

电气卷

上

ELECTRIC POWER

电力工程师手册

国家电力公司东北公司 编
辽宁省电力有限公司

ENGINEERING
HANDBOOK



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

1992

电气卷

上

国家电力公司东北公司
辽宁省电力有限公司



www.cepp.com.cn

ELECTRIC
POWER
ENGINEER
HANDBOOK

电力工程师手册

电气卷

下

国家电网公司东北公司 编
辽宁省电力有限公司



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书系统地介绍了电力工程师所应掌握的知识。全书共分8篇44章,包括电力系统、发电、输变电、电力系统过电压、继电保护、供电、用电、计量等内容,全面介绍了电力系统各方面的知识。

本书可供电力系统工程技术人员阅读和参考,也可供高等院校师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

电力工程师手册. 电气卷/东北电力集团公司编. -北京:中国电力出版社,2000

ISBN 7-5083-0218-4

I. 电... II. 东... III. 电力工程-手册 IV. TM7-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 07291 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

实验小学印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2002年3月第一版 2002年3月北京第一次印刷
787毫米×1092毫米 16开本 95.5印张 3176千字
印数0001—4000册 上、下册定价 202.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

《电力工程师手册》

编辑委员会名单

主任委员:张贵行

副主任委员:王禹民 黄其励

委 员:王世颖 栾 军 李如扬

王芝茗 蒋健民 金玉声

王世阁 赵吉武 王吉祥

高元楷 张经武 赵常兴

《电力工程师手册(电气卷)》

编委会名单

主 编:黄其励

副主编:高元楷 王世颖 栾 军

分主编:

第一篇 高元楷 第五篇 毛锦庆

第二篇 季钟果 第六篇 田景林

第三篇 范克文 第七篇 陈燕侠

第四篇 范克文 第八篇 吴支运

各篇作者一览表

篇	章	作者
第一篇电力系统	第一章电力系统概论	高元楷,谷兴凯,潘明义,于岚育
	第二章电力系统有功平衡	武亚光,熊志学,栾军
	第三章电力系统调峰	夏俊彦
	第四章电力系统经济调度	王孟林,柯家陶
	第五章水库调度	宋亚坪,贾东旭,刘长风
	第六章电力系统负荷预测	杜蕴华,王钢
	第七章电力系统无功电压调整与控制	曲祖义,黄英矩
	第八章电力系统的潮流计算	曲祖义,黄英矩
	第九章电力系统无功功率平衡	王漪
	第十章电力系统稳定	高元楷,陈国平,陶家琪,葛维春
	第十一章电力系统可靠性	郭永基
	第十二章电力系统操作	刘家庆,高元楷,朱万国
	第十三章电力系统事故及其处理	高元楷,王芝茗
	第十四章调度自动化系统	杨光计,高翠兰
	第十五章电力系统通信	喻洪辉,赵克明,尹晓华,邱顺利,赵宏昊,夏峰
第二篇发电	第十六章发电厂及其电气设备的发展	季钟杲
	第十七章发电机	李伟清,徐英杰
	第十八章发电机励磁系统及其装置	郭永树
	第十九章发电厂厂用电气设备	付芝兰,徐英杰
	第二十章发电厂厂用电系统	付芝兰,高歌,钟浩文
	第二十一章发电厂自动装置与自动化	劳国强
	第二十二章发电机试验与故障诊断	王绍禹
	第二十三章大机组轴系扭振	杨昆,黄家裕,顾煜炯

