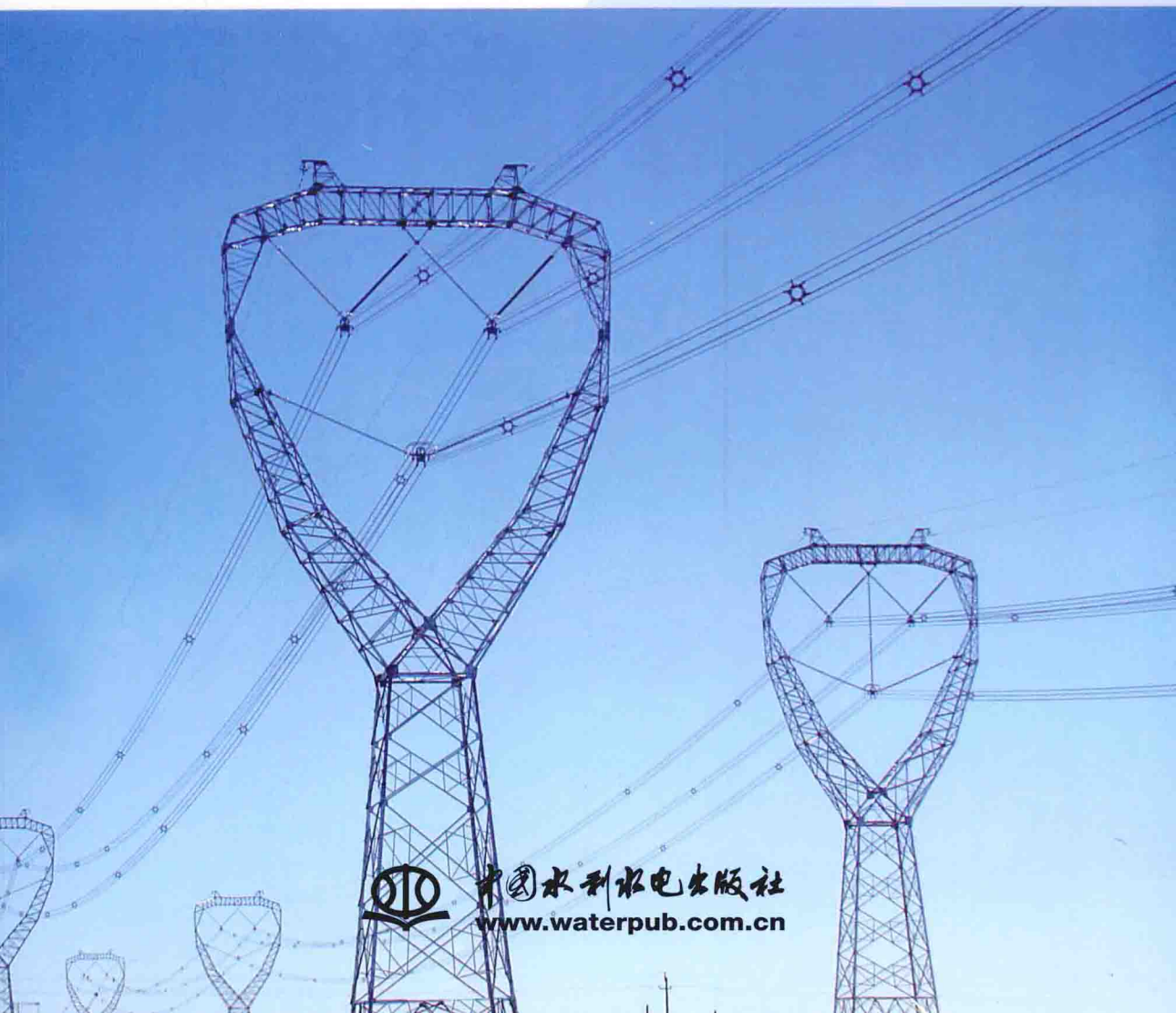


超高压输变电系统内部过电压分析 与 PSCAD/EMTDC 仿真应用

张叔禹 吴集光 曹斌 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

超高压输变电系统内部过电压分析 与 PSCAD/EMTDC 仿真应用

张叔禹 吴集光 编著
曹 斌 张 鹏

吴志敏 栗向鑫 主审
张 硕 马其燕



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书包括了超高压输变电设备及其参数特性研究,电力系统内部过电压理论分析,基于 PSCAD/EMTDC 软件的电力系统计算建模,基于 PSCAD/EMTDC 软件的超高压输变电系统内过电压仿真计算、超高压输变电系统过电压现场录波等内容。本书在内容上紧跟电力系统的技术发展,紧密围绕超高压输变电工程的建设,推陈出新,着重从电力系统的生产实际出发,理论联系实际,在传统的电力系统内过电压理论的基础上,增加了电力系统电磁暂态软件 PSCAD/EMTDC 的应用分析、现场录波分析,特别附有超高压输变电工程的内部过电压计算和录波的实例,突出了理论与实践的结合,有的放矢地进行了过电压的研究。

本书可作为电力工程类专业的本科教材和高电压与绝缘技术专业硕士研究生的教学用书、还可作为各大电力科学研究院和电力设计院的研究参考用书、各大电力培训机构的专题培训教材、PSCAD/EMTDC 软件的学习教材,亦可作为电力工程专业技术人员的技术参考书。

图书在版编目 (C I P) 数据

超高压输变电系统内部过电压分析与PSCAD/EMTDC仿真应用 / 张叔禹, 吴集光, 曹斌等编著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2014. 11
ISBN 978-7-5170-2688-4

I. ①超… II. ①张… ②吴… ③曹… III. ①超高压输电线路—过电压—电力系统计算—软件包②超高压变压器—过电压—电力系统计算—软件包 IV. ①TM726. 1-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第266467号

书 名	超高压输变电系统内部过电压分析与 PSCAD/EMTDC 仿真应用
作 者	张叔禹 吴集光 曹斌 等 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales@waterpub. com. cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 18.25 印张 433 千字
版 次	2014 年 11 月第 1 版 2014 年 11 月第 1 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	68.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

