

JIAOLIU TEGAoya DIANWANG

JIDIAN BAOHU ZHENGding YUNxing JISHU

交流特高压电网 继电保护整定运行技术

国家电网华东电力调控分中心 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

JIAOLIU TEGAoya DIANWANG
JIDIAN BAOHU ZHENGding YUNXING JISHU

交流特高压电网 继电保护整定运行技术

国家电网华东电力调控分中心 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

淮沪 1000kV 交流特高压等工程的投产,一方面促进了我国电工装备制造水平的提高,另一方面也对设计、施工、运行等各方面的专业人员素质提出了更高的要求。本书旨在介绍交流特高压继电保护专业的关键技术问题。全书共分六章,从交流特高压系统特殊性入手,介绍了特高压基础知识,系统地介绍了交流特高压继电保护的特点、性能、配置、整定计算和运行管理,并结合特高压调试启动过程中发生的事故案例分析继电保护装置的动作行为。

本书可为今后特高压电网的发展和工程建设运行提供借鉴参考,可供从事特高压继电保护整定运行、维护检修和调试开发等工作人员使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

交流特高压电网继电保护整定运行技术 / 国家电网华东电力调控分中心编著. —北京: 中国电力出版社, 2015.11
ISBN 978-7-5123-8102-5

I. ①交… II. ①国… III. ①超高压电网—继电保护 IV. ①TM727

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 171793 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>)

北京九天众诚印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 11 月第一版 2015 年 11 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 11.5 印张 186 千字

印数 0001—3000 册 定价 60.00 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



序言

继电保护作为电网安全稳定运行的第一道防线，六十年来伴随着华东电网成长，从电磁型、晶体管型、集成电路型到微机型，走过了一条精彩绝伦的道路；继电保护工作者，同样六十年来伴随着华东电网的成长，挥洒了一代又一代人的青春和汗水。

华东电网是目前全球单个国家内规模最大的区域电网，覆盖上海、江苏、浙江、安徽和福建四省一市，服务中国经济最为活跃的长三角经济带。截至2014年底，调度口径装机容量2.65亿kW，最高负荷2.207亿kW。

2013年9月25日，随着淮沪1000kV交流特高压的投产，华东电网进入了一个新的时代。要保护如此庞大的一个电网，需要无数的继电保护工作者，华东电力调控分中心继电保护专业的工作人员就是其中的一分子，他们承担着主网架的整定运行工作，责任之重，工作之细，如履薄冰，他们却兢兢业业，令人动容。

本书就是记录他们在淮沪特高压工程和浙福特高压工程投运期间工作的点点滴滴，包括他们对特高压继电保护特点的认识、特高压继电保护的选型配置、特高压继电保护的整定计算、特高压继电保护的运行要求和特高压典型电网故障的分析。字里行间，也能感受到他们在这一历史里程碑性工程实施过程中的酸甜苦辣。

希望本书有助于中国电网继电保护运行管理水平的提升，为今后特高压电网的发展和工程建设运行提供借鉴参考，也可作为从事特高压继电保护整定运行、维护检修和调试开发等工作人员的培训教材。

最后，谨以此书献给六十年来伴随华东电网建立、成长和壮大的每一位继电保护工作者和每一位华东电力人！



前言

继华中至华北电网跨区域联网, 1000kV 晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程(简称特高压交流试验示范工程)于2008年建成投运之后, 华东电网范围内, 1000kV 淮南—上海特高压交流输电工程(简称淮沪特高压工程)于2013年10月, 1000kV 浙北—福州特高压交流输电工程(简称浙福特高压工程)于2014年12月底相继建成投运。上述三个交流特高压工程的顺利投运, 标志着国家电网公司掌握了世界领先的特高压交流输电核心技术, 推动高压交流输电技术实现了新的突破。淮沪特高压工程包括四站六线, 起于安徽淮南变电站, 经安徽皖南(芜湖)变电站、浙江浙北(安吉)变电站, 止于上海沪西(练塘)变电站, 全线同塔双回路架设, 变电容量21000MVA, 线路全长 $2 \times 648.7\text{km}$, 途经安徽、浙江、江苏、上海四省(市), 先后跨越淮河和长江。浙福特高压工程包括四站六线, 起于浙江浙北(安吉)变电站, 经浙江省内浙中(兰江)变电站、浙南(莲都)变电站, 止于福建福州(榕城)变电站, 线路全长 $2 \times 603\text{km}$, 其中同塔部分为 $2 \times 160.5\text{km}$, 其余为单回路架设。工程的建设投运, 一方面大大促进了我国电工装备制造水平的提高, 另一方面也对设计、施工、运行等各方面的专业人员素质提出了更高的要求。