续表

篇	章	作 者
第三篇输配电	第二十四章直流输电	赵晚君
	第二十五章交流输电线路	范克文,陈及时
	第二十六章变电所	何佑生,范克文
第四篇电力系统过电压	第二十七章暂时过电压	赖庆波,田景林
	第二十八章操作过电压	田景林,刘润钧
	第二十九章雷电过电压	刘润钧
	第三十章接地	刘润钧
	第三十一章绝缘配合	陈素瑾
第五篇继电保护与安全自动装置	第三十二章电力系统短路电流计算	邱金辉,吴艳娇
	第三十三章电力系统继电保护	毛锦庆,王庆乃,孙刚,孙玉成
	第三十四章电力系统安全自动装置	邹森元,李营,王漪,高元楷,冀有党,毛锦庆,洪军
第六篇供电	第三十五章高压供电网	范克文,陈及时,孟昭平,史惠民,李阳修
	第三十六章中、低压配电网	何宗义,张劲松,冯全利,王乃增
第七篇用电	第三十七章电力负荷预测与调整	王连文
	第三十八章用电分析	郑梅蕴
	第三十九章合理用电	李建刚
	第四十章安全用电	陈燕侠
	第四十一章营业管理	李望
第八篇计量	第四十二章电气计量	袁福安
	第四十三章常用电工仪表仪器的使用	龙月新
	第四十四章电能计量	孙长和

序

二十世纪将以“电世纪”而载入史册。中国电力工业从二十世纪五十年代开始得到了蓬勃发展。到1999年底全国装机容量超过2.9亿千瓦，发电量超过12000亿千瓦时，并且开始进入了结构调整、产业升级的新阶段。大型水电、火电机组的比重不断增加，核电也实现了零的突破，电网建设，尤其是城乡电网的建设正在以前所未有的规模全面展开。新能源和各种洁净煤发电技术正在加快步伐发展，各种新技术、新材料、新工艺，正在得到广泛的应用。这些都预示着二十一世纪中国电力工业必将以一个崭新的面貌出现在全世界面前。

为了适应和发展这一大好形势，进一步提高电力建设、生产和运行管理的技术水平和工作质量、工作效率，满足广大电力科技工作者和工程技术人员在实际工作中检索、查询和学习的需要以及浏览、了解相关专业知识的需要，受电力工业部的委托，由东北电力集团公司组织编写了这部《电力工程师手册（动力卷）》和《电力工程师手册（电气卷）》。参加手册编写工作的160余位专家、教授都是工作在电力生产、科研、教学等各条战线上的实际工作者和理论工作者，积累有丰富的实践经验。他们十分熟悉在电力工程师的日常工作中，哪些知识是常用的，哪些内容是最感兴趣的，哪些经验是值得借鉴的。因此，对广泛生产实践经验的总结和建立在理论与实践相结合基础上的凝炼是本手册的一大特点，使其有很强的科学性和实用性。同时，作者们也对国际上比较成熟而实用的新技术进行了深入地研究与探索，使本手册又有了一定的前瞻性，可供读者参考。正因为如此，该手册的出版，确是一大幸事。

科学技术的迅猛发展，是现时代的一大特征。新技术、新工艺、新材料、新知识的日新月异，要求人们不断地去学习、去探索、去创新、去总结，希望有更多的专家、学者和科技工作者在今后更广泛的实践中不断地进行归纳、提炼，使手册的内容不断得到补充、更新，更加符合生产实践的需要，更加符合市场的需求。

手册的作者是一个老中青相结合的专家群体，手册的问世既凝聚着老一代科技人员对事业的忠诚与奉献，也有年轻一代对事业的追求与攀登。希望手册能成为电力系统广大工程技术人员、科研人员、教学人员、管理人员和全体职工的良师益友，共同为新世纪电力事业的发展贡献才智和力量。

陆北召

前 言

本手册是专为电力生产运行、维护检修、技术管理的电力工程师们用的。凡在发、输、变、供、用电等方面从事生产运行、检修维护、试验研究的人员需要经常查阅的有关技术内容尽量列入，当然也涉及设备性能和工作原理的介绍，但主要着重如何运行与使用，而不是罗列设备数据。有关设备方面的技术参数等请参照设备制造部门编写的手册。

电力工业发展迅速，由本世纪初电力工业从雏形发展到世纪末的超高电压、大机组、自动化、远距离输电为特色的跨地区甚至跨国大电网，一次能源从石油、煤炭、地热、水能到核能，种类繁多，电力工业的生产运行维护专业更多，并且这些知识日日都在更新。要想在一本手册中把这些内容都包括是不可能的。特别是电力生产方面知识，只有新设备、新工艺出现并经过生产运行实践，经验积累总结，才能上升为成熟的知识，那时才能写入手册之类书籍。因此本手册无法叙述最新设备的生产运行方法，需要时读者可查阅每章后面附的参考文献和新版的杂志。再有，我国电力工业也和其他工业一样发展不平衡，先进的设备和老旧设备并存，既有本世纪八九十年代的新产品、新工艺，也有部分本世纪二三十年代的落后设备仍在服役，要想在手册中全面涉及目前使用中的所有的设备和工艺，是本书篇幅不能容许的。所谓偏不能盖全，请读者鉴谅。