随着我国超高压和特高压电站的迅猛发展,电力系统内部过电压逐渐成为校验工程投产的重要环节。过电压与绝缘配合是电力系统中高电压技术领域的主干专业,在电力系统中占有举足轻重的地位,是处理电力系统日常生产、技术监督、设备管理、运行管理不可或缺的专业知识。本书的编写就是为了结合电力系统的生产实际和技术进步,理论联系实际,服务于电力生产、科研,达到学以致用,尽可能地反映电力系统的实际需求。

本书结合电磁暂态软件 PSCAD/EMTDC 的仿真技术,将深邃的电力系统内部过电压理论应用于超高压输变电系统工程的实际工作中,以便更好地服务于超高压电站的系统调试与调度运行工作。本书是对超高压输变电系统内部过电压分析与仿真应用的积累与实践经验教训的总结,希望它能为业内人士进行过电压及相关工作提供参考与帮助。

全书用理论联系实际的方法进行了章节间的内容编排:首先,分析超高压输变电设备的结构及其参数特性,剖析内过电压的机理;其次,结合电磁暂态软件 PSCAD/EMTDC 对超高压输变电系统建模仿真,进行系统各种方式下过电压计算;最后,通过超高压输变电工程的现场启动录波的实测数据,验证理论计算。本书的编写除了理论研究以外,其最大的指导意义在于结合了典型 500kV 超高压电站内部过电压计算与启动录波实例,具有很强的实用性。

(1) 超高压输变电设备及其参数特性研究部分,提供了超高压设备实际参数,为后续的仿真计算奠定了数据基础。

(2) 基于 PSCAD/EMTDC 软件的电力系统内部过电压计算建模部分,创新性地给出了 PSCAD/EMTDC 的 X4 版本各元件的详细建模过程,对 Source、Machines、Transformers、Transmission Line、Protection、External Data Recorders&Readers、Sequencers、PI sections 等各大元件库进行了详尽的分析;加深了对电力系统的辅助工具——电磁暂态软件 PSCAD/EMTDC 的讲解,便于读者掌握该软件的应用精髓,扩展其在电力系统各领域的应用,提高计算机建模、模拟或者预演系统的能力。

(3) 基于 PSCAD/EMTDC 的电力系统内部过电压仿真计算部分,分析了

超高压输变电工程的工频过电压、操作过电压、潜供电流和恢复电压，并在附录部分举出了基于 PSCAD/EMTDC 的 500kV 武一察同塔双回输变电工程内部过电压仿真分析、基于 PSCAD/EMTDC 的 500kV 坤一旗 I 线破口输变电工程内部过电压计算与呼和浩特抽水蓄能电站 500kV 输变电工程内部过电压计算实例，完善地给出了内部过电压的计算数据，为相关的超高压工程的系统调试提供了参考，具有极强的实用性，将理论和实践有效地结合起来。

(4) 超高压输变电系统过电压现场录波部分，创新性地给出了 500kV 庆云输变电工程现场启动录波实例，为迅猛发展的超高压电站的建设启动提供现场实测数据参考。

本书参考了目前多个版本的《电力系统过电压计算》、《过电压与绝缘配合》、《电网过电压教程》、《电力系统设计手册》和大量的论文资料，并在编者多年的实际工作经验的基础上，整合了编者近年来的科研成果，吸收了国内外在高电压技术领域的研究成果，还参考了国内外大量的相关教材、专著和研究文献。

本书由内蒙古电力科学研究所所长张叔禹、副院长吴集光、高压所曹斌和张鹏编著，内蒙古电力科学研究院吴志敏、国家电网华北电力调控分中心栗向鑫和张硕、中国电力科学研究院马其燕主审。内蒙古电力科学研究院姚树华、邓昆玲参与了书籍的相关章节审核修订工作；内蒙古电力科学研究院高压所车传强、付文光、赵建利、燕宝峰、白全新、陈波、刘世欣、张慧芬、于鲜莉等参与了书籍的相关章节编写工作，内蒙古科技大学的研究生杨建、侯英洒、王国平进行了大量的书稿校核工作。

在本书编写过程中，内蒙古电力科学研究院规划所郭厚静、张爱军、樊海龙、程晓磊提供了 BPA 等值和潮流基础数据，继保所陶军、韩俊飞、乔彩霞，试验中心刘锋、魏冰凌、刘瑞等提供了现场调试帮助；同时，本书的编写还得到了国家电网华北电力调控分中心、华北电力科学研究院、中国电力科学研究院等电力部门相关专业技术人员的帮助和支持，在此一并表示诚挚的感谢。

由于编著者水平有限，再加上成书时间仓促，书中错误和不足之处在所难免，欢迎广大读者批评指正。

编著者

2014 年 8 月



目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 超高压输变电工程建设与发展	1
第二节 超高压输变电系统内部过电压仿真计算的必要性	2
第三节 超高压输变电系统内部过电压计算的发展与应用	4
第二章 超高压输变电设备及其参数特性	7
第一节 输电线路技术基础及其参数	7
第二节 变压器技术基础及其参数	21
第三节 断路器技术基础及其参数	37
第四节 互感器技术基础及其参数	52
第五节 电容器和电抗器技术基础及其参数	59
第六节 避雷器技术基础及其参数	64
第三章 电力系统内部过电压理论分析	68
第一节 工频过电压	69
第二节 谐振过电压	78
第三节 弧光接地过电压.....	90
第四节 空载线路的切除和合闸过电压	95
第五节 中性点接地方式对内部过电压的影响	102
第四章 基于 PSCAD/EMTDC 软件的电力系统计算建模	105
第一节 PSCAD/EMTDC 软件概述及其基本设置	105
第二节 电源建模分析	115
第三节 变压器建模分析	117
第四节 输电线路建模分析	121
第五节 发电机、电动机、风机建模分析	138
第六节 控制元件建模分析	153
第七节 序列元件建模分析	159
第八节 测量元件建模分析	160
第九节 数据/阅读元件建模分析	162
第十节 保护元件建模分析	165