本书旨在介绍交流特高压继电保护专业的关键技术问题。全书共分六章, 从交流特高压系统特殊性入手, 系统地介绍了交流特高压继电保护的特点、性能、配置、整定计算和运行管理, 并结合特高压调试启动过程中发生的事故案例分析继电保护装置的动作行为。第一章由刘毅、邱智勇负责编写, 主要介绍了特高压交流输电技术的国内外发展现状、特高压系统的电气特征、设备性能、过电压等技术难题; 第二章由倪腊琴、韩学军负责编写, 主要介绍了交流特高压系统的电气特征给继电保护带来的影响, 保护装置由此做了一系列有针对性的改进和提高; 第三章由倪腊琴、刘中平负责编写, 针对一次系统结构特点及交流特高压发展初期联系相对较弱的特点, 介绍交流特高压继电保护的技术要

求和配置原则；第四章由刘中平、桂强负责编写，详细叙述了特高压系统参数和设备参数计算方法、继电保护的整定原则和整定方法；第五章由桂强、章耀耀负责编写，着重提出了淮沪特高压工程的继电保护运行管理要求，二次设备操作管理规定；第六章由刘虎林、骆敬年负责编写，该章收集了特高压系统在启动调试过程中发生的故障和异常情况，开展针对性地分析研究，总结了运行和事故经验教训，有助于对一、二次设备的设计制造、安装工艺等方面的改进与提升，有助于电网运行管理水平的提升。全书由陈建民、倪腊琴负责统稿。

本书在华东电网内两个特高压工程的成功投运的经验下，全面总结了继电保护专业在参与工程设计、建设、调试、启动全过程的各项工作经历，凝聚了华东电网四省一市继电保护专业团队的心血和汗水。同时也要特别鸣谢编写过程中提供相关资料和帮助领导的领导、专家和同志们。时间仓促，限于水平，难免有错误和不足之处，恳请指正！

目 录

序言

前言

第一章 特高压基础知识	1
第一节 特高压交流输电技术国内外发展现状	1
第二节 特高压交流系统电气特征	6
第三节 特高压发展的突出难题及保护相关技术处理	15
第二章 特高压继电保护特点	18
第一节 特高压线路保护特点	18
第二节 特高压断路器保护特点	24
第三节 特高压母线保护特点	26
第四节 特高压变压器保护特点	29
第五节 特高压高抗保护特点	36
第六节 低压电抗器电容器保护特点	36
第三章 特高压继电保护配置	39
第一节 特高压线路保护配置	39
第二节 特高压断路器保护配置	41
第三节 特高压母线保护配置	42
第四节 特高压变压器保护配置	42
第五节 特高压并联高抗保护配置	47
第六节 低压电抗器电容器保护配置	50
第四章 特高压继电保护整定	52
第一节 特高压线路保护整定	52
第二节 特高压断路器保护整定	75
第三节 特高压母线保护整定	82
第四节 特高压变压器保护整定	84

第五节	特高压高抗保护整定	102
第六节	低压电抗器电容器保护整定	106
第五章	特高压继电保护运行技术	110
第一节	特高压线路及断路器保护	110
第二节	特高压母差保护	113
第三节	特高压变压器保护	114
第四节	特高压并联电抗器保护	115
第五节	110kV 电抗器、电容器及站用变保护	116
第六节	故障录波、故障测距装置及保护故障信息处理系统	117
第六章	特高压典型事故案例	118
案例一	××换流站直流换相失败保护闭锁事件分析	118
案例二	特高压丙站 0#站用变压器接线方式错误分析	128
案例三	特高压丙站 T0522 隔离开关气室内均压罩对外壳底部 放电故障分析	133
案例四	特高压丙站 T0522 隔离开关 A 相未合上事故分析	137
案例五	特高压丙站 T052 断路器 B 相故障分析	143
案例六	特高压乙站丙乙 II 线高抗保护跳闸分析	152
案例七	特高压乙站 2 号主变压器低压过流保护跳闸分析	154
案例八	特高压丁站 T032 断路器 C 相故障分析	155
案例九	丁丙 I 线第一次短路试验分析	162
	参考文献	168