本手册的作者都是东北电网的技术骨干和外聘的国内专家，其中有一些是已经退离休的老专家。他们日常生产工作繁忙，边工作边写作；退离休老专家不计报酬，甘心奉献，决心把自己一生的经验写入书内，留给后人。各兄弟单位十分热心支持本手册工作，积极推选知名专家、教授参加本手册的编写。在此，我们谨向上海交通大学、华北电力大学、清华大学、中国广东核电集团公司、中国电力科学研究院的领导及黄家裕教授、杨昆教授、郭永基教授、高歌高工、钟浩文高工、赵晓君高工深致谢意。

我们向热心审查本手册初稿的国内知名专家表示诚挚谢意，他们是华北电力大学的杨以涵教授、哈尔滨工业大学柳焯教授、西北电力集团公司岑立庆高工、华中电力集团公司葛锦生高工、中国广东核电集团公司陈家龙高工、东北电力学院刘玄毅教授，以及原东北电力集团公司汪礼文、范大愚以及潘克勤、杨森、太史瑞昌、孙兆顺、廖红梅、禹松坡、张文兴、沈志远、蒋凤铎、白恩君、穆习、王永林、魏国安、李晓朗、张元苓、郭佩云等高工。这些专家受东北电管局的委托，本着知无不言、言无不尽的极端负责精神，对本手册进行了认真细致的审查，发现了许多错误之处，防止了谬误扩散。

由于作者水平所限，错误之处在所难免，加之时间关系，由东北电管局负责编写这样一本内容丰富而实用的手册，我们深感学识不够、力不从心，殷切盼望专家学者及广大读者不吝赐教，期望再版时多数错误能够得到纠正。

编委会

1999年10月

目 录

序
前言

上 册

第一篇 电力系统

第一章 电力系统概论 1

- 第一节 电力系统的发展简况 1
- 第二节 电力系统构成 2
- 第三节 电力系统特性 2
- 第四节 电力系统的形态 3
- 第五节 电力系统的互联 5
- 第六节 电力系统结构 7
- 第七节 电力系统规划 8

第二章 电力系统有功平衡 15

- 第一节 电力系统有功平衡的基本概念 15
- 第二节 电力系统有功平衡的计划编制 23
- 第三节 电力系统有功平衡的执行与管理 25

第三章 电力系统调峰 27

- 第一节 概述 27
- 第二节 电源结构及各类电厂在负荷曲线中的工作位置 28
- 第三节 调峰规划设计 29
- 第四节 我国电力系统调峰现状 29
- 第五节 水电比重不同电网的调峰原则 30
- 第六节 国外电力系统调峰技术 30
- 第七节 火电机组调峰措施 31
- 第八节 火电机组调峰方式的选用原则 32
- 第九节 抽水蓄能电站在电网中的调峰作用 33

第四章 电力系统经济调度 34

- 第一节 概论 34
- 第二节 水电站内的经济调度与经济运行 36
- 第三节 火电厂内的经济调度和经济运行 40
- 第四节 概率潮流与灵敏度分析的某些应用 43
- 第五节 电力系统短期经济调度 47
- 第六节 超短期经济调度与优化潮流 52
- 第七节 电力系统中长期优化调度 54

第五章 水库调度 58

- 第一节 水库调度及水力发电的基本概念 58
- 第二节 水电站基本知识与基本资料 59
- 第三节 水库洪水预报与调度 66
- 第四节 发电调度 72

第六章 电力系统负荷预测 81

- 第一节 概述 81
- 第二节 电力系统负荷预测的基本模型 81
- 第三节 中长期负荷预测 84
- 第四节 短期负荷预测 84
- 第五节 在线负荷预测 85