第五章 基于 PSCAD/EMTDC 软件的超高压输变电系统内部过电压仿真计算	171
第一节 电力系统的简化与等值	171
第二节 工频过电压仿真计算	176
第三节 操作过电压仿真计算	181
第四节 潜供电流与恢复电压的仿真计算	188
第六章 超高压输变电系统过电压现场录波	205
第一节 录波软件介绍	205
第二节 超高压输变电工程录波实例分析一 (500kV 庆云输变电工程调试录波实例 ——500kV 丰—庆 I 线、汗—庆 I 线线路启动及合环试验录波报告)	214
第三节 超高压输变电工程录波实例分析二 (500kV 庆云输变电工程调试录波报告 ——500kV 庆云站 2 号主变投切试验调试报告)	226
附录 A 基于 PSCAD/EMTDC 的 500kV 武—察同塔双回输变电工程内部 过电压仿真分析	245
附录 B 基于 PSCAD/EMTDC 的 500kV 坤—旗 I 线破口输变电工程内部 过电压计算	257
附录 C 呼和浩特抽水蓄能电站 500kV 输变电工程内部过电压计算	269
参考文献	281

第一章 绪 论

第一节 超高压输变电工程建设与发展

电力工业是社会发展的基础性产业,担负着支撑国民经济发展和保障人民生活用电的重要责任。国家在电网建设规划中强调推进“西电东送,南北互供,全国联网”;加强区域联网,形成同步电网,实现更大范围的资源优化配置;加强西电东送力度,加大各区域电网和省电网的主干网架建设,重点发展跨省、跨区域输电和联网线路。

我国是电能的生产和使用大国,地域广阔,发电资源分布和经济发展极不平衡。全国可开发的水电资源近 $2/3$ 在西部的四川、云南、西藏;煤炭保有量的 $2/3$ 分布在山西、陕西、内蒙古。而全国 $2/3$ 的用电负荷却分布在东部沿海和京广铁路沿线以东的经济发达地区。西部能源供给基地与东部能源需求中心之间的距离可达到 $2000\sim 3000\text{km}$ 。我国发电能源分布和经济发展极不均衡的基本国情,决定了能源资源必须在全国范围内优化配置。只有建设超高压电网,才能适应东西 $2000\sim 3000\text{km}$ 、南北 $800\sim 2000\text{km}$ 远距离、大容量电力输送需求,促进煤电就地转化和水电大规模开发,实现跨地区、跨流域的水电与火电互济,将清洁的电能从西部和北部大规模输送到中、东部地区,满足我国经济快速发展对电力的需求。

20世纪70年代,考虑我国电源的规划布局、发展速度、电力输送距离、电压等级间相差倍数、国外电压等级发展经验、设备研制、运行经验及国内制造的可能性等因素,最后确定了 500kV 电压等级。我国 500kV 交流电网的发展历程如下。

1981年,我国建成平(顶山)—武(昌)第一条 500kV 线路,启动了跨省、超高压电网建设的进程。1993年, 500kV 天—广(广西天生桥至广东罗洞)一回交流输电线路投运,其变电站布置了国内首次采用的 500kV GIS配电装置和特殊的三相组合变压器,使变电站的占地面积仅为敞开式的 10% ,大大减少了土建工程量,缩短了安装周期,提高了运行可靠性,创造了显著的经济效益。天生桥二级水电站 500kV 变电站的建成投运,使广东、广西、贵州、云南四省(自治区)电网相互连接而形成南方互联电网,从而增强了电网抵御事故的能力,提高了电网的供电质量和可靠性。该电站已成为南方互联电网中的主要枢纽变电站,将云南、贵州丰水期多余的电能送往缺电的广东,使西电东送变为现实。而枯水期,天生桥水电站又通过 500kV 输变电向云南送电,缓和云南省冬季缺电的局面。2001年5月,华北与东北电网通过 500kV 高姜线(高岭—姜家营)实现了第一个跨大区交流联网。2001年11月,华东与福建电网通过福—双(福州—双龙)Ⅰ线交流联网,标志着福建与华东电网互联的开始。2002年5月, 500kV 万龙线(四川万县—湖北龙泉)投运,实现了川渝与华中电网联网。2003年6月,贵广(贵州—广东) 500kV 双回工程投产,打通了贵州西电东送第一条通道。2003年9月, 500kV 辛—洹线投运,实



现华中与华北电网联网,形成了由东北、华北、华中、川渝电网构成的交流同步电网。2005年3月,山东与华北电网通过500kV输电线路联网。2014年4月,蒙西电网建成了武川—察右中—汗海—沽源的500kV主干网架北通道,再次加强了与华北等电网的联系,将蒙西电网的丰富电能源源不断外送。

目前,全国已经形成了北、中、南三大输电通道:北通道目前已经形成由山西、蒙西向京津唐和河北电网输电的9回500kV线路;中通道由两条 $\pm 500\text{kV}$ 直流线路、一条 $\pm 800\text{kV}$ 直流线路将三峡、川渝、华中电网的电力输送到华东地区;南通道已经形成“三交两直”五条送电通道,将云南、贵州、广西三省(自治区)的电力输送到广东。

全国各大区域电网之间联网线路已经逐渐形成了“四交四直”八条联网线路,即连接华中、华东的两条 $\pm 500\text{kV}$ 超高压直流线路,一条 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流线路;连接东北、华北的500kV双回超高压交流线路,连接华北、华中电网的一条500kV超高压交流线路和一条1000kV的特高压交流线路,连接华中与南方电网的一条 $\pm 500\text{kV}$ 超高压直流线路。全国联网的规模和交流同步网的规模都取得了辉煌的成就,我国“西电东送,南北互供,全国联网”的格局也逐渐形成。