第一章

特高压基础知识

输电技术的发展史是输电电压等级不断提高，从而使输送功率不断加大、输电距离不断加长的过程。交流输电电压一般分中压（配电电压）、高压、超高压和特高压。国际上，中压（MV）通常指 10~66kV 的电压；高压（HV）指 110~220kV 的电压；超高压（EHV）通常指 220kV 以上、1000kV 以下的电压；特高压（UHV）指 1000kV 及以上的电压。对于直流输电情况则有所不同，美国将 $\pm 100\text{kV}$ 以上的称为高压， $\pm 500\text{kV}$ 和 $\pm 600\text{kV}$ 称为超高压，而超过 $\pm 600\text{kV}$ 的则称为特高压；苏联将 $\pm 750\text{kV}$ 及以上称为特高压；中国一般认为 $\pm 800\text{kV}$ 及以上为特高压直流输电电压（UHVDC）^[1~3]。本书主要阐述 1000kV 交流特高压保护的相关知识。

第一节 特高压交流输电技术国内外发展现状

一、国际特高压交流输电技术发展概况

特高压交流输电技术的研究始于 20 世纪 60 年代后半期，当时发达国家的电力工业处在快速增长时期，美国、苏联、意大利、加拿大、德国、日本、瑞典等国家根据本国的经济增长和电力需求预测，都制定了本国发展特高压的计划。苏联、日本、美国、意大利均建设了特高压试验站和试验线段，专门研究特高压输变电技术^[3~5]。

1. 苏联

苏联是世界上最早开展特高压输电技术研究的国家之一，也是迄今为止除了中国外唯一拥有特高压输电工程运行经验的国家。苏联从 20 世纪 70 年代末开始进行 1150kV 输电工程的建设，在其第二阶段建设计划中实施了紧凑化设计，增大了自然输送功率，减小了线路走廊，降低单位输送容量造价，并改善

了特高压线路的电磁环境。苏联还在防雷、防污闪、带电作业、电磁环境方面有新的技术突破，并制定了相应的技术导则。1985年，苏联建成世界上第一条1150kV线路，即埃基巴斯图兹—科克切塔夫—库斯坦奈特高压线路，全长900km，在额定工作电压下带负荷运行，至1994年已建成特高压线路全长2634km。运行情况表明，所采用的线路和变电站的结构基本合理。特高压变压器、电抗器、断路器等重大设备经受了各种运行条件的考验，自投运后一直运行正常^[4]。在1991年，由于苏联解体和经济衰退，电力需求明显不足，导致特高压线路降压至500kV运行。

苏联的1150kV线路采用8×AS330/43分裂导线，分裂间距为0.4m，塔高为40m，根据不同区域的覆冰情况，档距为385~425m，相间距离为24.2m或22m，自然输送功率为5.4GW或5.5GW。在该线路的防污设计中，针对沿线污秽的分布规律、土壤状况（穿越的部分地区属盐碱性土壤）及所经区域35~500kV线路的运行经验，确定线路绝缘子所采用的泄漏比距要高于常用的泄漏比距（ $\lambda=1.5\text{cm/kV}$ ）。在该线路的防雷设计中，反击耐雷水平可以承受高达250kA的冲击电流，在1989年和1990年，实测1150kV线路雷击跳闸的次数为0.3次/（100km·a）和0.4次/（100km·a），主要是由绕击引起的跳闸^[6]。