第七章 电力系统无功电压调整与控制 86

- 第一节 概述 86
- 第二节 电力系统无功平衡 86
- 第三节 无功电压调整与控制 88
- 第四节 无功电压管理 91

第八章 电力系统的潮流计算 92

- 第一节 概述 92
- 第二节 电网元件等值电路及运行

方式计算	94	第二节 提高电力系统安全性的 途径	166
第三节 网络变换和负荷转移	96	第三节 事故处理的一般要求	167
第四节 环状电网功率分布	97	第四节 输电线路跳闸	168
第五节 复杂电网潮流电压计算机 分析方法	98	第五节 变压器事故	169
第九章 电力系统无功功率平衡	103	第六节 发电机事故	170
第一节 电力系统无功负荷与无功 电源	103	第七节 频率突然下降	173
第二节 无功功率的平衡	106	第八节 电压下降	174
第三节 无功补偿容量的配置	106	第九节 电源联络线过负荷	175
第四节 电力系统无功功率的优化 ..	107	第十节 系统解列	176
第十章 电力系统稳定	109	第十一节 母线事故或全厂、全所 停电	176
第一节 电力系统稳定的概念	109	第十二节 系统振荡（异步运行） ..	177
第二节 电力系统的静态稳定性	110	第十三节 单相接地故障测寻	180
第三节 电力系统的动态稳定	112	第十四节 电压异常处理	181
第四节 电力系统的暂态稳定	113	第十四章 调度自动化系统	183
第五节 电压稳定性分析	120	第一节 概述	183
第六节 提高电力系统稳定性的 措施	122	第二节 调度自动化系统的结构 和配置	183
第十一章 电力系统可靠性	128	第三节 调度自动化系统的主要 功能	184
第一节 基本概念	128	第四节 调度自动化系统的技术 指标	187
第二节 发电系统可靠性	130	第五节 调度自动化系统工程师 面临的主要问题	188
第三节 发输电合成系统可靠性	135	第六节 自动发电控制	188
第四节 配电系统可靠性	139	第十五章 电力系统通信	193
第十二章 电力系统操作	147	第一节 概述	193
第一节 操作的原则和制度	147	第二节 载波通信	193
第二节 电力系统运行接线	149	第三节 数字通信	197
第三节 电力设备操作	151	第四节 微波通信	202
第四节 环网并解列及系统之间 并解列	156	第五节 卫星、一点多址、扩频 通信	207
第五节 发电机向空载线路的从 零起加压	157	第六节 移动通信系统	213
第六节 电力系统操作与过电压	158	第七节 光纤通信	218
第七节 电力系统操作与潮流转移 ..	162	第八节 交换	222
第十三章 电力系统事故及其处理	163	第九节 其他	228
第一节 电力系统事故	163	参考文献	231

第二篇 发 电

第十六章 发电厂及其电气设备的发展 234

- 第一节 发电厂类型及其主要生产系统 234
- 第二节 发电厂电气设备的发展及其趋势 238

第十七章 发电机 244

- 第一节 汽轮发电机 244
- 第二节 水轮发电机 264
- 第三节 柴油发电机 283

第十八章 发电机励磁系统及其装置 286

- 第一节 概述 286
- 第二节 直流励磁机及其系统 288
- 第三节 交流励磁机及其系统 291
- 第四节 自励式励磁系统 303
- 第五节 发电机双轴励磁方式 307
- 第六节 自动励磁调节装置 308