500kV超高压在投入使用初期出现了一些问题,但随着对这一电压认识的逐步深入,这些问题都得到了很好的解决。在电力发展的历史长河中,500kV电压等级输电网络起到了极其重要的作用,并将在以后的电网格局中发挥重要作用。

综上所述,500kV超高压电网发展迅猛,发挥着极其重要的作用,然而由于电压等级较高,电力系统中各种绝缘在运行中除了长期受较高等级工作电压作用外,还会受到各种数倍于工作电压的内部过电压作用,因此会对系统的绝缘造成很大的影响,甚至导致事故的发生,所以必须加强对内部过电压的重视和计算。对于500kV输变电工程而言,加强内部过电压计算有着非常重要的理论意义和实践指导价值:可以为掌握系统的绝缘水平及安全可靠运行提供分析依据;为满足投产前系统调试的需要和更好地确定调试与启动方案做前期参考;为二次设备定值设置、过电压保护装置选择及工程实施提供理论依据。可见,超高压输变电系统内部过电压分析随着工程的建设与发展显得越来越重要了。

第二节 超高压输变电系统内部过电压仿真计算的必要性

随着电网的快速发展,500kV输电线路逐渐成为电网的主干网架,因此对电网的可靠性和电气绝缘提出了较高的要求。然而,由于500kV输电线路电压等级高、输送距离远等特点,在线路末端会出现工频电压的升高,如果保护不当,将会使工频电压升高到超过电气绝缘的承受能力,从而造成很大的事故,对电网的安全和国民经济的发展带来非常不利的影响。另外,断路器的频繁分合闸操作也会给线路带来很大的操作过电压,它所引起的危害比工频过电压的危害还大,所以必须对引起过电压的原因加以重视,并且采取一系列有效的措施限制过电压的幅值和发生的几率。

电力系统内部过电压是500kV电网必须研究的重要课题,它不仅影响变压器、断路器、输电线路等电力设备绝缘强度的设计,而且还直接关系到电力系统是否能够安全稳定地运行。500kV输电线路参数以及系统容量的特点使得其内部过电压比一般高压线路更



为严重。因此，内部过电压是 500kV 超高压输电技术的关键问题，也是 500kV 超高压输电线路设计的决定性因素。由于超高压输电线路绝缘子能够承受的过电压裕度较低，而发生 overvoltage 造成绝缘子击穿就必须更换绝缘子，这给电力系统造成的综合经济损失是非常巨大的。因此，在超高压线路建设初期就必须考虑如何限制内部过电压。内部过电压计算对超高压输变电系统具有十分重要的意义，内部过电压仿真计算的必要性如下：

(1) 内部过电压计算是提高超高压输变电系统可靠运行的重要依据。电力系统供电的可靠性是由在一定时间内（如一年）中断用户供电的次数和持续时间来判断的。可靠性在很大程度上取决于电力系统的冲击特性，因为有很多原因可能导致供电的中断，但绝缘击穿却是最常见的。如果系统绝缘只承受正常的运行电压，就不会有什么问题。因为正常运行电压只在很小的范围内变化（ $\pm 5\%$ ），但实际上绝缘却要承受各种过电压的袭击。各种过电压的波形、幅值和持续时间均不相同，变化范围很大，这些不同参数影响绝缘承受过电压的能力。要使绝缘承受可能产生的最大过电压往往是不可能的，除技术方面的限制之外，更重要的是经济方面的制约，所以内部过电压计算是提高超高压输变电系统可靠运行的重要依据。

(2) 内部过电压计算是超高压输变电工程系统调试的重要保证。超高压输变电工程基建完毕，启动之前，通过内部过电压计算，可以对调试过程中空充线路的容升效应所产生的过电压进行计算，这是保证线路末端不超过规程规定电压的重要手段，若末端电压超出绝缘耐受极限，可以通过计算控制首端母线电压的方法，防患于未然。利用仿真计算可以有效地模拟各种工况，包括最严格的运行方案和系统调试的各种运行极限，有效地解决了调试过程中内部过电压问题的困扰。所以，内部过电压计算是超高压输变电工程启动调试的重要保证。

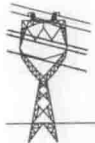
(3) 内部过电压计算是超高压输变电工程制定控制电压极限的重要手段。超高压输变电系统在正常运行、检修方式下，若系统出现甩负荷或者单相接地故障，系统的电磁暂态过程、电压、电流等重要参数变化，可以利用仿真计算出来，针对各种具体的运行工况，制定必要的运行控制电压极限，从而为调度运行提供参考。

(4) 内部过电压计算是考核超高压输变电系统设计是否合理的重要方法。在超高压输变电系统设计阶段，需要进行内部过电压计算，对线路和母线高抗容量配置是否合理，系统是否存在过补偿，地刀开合静电感应电压和电流的能力，断路器是否需要配置合闸电阻，同塔双回线路静电耦合电压和电流，互感参数等诸多方面进行考核校验，从而有效地利用计算机仿真技术，结合工程实际，进行内部过电压计算成为了考核超高压输变电系统设计是否合理的重要一环。

(5) 内部过电压计算是对超高压输变电系统各种运行方式下设备过电压与绝缘配合是否合理的重要考核手段。

(6) 内部过电压计算是检验超高压输变电系统在调试方式、正常方式、检修方式下工频过电压、操作过电压是否符合规程规定的重要环节。潜供电流和恢复电压计算是整定重合闸时间的重要依据，是考核系统电弧能否重燃的重要参考。

(7) 内部过电压计算可以查明各种过电压的幅值、波形、频率、持续时间以及当过电压从源点向某设备运动过程中这些参数所发生的变化。



(8) 内部过电压计算可以确定使用中各种绝缘在这些过电压作用下的耐压特性,使绝缘强度与所受到的过电压相适应。

综上所述,内部过电压计算对超高压输变电系统具有十分重要的意义,是校核超高压输变电工程基建设计是否合理的必要手段,是校验工程能够正常启动和安全投运的必要方法,是检验工程启动投运后,正常以及各种检修方式下过电压与绝缘配合是否匹配的的必要手段。