在以上提到的1150kV线路上，要求主保护动作时间小于20ms，最大的故障切除时间小于70ms。采用两套主保护：一套是高频闭锁负序方向保护，反应各种故障，再用高频闭锁零序方向保护反应接地故障，增加接地保护的冗余度；另一套是用高频闭锁距离保护。两套主保护从蓄电池、直流回路、电流互感器、电压互感器、保护屏到跳闸线圈，都是独立的，实现完全的双重化。用欠范围整定、可传送跳闸信号的距离保护和三段式距离做后备。而在单相重合闸周期中，则采用相差高频保护反应非全相状态下的故障，并使距离选相元件独立工作作为辅助保护，将可能误动的保护短时退出^[7]。

2. 日本

日本是世界上第二个采用交流1000kV输电的国家。为满足沿海大型核电站送电到负荷中心的需要并最大程度地节省线路走廊，日本从1972年开始特高压输电的研究，因为特高压系统不仅输电能力是500kV系统的4~5倍，而且可解决500kV系统短路电流过大难以开断的问题。对于输电电压的选择，日本在800~1500kV之间的多个电压等级进行了技术比较研究，通过各方面的综合比较，选定1000kV作为特高压系统的标称电压。1988年为了将福岛、伯崎6000~8000MW的核电向东京输送，开始建立1000kV线路。20世纪90年代，

日本已建成全长 426km 的东京外环特高压输电线路，目前降压 500kV 运行^[5]。

日本的特高压线路为双回线设计。采用导线分别为 $8 \times 810\text{mm}^2$ （有人居住区）或 $8 \times 610\text{mm}^2$ ACSR 钢芯铝绞线（无人居住区），架空地线采用 $2 \times 500\text{mm}^2$ OPGW，绝缘子盘径分别为 320、340mm 和 380mm，线路所经区域最高海拔为 1000~1500m，部分线段所经区域属大雪区域，覆冰现象严重。

在 1000kV 线路的外绝缘设计中，通过采用高性能的氧化锌避雷器和带快速接地电阻的断路器，有效地降低了线路的操作过电压，使相对地最大操作过电压降低为 1.6p.u.，相间最大操作过电压降低为 2.6p.u.。在防污设计中，经实测沿线污染主要是石灰岩（硫酸钙）。一般选用 320mm 的绝缘子 40 片。在积雪严重的地区，则相应增加绝缘子片数，根据试验，塔头各部分的间隙分别确定为：导线—塔体为 6.54m，上相绝缘子—下相横担的间隙为 6m，耐张绝缘子管形跳线—横担为 5.69m，跳线—塔体为 6.75m，在最大风偏时最高运行电压的最小绝缘间隙为 3.09m。

为提高 1000kV 线路的耐雷水平，全线均采用负屏蔽角并要求塔基接地电阻降至 10Ω 以下，预计雷击次数可比 500kV 线路降低 50%。为改善电磁环境，在居住相对稠密的地区，采用 $8 \times 810\text{mm}^2$ 的导线，有效地改善了电晕性能和抗风噪声性能。对于风噪声比较突出的地区，则采用专门研制的具有抗风噪声性能的导线或 $8 \times 610\text{mm}^2$ 导线。

为保证特高压系统的可靠运行，日本建设了盐原、赤城两个特高压试验研究基地，对由多家制造商研制的特高压输变电设备在新榛名特高压变电站进行了长达 8 年的全电压运行考核。运行情况良好，证明特高压输变电设备可满足系统的可靠运行^[4-5]。

3. 美国

1967 年，通用电气公司（GE）与美国电力研究院（EPRI）开始执行特高压研究计划，并在匹兹费尔德市建立了特高压试验中心。1974 年将单相试验设备扩建为 1000~1500kV 三相系统。同年将以前对 345~1500kV 的各种单相试验成果汇编成书，并于 1975 年出版。1975 年开始利用三相系统验证以前单相试验的各项结果，并进一步研究三相线路的有关问题，如相间距离、导线排列、边相与中相采用不同分裂导线以及分裂导线中的导线不对称排列等，试验线段全长 525m。

1969 年，美国电力公司（AEP）与瑞典通用电气公司（ASEA）拟定了为期 10 年的特高压研究计划，后延长到 1983 年。试验站占地 $1.6\text{km} \times 0.8\text{km}$ ，有