第十九章 发电厂厂用电气设备 321

- 第一节 厂用电动机 321
- 第二节 厂用电器 336
- 第三节 厂用直流电源系统及装置 346

第二十章 发电厂厂用电系统 354

- 第一节 发电厂主接线 354
- 第二节 常规电厂厂用电 361
- 第三节 核电厂厂用电 374

第二十一章 发电厂自动装置与自动化 383

- 第一节 常规电厂的自动装置 383
- 第二节 水电厂综合自动化 404
- 第三节 抽水蓄能电站的自动化 414

第二十二章 发电机试验与故障诊断 430

- 第一节 试验与故障诊断分类 430
- 第二节 交接和预防性试验 430

- 第三节 一些非常规试验 440

- 第四节 故障离线诊断 444

- 第五节 故障在线诊断 449

第二十三章 大机组轴系扭振 454

- 第一节 机电系统扰动类型及轴系扭振基本形式 454
- 第二节 电力系统动态分析用的发电机数学模型 455
- 第三节 汽轮发电机组轴系扭振模型及其算法 458
- 第四节 同步发电机组次同步谐振分析 461
- 第五节 汽轮发电机组扭振疲劳分析 467
- 第六节 轴系扭振的测试与监测 471
- 第七节 预防和抑制机组轴系扭振的措施和对策 476
- 第八节 扭振试验及监测实例 479
- 参考文献 482

第三篇 输 配 电

第二十四章 直流输电 483

- 第一节 直流输电概论 483
- 第二节 直流输电系统的构成 484
- 第三节 直流输电系统稳态运行特性 490
- 第四节 换流站的无功补偿及滤波 493
- 第五节 直流输电的控制调节 496
- 第六节 直流输电的故障及保护 499
- 第七节 过电压保护和绝缘配合 501
- 第八节 直流输电线路 503

第二十五章 交流输电线路 506

- 第一节 杆塔基础 506
- 第二节 杆塔 514
- 第三节 导线与架空地线 535
- 第四节 绝缘子和金具 580

第五节 接地装置	603
----------------	-----

第二十六章 变电所

第一节 变电所电气主接线	612
第二节 变电所总体布置	617
第三节 变电所主要设备	625
第四节 运行技术管理工作	829
参考文献	833

下 册

第四篇 电力系统过电压

第二十七章 暂时过电压

第一节 工频过电压	834
第二节 铁磁谐振过电压	840

第二十八章 操作过电压

第一节 切、合空载线路的过电压 ..	853
第二节 切空载电缆线路产生的过电压	864
第三节 切、合电容器组产生的过电压	865
第四节 切、合空载变压器产生的过电压	871
第五节 切并联电抗器产生的过电压	875
第六节 切高压感应电动机产生的过电压	879
第七节 隔离开关投、切容性小电流产生的过电压	885
第八节 间歇性电弧接地过电压	888
第九节 非全相分、合闸产生的过电压	889
第十节 断线过电压	889
第十一节 电力系统过电压的物理模拟和数值计算	891

第二十九章 雷电过电压

第一节 雷电过电压的产生	893
--------------------	-----

第二节 防雷保护装置	894
------------------	-----

第三节 送电线路的雷电过电压保护	904
------------------------	-----

第四节 发电厂和变电所的雷电过电压保护	906
---------------------------	-----

第五节 旋转电机的雷电过电压保护	912
------------------------	-----

第六节 配电系统的雷电过电压保护	914
------------------------	-----

第七节 通信站的防雷保护	914
--------------------	-----

第三十章 接地

第一节 电气设备安全接地	916
--------------------	-----

第二节 人工接地体工频接地电阻的计算	922
--------------------------	-----

第三节 电气设备的接地线和热稳定校验	924
--------------------------	-----

第四节 大型发电厂、变电所接地网的检查、测试和完善	927
---------------------------------	-----

第三十一章 绝缘配合

第一节 绝缘配合及有关术语	934
---------------------	-----

第二节 规定绝缘水平要考虑的因素	935
------------------------	-----

第三节 绝缘试验的类型及其选择	936
-----------------------	-----

第四节 绝缘配合的基本原则	937
---------------------	-----

第五节 绝缘配合的方法及选择	938
----------------------	-----

第六节 高压电气设备耐受电压的确定	939
-------------------------	-----

第七节 输电线路及变电所绝缘子串及空气间隙的确定	942
--------------------------------	-----

第八节 电力系统中性点的接地方式	948
------------------------	-----

第九节 高压输变电设备的标准绝缘水平	951
--------------------------	-----

第十节 试验的一般规定	955
-------------------	-----

第十一节 电气设备标准绝缘水平的有关规定	956
----------------------------	-----

参考文献	959
------------	-----

第五篇 继电保护

第三十二章 电力系统短路电流计算..... 960

- 第一节 高压电网故障计算的基本假设和基础知识 960
- 第二节 三相短路电流的计算 962
- 第三节 不对称故障的计算 964
- 第四节 中性点不接地电网接地故障的计算 973
- 第五节 短路电流计算中常用的等值电路 975
- 第六节 短路电流的计算机算法 978