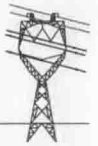
第三节 超高压输变电系统内部过电压计算的发展与应用

我国电网发展很迅速,早在 20 世纪 80 年代就开始发展 500kV 超高压输电。随着电网电压等级的升高,电网规划设计及输变电工程设计所涉及的系统问题也有了很大的变化。35~110kV 电网主要是潮流、短路电流问题,220kV 电网就增加了稳定问题,电压升到 500kV 就必须考虑其内部过电压计算的问题。现在电网已经进入了大容量、超高压、远距离的输电时代,内部过电压计算越来越受到人们的重视。世界各国包括我国清华大学、浙江大学、中国电力科学研究院、国网电力科学研究院(原武高所)等在内的院校和研究机构对内部过电压的形成机理、模型建立、仿真计算和防护限制都做了深入细致的研究,取得了很多成果,如蒙特卡洛法模拟统计操作过电压、过电压计算中应用快速傅里叶变换、在断路器上增加分合闸电阻和利用避雷器限制操作过电压等。

20 世纪 60 年代以来,对过电压的数值计算先后提出了多种不同的计算方法,不同之处主要体现在对分布长线的处理方法上,如行波法、差分法、拉普拉斯变换法以及用集中的 T 型和 II 型链代替分布参数长线的方法等。

1. 输变电系统建模的发展历程

输变电系统建模发展历经变迁,由于传输线的重要性,传输线理论一直是个很活跃的研究领域,主要包括传输线特性、不连续性、不同传输线之间的变换等方面的研究。很长一段时间以来,对于电磁暂态研究来说,建立传输线模型时最重要的方面之一就是考虑参数的频变特性,这方面的研究也始终未间断过。最早人们所采用的行波算法是由 Bewley 于 1933 年首创的网络法,由于这种方法对步长限制很大,非线性元件的模拟也较难实现,使得实际计算非常复杂,从而并未得到广泛的应用,现在仿真中也很少采用。20 世纪 70 年代以来,许多学者都对频变参数线路暂态计算的问题进行了研究,并建立了一些考虑参数频变特性的传输线暂态模型。早期由 Budner 提出的线路导纳权函数法(导纳配置法)是取代线路的电流冲激响应中作为基元过程,通过卷积计算以求解频变参数线路的暂态过程。不过在此模型中权函数有很高的振荡性,并且很难精确估计,这一方法由于计算方面的弱点未被普遍应用,但是它的物理意义有助于理解频变传输线的暂态过程。Snelson 介绍了在时域应用 Bergeron 简化波动方程的解释来获得关联电压、电流的变量代换。Snelson 行波法的主要思路是将线性阻抗看作是一个不随频率变换的常数,然后再加权处理前行波和反行波分量来求解频变参数的电磁暂态过程。应用这一行波对前、反行波权函数进行卷积运算要比采用导纳权函数简单,且效果好,但该法在低频时会影响权函数的计算精度。Meyer 和 Dommel 进一步提高了前、反行波权函数的概念,所得加权函数公式的表示



法比其他加权函数法有了很大的改进，并且已在许多暂态研究中得出了可靠结果。然而，该方法要求计算积分每一步长上的值而导致运行时间较长，而且用卷积积分计算加权函数的尾部值很困难。这些早期方法都存在两个较大的缺陷：一是需要计算许多个卷积积分；二是加权函数的振荡难以确定。Semlyen 用指数函数对线路阶跃响应及脉冲导纳响应进行了拟合，并利用插值法将卷积运算简化为当前输入值及其历史值可以获得的递归公式，大大节省了计算时间。随着计算机技术的不断发展，简捷又相当精确的数字仿真技术也得到了不断发展，线路暂态仿真研究取得了大量成果。J. Mart 在这方面取得了较大的进展，建立了更有效的模型。J. Mart 模型不但发展了 Semlyen 的思想，而且后来也被应用到电磁暂态计算程序 (EMTP) 中。该模型实质上就是将模拟滤波技术应用于求解频变参数线路，据此建立的线路模型仍具有 Bergeron 线路模型的基本形式，便于和电磁暂态计算通用程序连接，能得到较好的效果，计算速度也大大加快了，但对特性阻抗或导纳函数的拟合精度均不高，在低频范围内更是如此。F. Castellanos 与 H. V. Nguyen 在 J. Mart 和 Dommel 的基础上，开发了频变传输线路的相域模型，避免了变换矩阵的递归卷积计算，提高了模型的效率。Bjorn Gustavsen 等人开发了矢量匹配算法，建立了通用的架空输电线路与电缆模型。电磁暂态计算中不断出现新的频变参数传输线模型及其处理方法，且各有其特点。

2. 仿真软件的应用

电力系统是一个大规模、时变的复杂系统，在国民经济中有非常重要的作用。电力系统数字仿真已成为电力系统研究、规划、运行、设计等各个方面不可或缺的工具，特别是电力系统新技术的开发研究、新装置的设计、参数的确定更是需要通过仿真来确认。

目前常用的电力系统仿真软件有：

(1) 邦纳维尔电力局 (Bonneville Power Administration, BPA) 开发的 BPA 软件和 EMTP (Electromagnetic Transients Program) 软件。

(2) 曼尼托巴高压直流输电研究中心 (Manitoba HVDC Research Center) 开发的 PSCAD/EMTDC (Power System Computer Aided Design/Electromagnetic Transients Program including Direct Current) 软件。

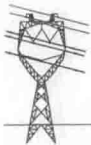
(3) 德国西门子公司研制的电力系统仿真软件 NETOMAC (Network Torsion Machine Control)。

(4) 中国电力科学研究院开发的电力系统分析综合软件 PSASP (Power System Analysis Software Package)。

(5) MathWorks 公司开发的科学与工程计算软件 MATLAB (Matrix Laboratory, 矩阵实验室)。

电力系统分析软件除了以上 6 种，还有美国加州大学伯克利分校研制的 PEPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)、美国 PTI 公司开发的 PSS/E、美国 EPRI 公司开发的 ETMSP、ABB 公司开发的 SYMPOW 程序和美国 EDSA 公司开发的电力系统分析软件 EDSA 等。