915m 试验线段及 60m 长的导线试验器。美国邦维尔电力局 (BPA) 有 2 处特高压试验站: ①里昂地区, 雨雾气象条件变化复杂, 建有 1200kV 2.2km 三相电气试验线段, 1977 年 5 月开始充电使用; ②俄勒冈州莫洛附近, 建有 2km 机械性能试验线段, 可进行杆塔结构荷载、导线运动、线路金具等问题的研究。但美国没有将特高压输电的研究成果付诸于工程实践。

美国 765kV 线路继电保护的配置特点与苏联相似, 采用一个周期动作的保护, 两个周期断开的断路器、快速重合闸、断路器失灵保护以及后备保护等。装设两套主保护, 分别按不同的信号原理构成: 一套采用闭锁式信号构成的方向高频保护; 另一套采用允许式信号构成的方向高频保护。此外, 还有高频相差和后备距离保护。通道也采用两种不同原理: 闭锁式采用载波通道, 允许式采用微波通道。这样选择的原因是考虑到有冰雪时载波通道衰耗大, 而在空气中水蒸气很大时微波信号衰落很大。如果两套采用一种信号原理、一种通道, 在上述情况下不能实现完全的保护^[7]。

4. 欧洲

根据德国对 420、800kV 及 1200kV 3 种电压的输电工程的研究比较结果, 当输电距离超过 1000km 时, 1200kV 输电最为经济, 但与 800kV 相比经济上优越性不显著。此外, 输电电压越高, 线路走廊面积越小。随着输电距离的增加, 1200kV 输电的优越性更为突出。

法、意两国曾应西欧国际发供电联合会的要求, 对欧洲大陆选用 800kV 或 1050kV 输电的利弊做了比较。初步结果表明, 当输电容量为 500 万 kW, 输电距离超过 1500km 时, 采用 800kV 或 1050kV 输电比 400kV 经济。在绝大多数情况下, 800kV 和 1050kV 输电的造价相差不大。

意大利的特高压试验由国家主导, 全国各地参加 1000kV 科研规划的单位共有 7 个试验场和 2 个雷电记录站: ①苏委来托特高压试验基地进行电气和机械性能试验及变电所各种设备的试验; ②普拉达纳帕斯试验站进行导线振动和舞动试验, 并研究分裂导线覆冰荷载和间隔棒的运行特性; ③考尔塔诺试验站研究导线振动和舞动; ④布鲁亥利欧试验室进行导线和间隔棒振动试验以及绝缘子串耐热机械特性试验; ⑤布鲁亥利欧、圣·卡特利纳、鲍托马亥拉和圣高自然污秽试验站研究各种污染条件下的绝缘子特性; ⑥沙苏底帕尔和蒙代奥沙试验站进行雷电流和雷暴长期记录工作; ⑦米兰的意大利电气中心试验所进行变电所和线路设备的大电流动态试验及断路器断流试验。瑞典查麦斯大学高电压试验场可进行交流 1000kV 电气试验, 试验场内建有 240m 特高压试验线段,

另有 180m 的绝缘子试验线段。

目前，美国、俄罗斯、日本、意大利、德国、法国均具备生产特高压变压器与电抗器的能力。俄罗斯和日本已分别生产过常规的特高压断路器和气体绝缘组合电器。俄罗斯、日本、意大利、瑞典等国，已能生产特高压无间隙避雷器，技术问题已不是特高压输电发展的限制因素。

二、中国特高压交流输电技术现状

中国从 1986 年开始立项研究特高压交流输电技术，前期研究包括国内外特高压输电的资料收集与分析，内容涉及特高压电压等级的论证、特高压输电系统、外绝缘特性、电磁环境、特高压输变电设备及特高压输电工程概况等。“八五”期间又开展了“特高压外绝缘特性初步研究”，对长间隙放电的饱和性能进行了分析和探讨，对实际结构布置下导线与塔体的间隙放电进行了试验研究。1994 年，在武汉高压研究所建成了中国第一条 1000kV 特高压输电研究线段，杆塔为真型模拟拉 V 塔，三相导线水平排列，导线采用 8 分裂，分裂直径为 1.04m。为满足特高压试验的需要，1997 年开展了利用工频试验装置产生长波头操作波的研究，通过改造工频试验装置，可产生电压为 2250kV，波头时间为 2800~5000 μ s 的长波头操作波。与此同时开展了关于特高压线路对环境影响的研究，研究表明，当采用 8 分裂导线，分裂直径为 1m 时，特高压线路的地面静电感应水平与 500kV 输电线路水平基本相当，无线电干扰水平小于 500kV 输电线路，可听噪声在公众所接受的范围内。