第三十三章 电力系统继电保护 985

- 第一节 继电保护装置的基本常识和基本要求 985
- 第二节 输电线路的电流、电压保护 ... 990
- 第三节 输电线路零序电流保护 998
- 第四节 输电线路距离保护 1000
- 第五节 输电线路纵联保护 1006
- 第六节 双回线路的横差保护 1011
- 第七节 母线保护与断路器失灵保护 1013
- 第八节 变压器保护 1019
- 第九节 发电机保护 1030
- 第十节 并联电抗器保护 1044
- 第十一节 电容器保护 1046
- 第十二节 调相机保护 1049
- 第十三节 电动机保护 1051
- 第十四节 微机型继电保护装置 1054
- 第十五节 继电保护的技术管理 1062

第三十四章 电力系统安全自动装置 1068

- 第一节 概述 1068
- 第二节 自动重合闸 1070
- 第三节 备用电源自动投入装置 1080
- 第四节 电力系统低频减负荷 1083
- 第五节 电力系统自动解列 1086
- 第六节 电力系统振荡解列 1086

- 第七节 微机型就地判别式安全自动装置 1088

- 第八节 提高电力系统稳定的快关汽门技术 1090

- 第九节 电力系统故障动态记录 1091

- 参考文献 1098

第六篇 供 电

第三十五章 高压供电网 1099

- 第一节 35~110kV 架空供电线路 1099
- 第二节 35kV 及以上电缆供电线路 1111
- 第三节 35~110kV 变电所 1160

第三十六章 中、低压配电网 1319

- 第一节 中压配电线路 1319
- 第二节 配电变压器 1346
- 第三节 中压配电设备 1351
- 第四节 低压配电线及配电设备 1357
- 第五节 无功补偿 1366
- 第六节 中低压配电网短路保护 1369
- 第七节 中低压配电网自动化 1379
- 第八节 中低压配电网的管理 1386
- 参考文献 1394

第七篇 用 电

第三十七章 电力负荷预测与调整 1395

- 第一节 电力负荷预测 1395
- 第二节 用电负荷调整 1397

第三十八章 用电分析 1403

- 第一节 概述 1403
- 第二节 用电分析的目的和内容 1403
- 第三节 用电分析的原则和种类 1404
- 第四节 用电分析的步骤和方法 1404
- 第五节 用电分析工作的要求 1411

第三十九章 合理用电 1413

- 第一节 概述 1413
- 第二节 电耗定额的制定 1413
- 第三节 节电技术措施经济效益计算
及评价方法管理 1416

第四十章 安全用电 1419

- 第一节 防止触电的基本措施及触
电急救 1419
- 第二节 电气装置的安全要求 1420
- 第三节 电气接地和接零 1423
- 第四节 工业与民用建筑的防雷 1426
- 第五节 电气装置的防火与防爆 1428
- 第六节 用户电气设备试验 1429
- 第七节 用户电气事故的调查与处理 ... 1431

第四十一章 营业管理 1434

- 第一节 概述 1434

- 第二节 报装接电 1434
- 第三节 电价 1437
- 第四节 营业业务 1440

第八篇 计 量

第四十二章 电气计量 1445

- 第一节 计量术语、法定计量
单位 1445
- 第二节 测量误差及数据处理技术
规范 1447
- 第三节 计量管理 1450

第四十三章 常用电工仪表仪器的使用 1455

- 第一节 指示仪表 1455
- 第二节 仪器 1475

第四十四章 电能计量 1480

第四篇

电力系统过电压

电力系统运行过程中,在电力设备上可能发生的过电压有暂时过电压、操作过电压和雷电过电压。要想保证电力系统安全、经济运行,一方面要采取措施降低各种作用到电力设备上的过电压;另一方面则要求各种电力设备对这些过电压有一定的耐受能力,即

具有合理的绝缘配合。本篇分为5章:暂时过电压、操作过电压、雷电过电压、接地和绝缘配合,分别介绍了各种过电压的产生机理、可能达到的程度、影响因素及防止和限制过电压的方法。

