电力输送问题, 目前这种 220kV 和 400kV 的紧凑型输电线路总长约 2.7 万 km, 已有 50 多年运行经验。他们的“紧凑型”是指通过采用对称和非对称的 V 型绝缘子串和多回路同杆架设的办法在水平方向上紧凑, 在垂直方向因相间仍需接地, 横担尺寸缩小不多。采用同杆架设多回线路的方法, 使线路走廊得到充分利用, 单位走廊宽度输送功率也提高了很多。

## 二、前苏联、巴西、日本等国的发展概况

前苏联、巴西和日本在紧凑型输电线路的研究和应用方面, 做出了较多有代表性的工作。前苏联从 20 世纪 70 年代开始, 研究并提出了一种大幅度提高输送容量的新型输电线路。它是通过增大分裂导线的分裂间距、增加分裂根数、压缩相间距离、使用合成绝缘子及相间间隔棒、安装限压器 (即线路用氧化锌避雷器) 以及考虑使用可控电抗器、优化导线布置使其电荷分配均匀和表面场强分布均匀等办法, 来达到大幅度提高线路自然功率和充分利用导线表面面积的。按照这一理论设计和建成的一条长 145km 的 330kV 线路, 其自然功率较常规输电线

路提高 67%。导线布置边相为小边向内的侧立梯形，中相为长方形。分裂间距全档距是不同的，由杆塔至档距中央逐渐增加。以上下子导线的距离为例，杆塔处中相为 1m，边相（矩形长边）为 1.6~1.7m，在档距中央中相增至 1.6m，边相增至 2.6m。在杆塔处压缩分裂间距是为了使该处导线表面场强不超过允许值。但由于该条线路结构过于复杂，没有得到较好的应用推广。

前苏联当前实际运行的紧凑型输电线路是架设在罗斯拉沃尔市区的 110kV 双回并架线路，长 5.5km，直线塔为混凝土立柱，使用合成绝缘子和间隔棒，导线为 AC-185/59，相间距离由常规的 3.5~4.0m 缩减为 1.5~1.6m。该输电线路于 1986 年 12 月建成，1987 年 3 月 24 日升压运行，运行中未发现因缩短相间距离而导致的线路绝缘事故。罗斯拉沃尔 110kV 紧凑型工业试验线路的技术经济指标明显优于常规线路，每公里直线塔的数目比常规线路减少 20%，金属消耗量（包括耐张塔）减少 30%，杆塔和基础成本及劳力开支节省约 25%。主要缺点在于绝缘结构数目增加了 1.8~1.9 倍。按照前苏联紧凑型输电线路输电原理，古巴不久架设了一条 220kV 输电线路，并已投入运行。

前苏联还在普斯柯夫斯克水电站到诺沃索科尔尼契架设了一条 330kV 紧凑型输电线路，全长 142.5km，导线为  $4 \times \text{AC}-15$ ，代替常规的  $2 \times \text{AC}-300$ ，相间距离从常规的 9m 减小至 5.5m，自然功率达 605MW，是常规设计的 1.6 倍。这是一条完全按照导线优化排列、提高自然功率的原理，由前苏联西北电力设计分院设计的紧凑型超高压输电线路。设计比较表明，与常规线路相比，杆塔钢材消耗由 9.82t/km 减为 5.37t/km，导线消耗由 7.02t/km 增加到 8.33t/km，避雷线消耗由 1.29t/km 减至 0.84t/km，单位造价由 23.4 千卢布/km 增至 25.0 千卢布/km，折合单位输送自然功率的造价从 65 卢布/(km·MW) 降为 41.3 卢布/(km·MW)，约节省 36.5%，经济效益十分明显。

巴西在 500kV 紧凑型输电线路的建设上具有代表性，已建成 500kV 紧凑型输电线路 1000km 以上、投运超过 20 年。巴西于 1980 年开始研究紧凑型输电线路，认为该种输电线路能大幅度地提高线路输送能力，可以降低对串联补偿和电压支持装置的要求。1983 年完成紧凑型输电线路设计，1984 年~1988 年间巴西在其北部和东北部地区先后建成并投运了全长 1100km 的 500kV 紧凑型输电线路。巴西设计的紧凑型输电线路，其三相导线处于同一塔窗内，分裂导线外型与常规线路一样。在进行紧凑型输电线路杆塔选型时，先后研究了 5 种自立式和 2 种拉线式塔型，如图 2-1 所示，最后决定采用导线按正三角排列的自立式塔。在线路设计中，除了增加导线截面外，还考虑到相间几何均距的减小。同时，决定采用同一铁塔窗口中可安装三相导线的塔头结构，而且在相导线之间无任何金属构架。这种结构不但能使平行的回路数减少，而且还能使为了维持系统良好运行