以上各个电力系统仿真软件的结构和功能不同，它们各自的应用领域也有所侧重。EMTP 主要用来进行电磁暂态过程数字仿真，PSCAD/EMTDC、NETOMAC 主要用来



进行电磁暂态和控制环节的仿真，BPA、PSASP 主要用来进行潮流和机电暂态数字仿真。

对于内部过电压的仿真计算而言，目前广泛使用的软件是电磁暂态仿真软件 EMTP 或者 PSCAD/EMTDC，它们可以模拟电源、电机、变压器、断路器、集中参数元件、分布参数元件以及控制系统等灵活组合成的任意系统，从而方便进行内部过电压的计算与仿真，记录所需的数据，并且可以有意识地改变某些参数，从而可以对影响内部过电压的一些参数进行定量的分析。我国 1981 年引入 EMTP 和 PSCAD/EMTDC，并应用于许多项目建设之中，特别是在超高压输变电工程中应用非常广泛，对电力系统的发展和安全起了非常重要的作用。由于内部过电压计算对 500kV 输变电工程的启动、调试以及绝缘保护等有着非常重要的意义，所以得到了广泛的应用，对于每一个将要投入的系统“逢投必算”。对引起工频电压升高、操作过电压和谐振过电压的各个因素分别进行计算，为绝缘设置提供参考，也为保护提供依据。

3. 本书为研究电力系统内部过电压所做的主要工作

(1) 第一章：绪论，简要介绍了超高压输变电系统内过电压计算的必要性、发展与应用。

(2) 第二章：超高压输变电设备及其参数特性，介绍了超高压输变电设备及其参数特性，对输电线路、变压器、断路器、互感器、电容器、电抗器和避雷器等设备的性能与参数进行研究分析，为后续的建模仿真提供数据基础。

(3) 第三章：电力系统内部过电压理论分析，从理论角度分析了因空载长线电容效应、不对称短路、甩负荷引起的工频过电压；因分合闸产生的操作过电压；因铁磁谐振、线性谐振等引起的谐振过电压，深入分析了各种过电压产生的机理与影响因素，为过电压计算奠定了深厚的理论基础。

(4) 第四章：基于 PSCAD/EMTDC 软件的电力系统计算建模，该章介绍了电磁暂态软件在仿真中的应用，讲解了 PSCAD/EMTDC 的 X4 版本各元件的详细建模过程，对 Source、Machines、Transformers、Transmission Line、Protection、External Data Recorders&Readers、Sequencers、PI sections 等各大元件库进行了详尽的介绍，对电源、变压器、发电机、电动机、风机、序列元件、测量、保护元件的参数设置、模型搭建进行深入分析，为读者奠定了深厚的建模基础。

(5) 第五章：基于 PSCAD/EMTDC 软件的超高压输变电系统内部过电压仿真计算，建模分析了工频、操作过电压，潜供电流和恢复电压，并在附录部分给出了工程计算实例——基于 PSCAD 的 500kV 武一察（武川到察右中）同塔双回输变电工程内过电压仿真分析、基于 PSCAD/EMTDC 的 500kV 坤一旗 I 线破口输变电工程内部过电压计算与呼和浩特抽水蓄能电站 500kV 输变电工程内部过电压计算实例，完善地给出了内部过电压的计算数据，为相关的超高压工程启动提供了参考，将理论和实践有效地结合起来，具有极强的实用性。

(6) 第六章：超高压输变电系统过电压现场录波，创新性地给出了 500kV 庆云输变电工程现场启动录波实例，为迅猛发展的超高压电站的建设启动提供现场实测数据参考，是验证仿真计算正确性的重要方法。

第二章 超高压输变电设备及其参数特性

第一节 输电线路技术基础及其参数

电力系统中, 电厂大部分建在动力资源所在地, 如水力发电厂建在水力资源点, 即集中在江河流域水位落差大的地方; 火力发电厂大都集中在煤炭、石油和其他能源的产地; 而大电力负荷中心则多集中在工业区和大城市, 因而发电厂和负荷中心往往相距很远, 就出现了电能输送的问题, 需要用输电线路进行电能的输送。输电线路是电力系统的重要组成部分, 它担负着输送和分配电能的任务。输电线路有架空线路和电缆线路之分; 按电能性质分类有交流输电线路和直流输电线路; 按电压等级有输电线路和配电线路。输电线路电压等级一般在 35kV 以上, 目前我国输电线路的电压等级主要有 60kV、110kV、220kV、330kV、500kV、1000kV 交流和 $\pm 500\text{kV}$ 、 $\pm 800\text{kV}$ 直流。其中, 在交流电压等级中, 通常将 330kV 及以上、1000kV 以下称为超高压; 1000kV 及以上称为特高压; 在直流电压等级中, $\pm 800\text{kV}$ 及以上称为特高压。

一般来说, 线路输送容量越大, 输送距离越远, 要求输电电压就越高。担负分配电能任务的线路称为配电线路。我国配电线路的电压等级有 380/220V、6kV、10kV、20kV、35kV 等。超高压输电是实现大容量或远距离输电的主要手段, 也是目前输电技术发展的主要方向。

一、输电线路杆塔

杆塔 (Supporting Structure of Transmission Line; Pole & Tower) 是支承架空输电线路导线和架空地线并使它们之间以及与大地之间保持一定距离的杆形或塔形构筑物。世界各国线路杆塔多采用钢结构、木结构和钢筋混凝土结构。通常对木质和钢筋混凝土的杆形结构称为杆, 塔形的钢结构和钢筋混凝土烟囱形结构称为塔。不带拉线的杆塔称为自立式杆塔, 带拉线的杆塔称为拉线杆塔。输电线路常见的杆塔类型如图 2-1 所示, 主要有猫头型塔、酒杯型塔、拉线门型杆、拉线门型塔、拉线 V 型塔、干字型塔、拉线单杆和桶型塔等。