第二十七章 暂时过电压

暂时过电压是指工频过电压与谐振过电压。这种过电压的产生,与系统结构、容量、参数、运行方式及各种安全自动装置的性能有关。工频过电压、谐振过电压除增大绝缘承受电压外,还对过电压保护装置的选择有重要影响。

第一节 工频过电压

1 工频过电压的产生

电力系统中的工频过电压一般由线路空载、接地故障及甩负荷等原因引起。

1.1 空长线的电容效应

线路的电容(对地和相间)电流在线路感抗和电源系统的综合感抗上的电压降,与电源电动势相叠加,使线路电压高于电源电动势。此时线路末端电压高于线路首端电压,且线路愈长,这种电压升高就愈大。

1.2 不对称短路引起的工频过电压

中性点非直接接地系统发生单相或两相接地时均引起健全相稳态工频过电压。

中性点直接接地系统在单相或两相接地瞬间,也能引起健全相电压稳态升高,其升高程度决定于系统中零序阻抗与正序阻抗的比值。

1.3 电力系统突然甩负荷引起的工频过电压

引起过电压有两个因素,一是线路故障断路器跳闸甩负荷时,发电机在暂态电抗 X'_d 之后的暂态电动势 E'_d 保持不变,引起工频过电压;另一种情况是,甩负荷后发电机转速增加,使得发电机的激磁电动势和电源电动势的频率成正比地上升,增强了长线路的电容效应,引起系统工频过电压。

2 工频过电压的计算

在已知电网、相关设备及线路有关参数的条件下,用国内外通用的EMTP程序,便可容易和准确地计算出电厂的母线(线路首端)、线路末端或中间任何一点的工频过电压。在一般情况下,也可以用下述公式进行手算。

2.1 线路电容效应引起的工频过电压的计算

由线路电容效应引起的工频暂态电压升高与稳态电压升高相差甚小。在忽略线路损耗和电源变压器激磁损耗的条件下,空载线路的首端电压(U_s)和末端稳态电压(U_m)可以用下述公式进行手算。

2.1.1 计算公式

(1) 空载线路。架空空载线路的等值电路如图27-1所示。线路首、末端稳态工频电压可用式(27-1)和式(27-2)计算

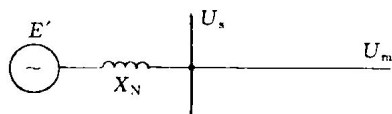


图 27-1 空载线路的等值电路

$$U_s = \frac{E'}{1 - \frac{X_N}{Z_B} \cdot \tan \lambda} \quad (27-1)$$

$$U_m = \frac{E'}{\cos \lambda - \frac{X_N}{Z_B} \cdot \sin \lambda} \quad (27-2)$$

$$\frac{U_m}{U_s} = \frac{1}{\cos \lambda}$$

式中 E' ——系统电源的暂态电动势;
 X_N ——系统电源的暂态电抗;

Z_B ——线路的波阻抗;
 λ ——线路的电的波长。

(2) 首端带电抗器的空载线路。首端带电抗器的空载线路的等值电路如图 27-2 所示, 首、末端工频稳态电压可用式 (27-3) 和式 (27-4) 计算。

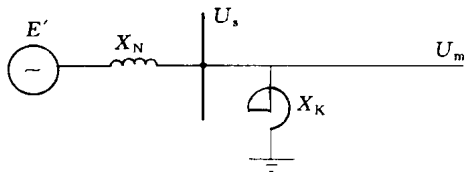


图 27-2 首端带电抗器的空载线路等值电路

$$U_s = \frac{E' \cos \lambda}{\left(1 + \frac{X_N}{X_K}\right) \cdot \cos \lambda - \frac{X_N}{Z_B} \cdot \sin \lambda} \quad (27-3)$$

$$U_m = \frac{E'}{\left(1 + \frac{X_N}{X_K}\right) \cdot \cos \lambda - \frac{X_N}{Z_B} \cdot \sin \lambda} \quad (27-4)$$

