

特高压直流平波电抗器 运行状态研究

编著 陈图腾



Research on operation
state of UHV DC smoothing reactor



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

特高压直流平波电抗器 运行状态研究

陈图腾 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书基于±800kV 特高压直流输电工程平波电抗器基本理论, 围绕特高压±800kV 平波电抗器运行特性, 对±800kV 平波电抗器相关理论与设计、计算与试验、运行及维护、改进及评估等方面展开深入研究和总结分析。

全书共分六章, 内容主要包括特高压直流平波电抗器概述、特高压直流平波电抗器工作理论、特高压直流平波电抗器的运行参数测量、特高压直流平波电抗器仿真研究、特高压直流平波电抗器运行与维护、特高压直流平波电抗器的改进。内容全面, 资料翔实, 对特高压直流平波电抗器的理解与研究起到很好的推动作用。

本书可作为从事特高压直流输电技术、检修、试验、研究、培训及管理工作的相关技术人员阅读教材, 也可供电力院校相关师生学习参考。

图书在版编目 (C I P) 数据

特高压直流平波电抗器运行状态研究 / 陈图腾编著

— 北京 : 中国水利水电出版社, 2016.4

ISBN 978-7-5170-3861-0

I. ①特… II. ①陈… III. ①特高压输电—直流—平波电抗器—研究 IV. ①TM478

中国版本图书馆CIP数据核字 (2015) 第290097号

策划编辑: 杨庆川 责任编辑: 陈 洁 加工编辑: 庄 晨 封面设计: 李 佳

书 名	特高压直流平波电抗器运行状态研究
作 者	陈图腾 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: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (发行部)、82562819 (万水) 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	北京万水电子信息有限公司
印 刷	三河市佳星印装有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 16.5印张 320千字
版 次	2016年4月第1版 2016年4月第1次印刷
定 价	48.00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

编委会名单

(排名不分先后)

顾 问：李立涅

专家组：许爱东 吕金壮 蔡希鹏 文习山
谢国恩 吴玉坤 黎小林 赵林杰
郝志杰 林春耀 赵宇明 黄志雄

主 任：陈 兵

副主任：赵荣国 任达勇 林 睿

主 编：陈图腾

审核组成员：

禹晋云 曹继丰 常开忠 程建登 杨 涛
邓先友 邓本飞 蓝 磊 鲁海亮 刘 进
杨 铖 刘劲松 黎张文 魏 星 徐 峰
陈国峰

编写组成员：

王 羽 张 义 程德保 姜志鹏 韩建伟
吕俊瑶 陈 帆 吴 斌 柳 坤 张月华
张 猛 毛文俊 王国金 刘成柱 刘相宏
余 轶 王 丹 夏云礼 刘 畅 袁虎强
侯世金 张启浩 张家兴 毕 伟 夏向挺
黄殿龙 陈 倩 杨启宾 隋国平 苏志龙
蒋新华 周 乐 王小岭 徐 松 张 强

序

自 21 世纪以来,随着中国经济的高速发展,电力能源地域分布不均衡的问题更加突出。特高压直流输电占用的长距离输电线路走廊较交流输电更窄、费用更低,同时能避免交流输电规模增大带来的电网短路容量增大、交流电晕损耗和电磁辐射严重等问题,在一定条件下直流输电比交流输电有更佳的运行特性和经济效益。世界第一条高压直流输电线路建成于 1954 年,我国虽起步较晚,但发展势头迅猛,世界第一条特高压直流输电工程—— $\pm 800\text{kV}$ 云广特高压直流输电工程于 2009 年投产。可以预见,特高压直流输电在未来的电网发展中仍将扮演重要角色。

平波电抗器是特高压直流输电工程关键的主设备之一。对限制逆变侧电压崩溃时的过电流、平抑传输直流电流中的纹波和防止沿直流线路入侵到换流站的过电压对换流阀绝缘的影响及保持低负荷工况下直流电流不间断有重要作用。我国早期的葛南和天广直流输电工程均采用国外公司成套供货的干式平波电抗器。国内厂家结合多年的研发和制造经验,自主研制出 $\pm 800\text{kV}$ 平波电抗器,并在 $\pm 800\text{kV}$ 云广特高压直流输电工程中稳定运行至今。如何对特高压平波电抗器开展有效的运维和检测,对现场的运行维护人员提出了新的要求和课题。