特性所需的串联补偿和无功功率有所减少。和原有的 500kV 线路相比，由于采用紧凑型输电线路，自然功率提高了 20%，降低了对串联补偿和电压支持装置的要求，使系统运行特性明显地得到改善。为保持和常规型线路相同的无线电干扰水平，导线截面积增大约 50%。

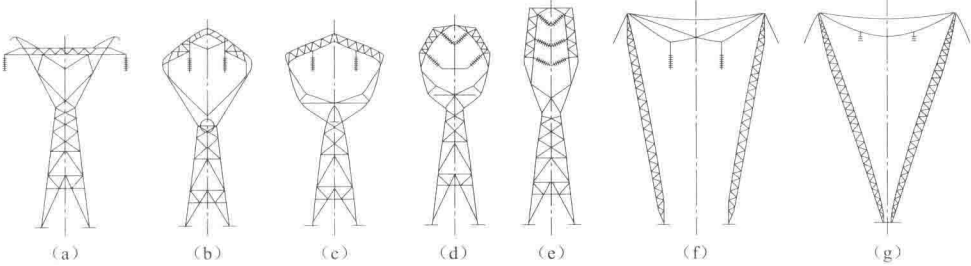


图 2-1 巴西研究的几种塔型

- (a) 传统的自立式三角形塔；(b) 自立式紧凑型Ⅳ塔；(c) 自立式紧凑型Ⅲ塔；  
(d) 自立式紧凑型 VU 塔；(e) 自立式紧凑型 VVV 塔；(f) 悬索型项链Ⅲ塔；(g) 悬索型 Y 塔

日本在 66~500kV 电压等级间都建设有紧凑型输电线路，但最长的紧凑型输电线路只有 214km，其中还含有几个变电站，因此日本的输电线路不需要降低波阻抗来提高自然功率。但日本与我国不同的是，在线路走廊边线外 3m 范围内要付购地费，约占总造价的 50%，地价非常昂贵。因此，日本在线路建设方面采取减小相间距离、减小铁塔根开尺寸、有条件的跨越房屋、建设多回路线路塔等措施来降低工程造价，这在日本称为**紧密型线路**。建设紧密型线路，需要大幅度增加铁塔耗钢量。从日本的紧密型线路建设可以看出，日本输电线路建设是根据日本的国情，充分体现日本国土狭小、人口密集的实际情况。具体而言，日本建设的紧凑型输电线路呈现以下的特点：

(1) 同塔架设多回线路提高输电能力。日本的输电线路很少采用一个铁塔只架单回线路，一般为同塔双回路、同塔四回路，还有的同塔六回路。而且线路的导线截面积大，输送能力强。如 500kV 输电线路基本是同塔双回路。另外，日本的线路杆塔有架设不同电压等级线路的情况，如在杆塔上部架设 500kV 线路、下部架设 275kV 线路。500kV 输电线路每相 4 根子导线，每根子导线的铝截面积为  $810\text{mm}^2$ ，275kV 线每相 2 根子导线，每根子导线的铝截面积为  $410\text{mm}^2$ 。其线路总输送功率可达 750MW。

(2) 缩小相间距离。在日本，线路导线外 3m 的范围内要付购地费的 30%~50%，这不仅需要很大的一笔费用，而且还会因土地的私有，有时很难与土地所有者达成协议。为了降低工程造价，采取了相应措施来缩小相间距离。除了缩小



铁塔根开外,还采取了以下三种方法:

1) 本可以立直线塔的塔位改用耐张塔,并在耐张塔上加挂跳线串来缩小相间距离,用 V 型跳线绝缘子串限制风吹时的跳线摆动角度。同时为了增大跳线对下横担的距离及跳线对塔身的距离,采用硬跳线,该跳线敷设在钢管上。采取以上措施,275kV 线路的相间距离由通常的 13.4m 减小到 8~8.8m。

2) 线路转角塔外角侧横担较内角侧长,但外角侧导线挂点靠近塔身。外角侧虽横担长,但导线挂点远离横担端部,从而缩小了相间距离。

3) 缩小 500kV 线路的相间距离。500kV 线路的相间距离一般为 22~24m,为了将相间距离压缩到 18.4m 以内,在横担的前后两侧,采用两个 V 型跳线绝缘子串,限制跳线的摆动角度,同时在跳线串上施加 500kg 重锤。为缩小相间距离,有的塔将外角侧挂点移向塔身,使得外角侧挂点距塔身的距离较内角侧大,在日本称为偏狭型。为避免外角侧跳线对塔身放电,跳线串挂在横担端部,跳线串悬吊 500kg 重锤,以限制跳线串的摆动角度。