有关专家还进行了多方面问题的研究与分析，研究涉及特高压输电线继电保护配置方案、特高压系统继电保护特殊问题、特高压输变电设备应用，以及 1000kV 特高压变压器、特高压系统的可控电抗器原理与结构、1000kV 特高压开关设备技术、1000kV 特高压避雷器、特高压电磁产品、绝缘子、绝缘技术、绝缘子串电压分布测试、冲击电压放电特性、1000kV 特高压试验线段金具的研制、工频电场、放电特性、导线基杆塔、雷击跳闸等多方面问题的研究与分析。期间共建了 4 个特高压试验基地：①特高压交流试验基地（武汉），可开展特高压长空气间隙放电试验、污秽试验、电磁环境试验及设备长期带电考核试验；②工程力学试验基地（霸州），可开展特高压杆塔、构架真型强度试验和大截面多分裂导线机械性能试验；③高海拔试验基地（西藏），海拔 4300m，是世界上海拔最高的电力试验研究基地，可满足高海拔地区输变电线路、设备绝缘和电磁环境特性研究的需要；④强电流试验站（西安）和制造厂试验室，具备进行

全套特高压设备型式试验的能力。另外建有一个国家电网仿真中心（北京），具备电力系统动态模拟、数字与模拟混合仿真、全数字仿真等功能，可开展特大型交直流复杂电网的运行控制特性研究^[6]。

2006年8月9日，国家正式核准了特高压交流试验示范工程，2009年初建成投运。工程包括三站两线，其中晋东南和荆门两站为变电站，各安装一组3000MVA的特高压变压器，南阳站为开关站，三站均采用SF₆气体绝缘全封闭组合电器，线路全长640km。2011年12月完成的扩建工程建设内容为：在晋东南站、荆门站各扩建一组3000MVA特高压变压器，南阳站扩建两组300MVA特高压变压器，配套扩建断路器等其他一、二次设备。晋东南—南阳段线路装设补偿度40%的特高压串联补偿装置，两侧各20%，南阳—荆门段线路装设40%的特高压串联补偿装置、集中布置于南阳侧。扩建后，工程具备输送500万kW电力的能力。工程投运4年以来一直保持安全稳定运行，累计向华中地区送电296.44亿kWh，向华北地区送水电122.81亿kWh，成为中国南北方向一条重要能源输送通道。特高压交流试验示范工程项目带动了中国输变电装备制造业全面升级，在世界电工领域实现了中国创造和中国引领。

2013年9月，淮沪特高压工程通过验收并投入运行，该工程对实现淮南煤电基地电力大规模外送，强交强直相互支撑、提高电网接受区外来电能力，保障浙江、上海电力可靠供应具有重大现实意义。该工程首次采用全线同塔双回架构及特高压主变压器有载调压，针对同塔双回线互感大及有载调压过程中可能出现的故障继电保护采取了有效运行管理、合理的保护配置及定值整定措施，详见后续章节。

2014年12月，浙福特高压工程通过验收并投入运行，该工程对福建水电外送提供了通道，同时提高了电网水电比例，有利于电网调频及事故情况下的快速处理。是国家电网公司第三个1000kV特高压交流工程，也是中国特高压电网进入加快发展新阶段的标志性工程。