$$\frac{U_m}{U_s} = \frac{1}{\cos \lambda}$$

(3) 末端带电抗器的空载线路。末端带电抗器的空载线路的等值电路如图 27-3 所示。首、末端工频稳态电压可用式 (27-5) 和式 (27-6) 计算。

$$U_s = \frac{\left(\cos \lambda + \frac{Z_B}{X_K} \cdot \sin \lambda\right) \cdot E'}{\left(1 + \frac{X_N}{X_K}\right) \cdot \cos \lambda + \left(\frac{Z_B}{X_K} - \frac{X_N}{Z_B}\right) \cdot \sin \lambda} \quad (27-5)$$

$$U_m = \frac{E'}{\left(1 + \frac{X_N}{X_K}\right) \cdot \cos \lambda + \left(\frac{Z_B}{X_K} - \frac{X_N}{Z_B}\right) \cdot \sin \lambda} \quad (27-6)$$

$$\frac{U_m}{U_s} = \frac{1}{\cos \lambda + \frac{Z_B}{X_K} \cdot \sin \lambda}$$

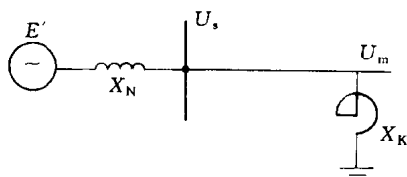


图 27-3 末端带电抗器的空载线路等值电路

(4) 首、末端均带电抗器的空载线路。首、末端均带电抗器的空载线路的等值电路如图 27-4 所示。首、末端工频稳态电压可用式 (27-7) 和式 (27-8) 计算。

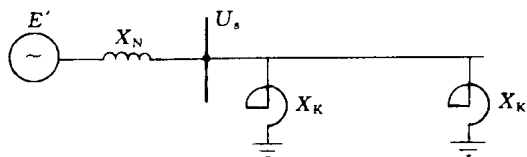


图 27-4 首、末端均带电抗器的空载线路

$$U_s = \frac{\left(\cos \lambda + \frac{Z_B}{X_K} \cdot \sin \lambda\right) \cdot E'}{\left(1 + \frac{2X_N}{X_K}\right) \cdot \cos \lambda + \left(\frac{Z_B}{X_K} + \frac{X_N \cdot Z_B}{X_K^2} - \frac{X_N}{Z_B}\right) \cdot \sin \lambda} \quad (27-7)$$

$$U_m = \frac{E'}{\left(1 + \frac{2X_N}{X_K}\right) \cdot \cos \lambda + \left(\frac{Z_B}{X_K} + \frac{X_N \cdot Z_B}{X_K^2} - \frac{X_N}{Z_B}\right) \cdot \sin \lambda} \quad (27-8)$$

$$\frac{U_m}{U_s} = \frac{1}{\cos \lambda + \frac{Z_B}{X_K} \cdot \sin \lambda}$$

式中 X_K ——电抗器的电抗。

架空输电线路单位长度 (1km) 的正序电感 L_1 和正序电容 C_1 的大小, 主要取决于线路的相分裂导线根数, 另外与导线对地的高度、导线排列方式等也有一定的关系。

通常 220kV 线路为单导线, 负荷大的也有采用双分裂导线的; 330kV 线路一般为双分裂导线; 500kV 和 750kV 线路, 一般采用四分裂导线。

表 27-1 按相分裂导线根数给出了输电线路的正序参数。

线路的波阻抗 Z_B 为

$$Z_B = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$$

式中 L_1 ——线路单位长度 (km) 的正序电感;

C_1 ——线路单位长度 (km) 的正序电容。

根据表 27-1 中所列参数, 计算出波在输电线路中的传播速度约为 290000~300000km/s, 与相分裂导线根数多少的关系不大。

表 27-1 输电线路的正序参数

相分裂导线根数	1	2	3	4
正序电抗 (Ω/km)	0.42	0.33	0.30	0.282
正序电感 (mH/km)	1.273	1.051	0.955	0.891
正序电容 ($\mu\text{F}/\text{km}$)	0.00891	0.01058	0.01218	0.01318
波阻抗 (Ω)	375	315	280	260

线路的波长 λ 用度来表示时 (波速取