总而言之,日本的紧凑型输电线路在系统联系强、投资又允许的情况下,建设多回路塔,并在选择导线截面积时留有裕度,以提高线路的输送能力。虽然增加建设投资,但对于少占走廊,少占耕地,保护生态环境是有利的;在特殊拥挤地带采用紧密型的设计方法,可以压缩线路走廊宽度,减少构筑物拆迁;日本 154kV 及以下的线路可以跨房建设<sup>[16]</sup>。

## 第二节 紧凑型输电技术在我国的发展概况

我国已建设了 220kV、330kV 和 500kV 三个电压等级的紧凑型输电线路。1994 年我国首条 220kV 紧凑型输电线路——安定—廊坊线建成投运,1999 年我国首条 500kV 紧凑型输电线路——昌平—房山线建成投运,2002 年我国首条 330kV 紧凑型输电线路——成县—天水线建成投运。这些线路均为同塔单回线路,在这些线路设计和运行经验的基础上,2004 年我国又建成投运了首条 500kV 同塔双回紧凑型输电线路——政平—宜兴线。目前我国正准备在西北地区建设 750kV 电压等级的紧凑型输电线路。至今我国已有数千公里运行和建设中的紧凑型输电线路,已投运的各条线路运行状态良好。

### 一、我国 220kV 紧凑型输电线路的发展概况

为了摸清和掌握前苏联提出的高自然功率紧凑型输电线路的设计、建设、运行经验及其特点,为高一级电压采用这种线路作好技术储备,原能源部决定在华北和华中地区拟建两条 220kV 输电线路作为紧凑型研究的试点,首次将 220kV



紧凑型输电线路作为国家重点科技攻关项目进行试验研究。华北地区的试点为安定—廊坊线，华中地区原定以白家葱—铁合金厂为试点，后改为以公安—石首线为试点。安定—廊坊线全长 23.6km，采用四分裂导线，最终输送容量为 300MW。为了在这段线路上取得更多的经验，线路安排了两种不同的导线布置方式，分别为垂直布置和倒三角形布置。它们较常规 220kV 线路可提高自然功率 57%~62%，减小线路走廊宽度 8~10m。导线的选择和布置是按前苏联提出的方法设计的，但有两点与他们不同，①导线表面场强取值不同，前苏联取值略小于  $0.9E_0$  ( $E_0$  为导线电晕起始场强)，考虑到我国人口密度大，环境影响是控制线路设计的重要因素之一，因此在满足小于  $0.9E_0$  的条件下取其接近已运行线路的导线表面实际场强，以保证投运后的无线电干扰水平和已运行的常规线路基本相当；②导线分裂间距不同。前苏联的分裂间距随导线离开杆塔的距离增大而增加，而我国取全档距统一。

对于导线按倒三角布置的方案，如按电荷均匀分布最优化选择，分裂导线应按梯形排列，我国从金具制造、线路架设和运行方便等方面考虑，改为常规的正方形排列。这一方案除分裂根数增加外，其余部分更接近于欧美各国研究并已建成运行的相间无接地构架紧凑型输电线路。除自然功率略小于相导线垂直布置方案外，其他电气特性都较后者为优。安定—廊坊线采用合成绝缘子及由合成材料制成的相间间隔棒，走廊宽度约 9m，自然输送功率较常规线路提高约 60%，于 1994 年 9 月 2 日投入运行，至今运行正常。同期建设的湖北公安—石首线全长 3.3km，运行正常。截至目前，我国建设的 220kV 紧凑型输电线路长度总合已达 2300km 以上。

## 二、我国 330kV 紧凑型输电线路的发展概况

330kV 输电线路是西北地区的主干网络，随着用电量的增加，跨省区的联络线都已接近或超过原设计能力。因此，作为解决西北高一级电压出现前满足电力增长需求的有效方法之一，开展了 330kV 紧凑型输电线路研究。在 330km 紧凑型输电线路中，突出考虑了以下问题：

(1) 适当增加分裂导线根数和分裂间距，将原有二分裂改为四分裂，分裂间距由 40cm 扩大到 45cm，同时分裂导线的结构仍保持三相一致并按对称排列。这样既提高了线路的自然功率，同时又在导线排列结构不过于复杂的情况下达到减少导线表面场强的目的。

(2) 确定导线以倒三角布置作为 330kV 紧凑型输电线路的首选方案。通过研究和计算表明，导线采用倒三角布置可以显著地降低输电线路下面的工频电场和磁场的幅值，从而减少走廊宽度，提高了线路的自然功率。