第二节 特高压交流系统电气特征

一、特高压交流系统的线路特性

1. 分裂导线的参数特性

超高压和特高压架空输电线路均采用分裂导线。分裂导线结构以子导线数

N 、子导线半径 r 、分裂导线半径 A 或直径 D 、子导线间距 s 等几何参数表征。单位长度分裂导线的电抗 X_1 、电纳 B_1 、电阻 R_1 和电导 G_1 是分析线路电气特性的基础。对称分裂导线的 X_1 和 B_1 分别如式 (1-1)、式 (1-2) 所示。

$$X_1 = 6.28 \times 10^{-2} \ln [G_D / (N G_R A^{N-1})^{1/N}] \quad (1-1)$$

$$B_1 = (1.744 \times 10^{-5}) / \ln [G_D / (r N A^{N-1})^{1/N}] \quad (1-2)$$

式中： G_D 为三相分裂导线间距 d_{AB} 、 d_{BC} 和 d_{CA} 的几何均距； $G_R = r e^{-1/4}$ 为子导线的等效几何半径。

特高压线路的 X_1 随子导线数增加而减少，从 4 分裂导线到 6 分裂导线再到 8 分裂导线， X_1 的减少十分明显；从 8 分裂导线到 10 分裂导线， X_1 的减少相对不明显。 B_1 随子导线数增加而增加，从 4 分裂导线到 6 分裂导线再到 8 分裂导线， B_1 增加明显；而从 8 分裂导线到 10 分裂导线， B_1 增加得相对不明显。 X_1 随子导线直径增加而减少，而 B_1 随子导线直径的增加而增加。电阻 R_1 与子导线直径的平方成反比。适当增加子导线间距将减少 X_1 ，增加 B_1 。

500kV 4 分裂导线的 X_1 和 B_1 的大小处于 1000kV 6 分裂和 8 分裂导线之间。500kV 6 分裂导线的 X_1 和 B_1 的大小基本上与 1000kV 10 分裂导线相当。

线路绝缘对 X_1 和 B_1 影响表现在三相分裂导线间距对 X_1 和 B_1 的影响。图 1-1 为子导线直径分别为 30mm 和 40mm 时，8 分裂导线的 X_1 和 B_1 随相间几何均距变化的曲线。 X_1 随三相分裂导线间距的减少而明显减少，而 B_1 随三相分裂导线间距的减少而明显增加。减少分裂导线的相间距离可显著提高特高压线路的输电能力。

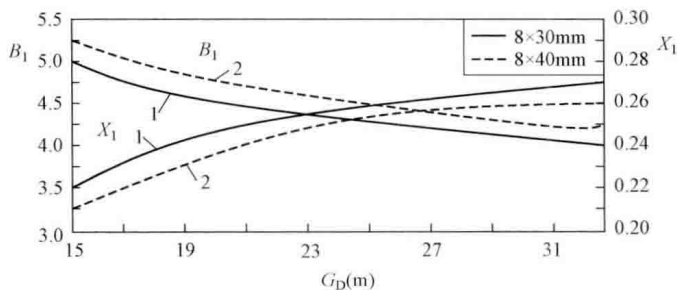


图 1-1 X_1 和 B_1 随相间几何均距变化的曲线

分裂导线相间距离受绝缘水平要求的限制。三相分裂导线间的距离由导线对塔柱的空气间隙和绝缘子串的工频闪络特性和操作波闪络特性决定。特高压杆塔窗口及其边相之间整体组合的试验表明：操作波临界闪络电压大于 1600kV

时，将出现较为明显的饱和特性；长空气间隙和长绝缘子串的工频闪络电压大于 1200~1300kV 也会出现较为明显的饱和特性。如特高压输电线路的工频过电压和操作过电压达到或高于上述数值，按绝缘配合可靠性要求，其分裂导线对杆塔塔柱的空气间隙和绝缘子串的长度增加将会比电压的升高快得多，从而使相间距离和线路电抗显著增加，电纳显著减少，使 1000kV 输电线路的输电能力达不到 500kV 输电能力的 4 倍。

2. 谐波直流分量的衰减时间

为了提高传输能力，减小其电压损耗和能量损耗，特高压输电线路必须减小单位电阻，减小漏电导，增大分布电容。1000kV 特高压输电线路与 500kV 系统电气特征的区别见表 1-1。1000kV 输电线路的单位电阻与单位电感的比值 (R/L) 明显减小，正序阻抗角达到 89° ，短路故障电流衰减时间常数 ($T=L/R$) 明显增大，约为 500kV 输电线路的 3 倍多，因此 1000kV 输电线路短路故障电流中的非周期分量的衰减要比 500kV 缓慢得多。即使在同样的故障暂态分量大小的条件下其对 1000kV 线路保护的影响要比 500kV 线路保护大的多^[8]。