输电线路杆塔有两种分类方法: ①按其不同的用途和功能划分为不同的类别; ②按其不同的外观形状划分为不同的型式。

(一) 根据输电线路杆塔用途和功能划分

输电线路杆塔根据用途和功能划分可以分为直线杆塔、耐张杆塔、转角杆塔、终端杆塔、换位杆塔和跨越杆塔六种, 简述如下。

1. 直线杆塔

直线杆塔是支承导线、架空地线的重力以及作用于它们上面的风力, 而在施工和正常运行时不承受线条张力的杆塔, 直线杆塔如图 2-2 所示。其功能为: 仅在线路中起悬挂导、地线

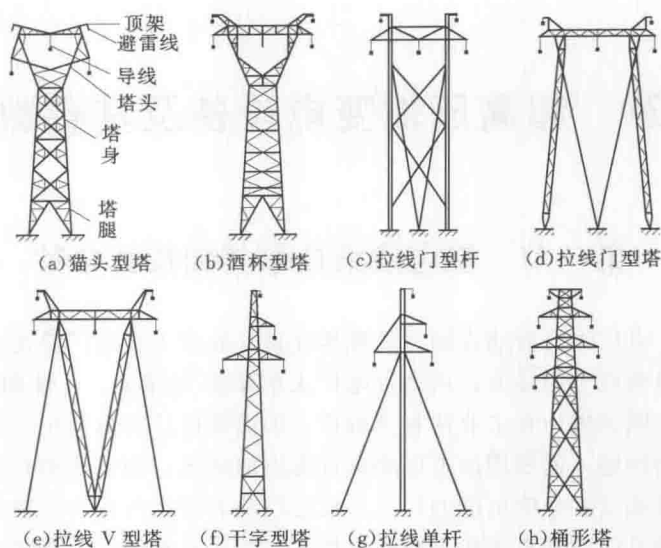


图 2-1 常见杆塔示意图

的作用。其主要特点是：导线、地线在直线杆塔处不开断，正常运行时不承受线条张力。

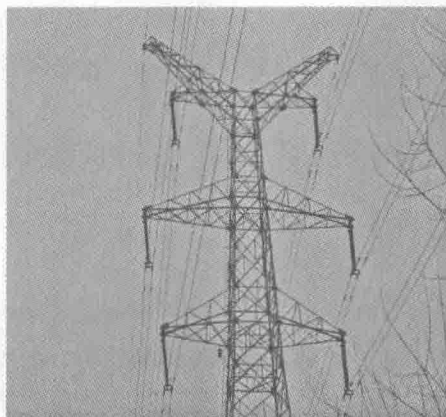


图 2-2 直线杆塔实物图

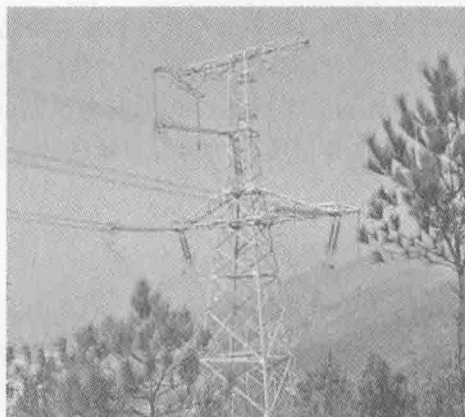


图 2-3 耐张杆塔实物图

2. 耐张杆塔

耐张杆塔是除支承导线和架空地线的重力和风力外，还承受这些线条张力的杆塔，耐张塔两侧导线需要用跳线连接，如图 2-3 所示。其功能为：控制线路连续档长度，便于线路施工和维护，控制杆塔沿线路纵向可能发生串倒的可能。主要特点是：导线、地线在耐张杆塔处开断，杆塔承受线条张力。

3. 转角杆塔

转角杆塔是支承导线和架空地线的张力，使线路改变走向形成转角的杆塔，如图 2-4 所示。其功能为：支持导、地线张力，改变线路走向。主要特点是：导线、地线开断为耐张转角杆塔，不开断为悬垂转角杆塔。