表 1-1 1000kV 输电线路与 500kV 系统电气特征的区别

电压等级 (kV)	线路阻抗角 ($^\circ$)	线路分布电容电流 (/100km)	充电无功 (万 kvar/100km)	自然功率 (万)	高压并联电抗器补偿百分比	非周期分量衰减时间常数	高频分量 (Hz)
500	85.51	111	12	100	40%左右	31.8~41.4	370
1000	88.22	255	53.3	454.6	80%以上	111.5	250

3. 分布电容电流特性

长线路的分布电容会产生较大的电容电流。同时分布电容的增加使得线路故障暂态过程中产生的高频分量更加接近于工频。

由于分布电容的增加，1000kV 特高压线路发生短路故障时，相对于 500kV 线路故障电流中高频分量含量更大，衰减时间常数更大，同时高频分量的频率也更加接近于工频。图 1-2 为仿真中 1000kV 丁丙线丙侧发生故障时丁侧测量电流的频谱图。图 1-3 为故障电流高频分量频谱随着短路故障位置的变化图。

二、特高压交流系统的过电压

电力系统的过电压是指由于内部故障、断路器操作或遭受雷击，而造成瞬

时或持续时间较长的高于电网额定允许电压并可能导致电气装置损坏的电压升高。我国特高压系统具有线路距离长、输送容量大，各地电网差异性大，部分特高压线路可能经过高海拔或重污秽地区等特点。这些都使得过电压问题成为特高压系统设计中的重要问题之一^[9]。常见过电压类型有以下几种：

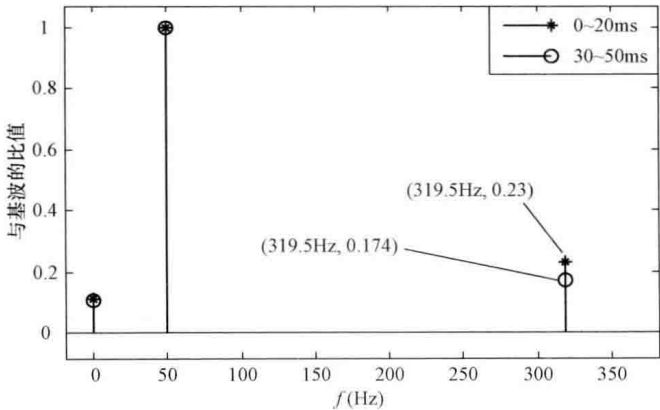


图 1-2 故障电流频谱图

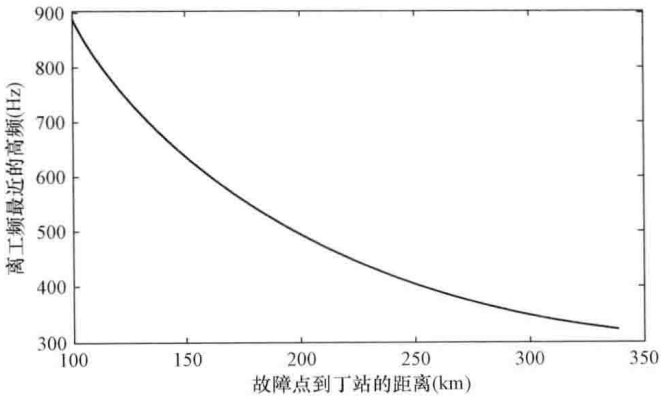


图 1-3 故障电流高频分量频率与故障点位置关系图

(1) 工频过电压：限制在 1.3p.u.以下（持续时间 $\leq 5s$ ），在个别情况下线路侧短时（持续时间 $\leq 0.35s$ ）允许在 1.4p.u.以下。

(2) 相对地统计操作过电压（出现概率为 2 的操作过电压）：对于变电站、开关站设备应限制在 1.6p.u.以下；对于长线路的线路杆塔部分限制在 1.7p.u.以下。

(3) 相间统计操作过电压：对于变电站、开关站设备应限制在 2.6p.u.以下；