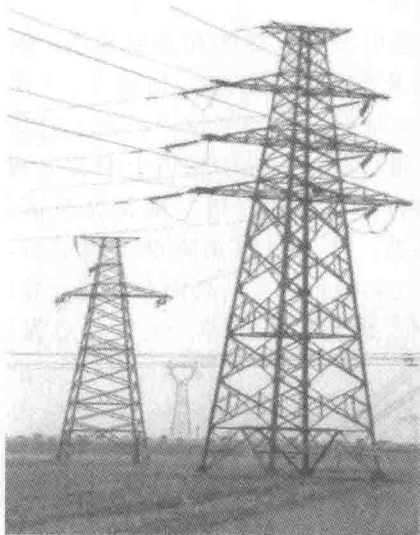


图 2-4 转角杆塔实物图

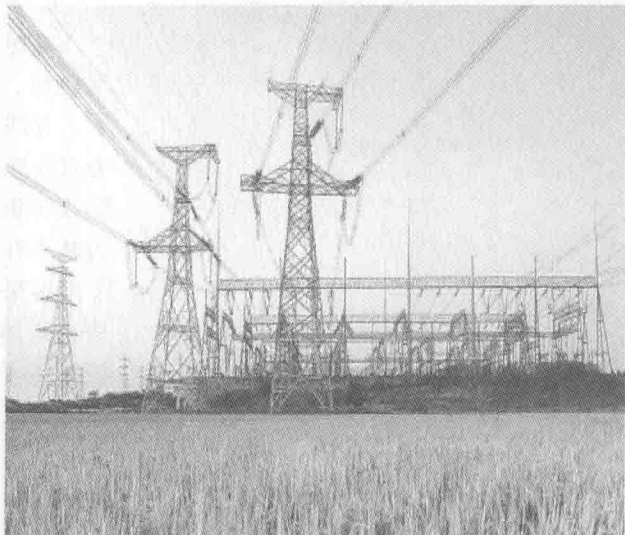


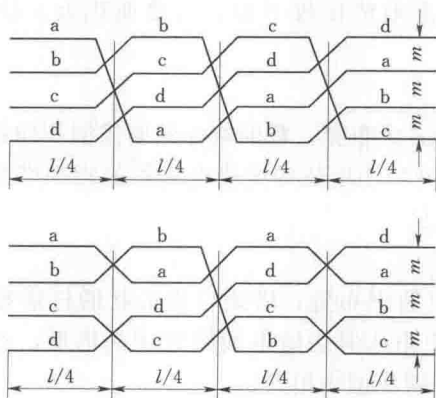
图 2-5 终端杆塔实物图

4. 终端杆塔

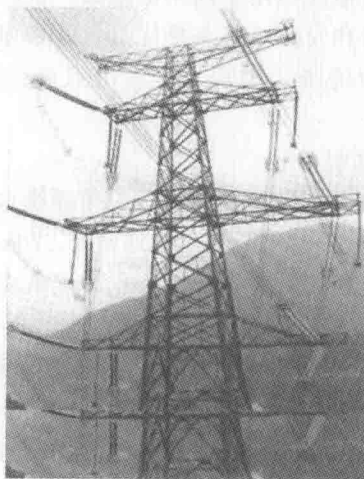
终端杆塔是线路起始或终止的杆塔，终端杆塔定位于变电厂或变电所的配电装置门型构架前，如图 2-5 所示。其功能为：线路起始或终止处的杆塔。主要特点是：线路一侧导线、地线耐张连接在终端杆塔上，另一侧不架线或以小张力与门型号构架相连。

5. 换位杆塔

换位杆塔是用来改变线路中三相导线排列位置的杆塔，如图 2-6 所示。其功能为：改变线路中三相导线的相互位置，减小电力系统正常运行时电流和电压的不对称。主要特点是：导线不开断称为直线换位杆，导线开断称为耐张或转角换位杆。



(a) 杆塔换位原理



(b) 实物

图 2-6 换位杆塔
 l —线路长度； m —档距

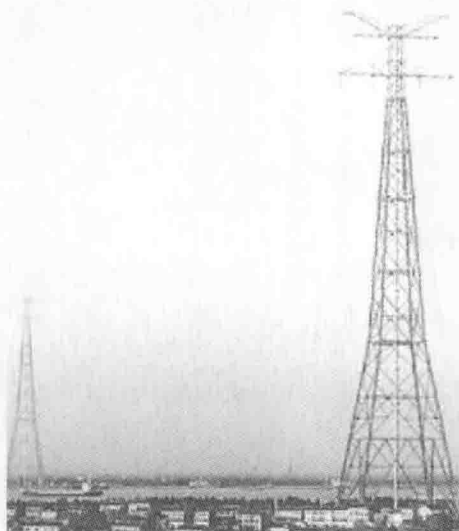
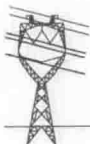


图 2-7 跨越杆塔实物图

6. 跨越杆塔

跨越杆塔是用来支承导线和架空地线，跨越江河、湖泊及海峡等的杆塔，如图 2-7 所示。导线及架空地线不直接张拉于杆塔上时称为直线跨越杆塔，直接张拉于杆塔上时称为耐张或转角跨越杆塔。跨越杆塔一般都比较高。为减小杆塔承载，节省材料及降低工程造价，一般多采用直线跨越杆塔。其功能为：支承导线、地线跨越江河、湖泊、海峡等。主要特点是：杆塔高，载荷大。多采用直线跨越杆塔。例如，500kV 江阴长江大跨越工程跨越塔全高 346.5m，跨越档距 2303m，横担总长 77m，铁塔底部根开达 68m，结构轻巧，外形美观。

(二) 根据外观形状划分

输电线路杆塔根据形状划分可分为拉线塔和自立塔两种基本型式。常用的拉线塔有拉线 V 型塔、拉线门型塔、拉线猫头型塔和悬索塔（单基质量指标最低的塔型）等。自立塔分为单回路自立塔和双回路自立塔。常见的单回路自立塔有酒杯型、猫头型、干字型和门型等。双回路自立塔多采用垂直排列的三层横担或四层横担的鼓型塔、伞型塔和倒伞型塔。

1. 拉线塔

拉线塔是门型杆塔的特例，常用于 500kV 的输电线路，在 220kV 输电线路中也有少量使用，它具有施工方便，耗钢量低于其他拉线门型塔等优点；但它占地较大，在河网及大面积机耕地区使用受到一定限制。这种塔型在国外还使用于人烟稀少的地域，便于利用直升机吊运和安装。其主要优点是：单基质量只有自立塔的 70% 左右，降低了线路本体造价，受力清晰，结构合理。缺点是：要求地势比较平坦，占地面积大。拉线塔如图 2-8 所示。

2. 酒杯型塔

塔上架设两根架空地线，三相导线水平方式布置、塔的整体轮廓像酒杯的铁塔称为酒杯型塔，如图 2-9 所示。它通常是 220kV 及以上电压等级输电线路的常用塔型，有良好的施工运行经验，特别适用于重冰区或多雷区。

3. 猫头型塔

塔上架设两根架空地线，导线呈等腰三角形布置，塔型呈猫头状的杆塔称为猫头型塔，如图 2-10 所示。它也是 220kV 及以上电压等级输电线路常用的塔型，有良好的施工运行经验，节省线路走廊，其经济指标较酒杯型塔稍差。

猫头型塔与酒杯型塔的比较：①猫头型塔中相线抬高，塔高和塔重增加；②猫头型塔水平线间距比酒杯型塔小，所占线路走廊较窄，线路宽度较小；③猫头型塔线路走廊上场强均匀，地面电场强度也较酒杯型塔小。