南方电网公司在积累两项特高压直流输电工程建设、调试和运行维护经验的基础上,组织多位技术骨干完成“特高压直流平波电抗器运行状态研究”的课题研究。它的完成从特高压平波电抗器相关理论与设计、计算与试验、运行及维护、改进及评估等多个方面为后续的直流输电工程平波电抗器的仿真计算、试验测量、运行维护和改进研究等提供依据和坚实基础,同时为现有直流平波电抗器的运行、检测、维护提供参考。希望本书能够为我国特高压直流输电工程设备的设计研发和运行维护水平作出贡献。

前 言

本书以典型特高压直流输电工程—— $\pm 800\text{kV}$ 云广特高压直流输电工程为研究背景，围绕 $\pm 800\text{kV}$ 楚雄换流站站内特高压平波电抗器运行展开深入研究，研究范畴包括平波电抗器五个方面：特高压直流平波电抗器理论研究、特高压直流平波电抗器试验测量方法分析、特高压直流平波电抗器仿真研究、特高压直流平波电抗器运行维护研究和特高压直流平波电抗器改进及效果评估。特高压直流平波电抗器运行状态研究涵盖电抗器相关理论与设计、计算与试验、运行及维护、改进及评估等方面的综合研究。

本书笔者先后完成特高压直流平波电抗器运行状态研究的国内外相关文献、相关国际以及行业标准和基础资料的收集工作，全程参与研究技术规范和实施细则的讨论以及制定，经过与协助单位的多次协商和调整后的完成了特高压直流平波电抗器运行状态研究。

本书在实施过程中，得到了南方电网科学研究院、超高压输电公司及各合作单位专家和领导的大力支持和帮助，谨在此一并表示衷心的感谢！

鉴于笔者科研水平参差不齐、科研能力有限，受限于商业保密、试验设备、计算能力等客观条件，加之研究时间较短，特高压直流平波电抗器运行状态研究不可避免存在瑕疵，研究中错误和不足之处在所难免，敬希专家及同行批评指正。

编 者

2015年6月

目 录

序

前言

第一章 概述	1
第二章 特高压直流平波电抗器工作理论	4
2.1 理论概述	4
2.2 电抗器工作原理分析	4
2.3 电抗器电气特性分析	6
2.3.1 电抗器的一般特性	6
2.3.2 干式及油浸式电抗器的电气特性	7
2.3.3 干式铁芯与空心电抗器的电气特性	7
2.4 电抗器外绝缘研究	10
2.4.1 干式空心电抗器的绝缘结构	10
2.4.2 干式空心电抗器的绝缘特性	12
2.5 干式电抗器结构分析	13
2.5.1 铁芯电抗器	13
2.5.2 空心电抗器	15
2.5.3 树脂绝缘干式空心电抗器与干式铁芯电抗器的性能比较	15
2.5.4 一种新型干式半芯电抗器	17
2.6 平波电抗器故障特性分析	18
2.6.1 匝间短路	18
2.6.2 漏电起痕	20
2.6.3 电抗器局部热点温度过高	22
2.7 干式电抗器国内发展现状	24
2.7.1 国内生产厂家概况	24
2.7.2 干式电抗器应用概述	27
2.7.3 国内干式电抗器研究概况	29
2.8 干式电抗器国际发展现状	30
2.8.1 国外生产厂家概况	30
2.8.2 干式电抗器发展概述	33
2.8.3 国外干式电抗器研究概况	34
2.9 平波电抗器在高压直流系统中的应用研究	36

2.9.1	直流输电平波电抗器与交流电抗器的区别	36
2.9.2	平波电抗器在直流输电工程中的应用	37
2.10	特高压直流平波电抗器特性分析	39
2.10.1	特高压直流平波电抗器的特点	39
2.10.2	并联避雷器对电抗器电压分布的影响	40
2.10.3	中性母线上平抗对高速开关的影响	40
2.10.4	特高压直流平波电抗器的耐热性能与温升限值	41
第三章	特高压直流平波电抗器的运行参数测量	43
3.1	概述	43
3.2	测量试验	43
3.2.1	A 换流站 $\pm 500\text{kV}$ 干抗试验测量	44
3.2.2	B 换流站 $\pm 500\text{kV}$ 干抗试验测量	56
3.2.3	C 换流站 $\pm 800\text{kV}$ 干抗试验测量	68
3.2.4	D 换流站 $\pm 800\text{kV}$ 干抗试验测量	83
3.3	结果小结	93
3.4	总结	95
3.4.1	干抗电场测量总结	95
3.4.2	干抗磁场测量总结	95
3.4.3	干抗温度测量总结	95
3.4.4	干抗噪声测量总结	96
3.4.5	干抗局放测量总结	96
第四章	特高压直流平波电抗器仿真研究	97
4.1	概述	97
4.2	平抗布置方式的暂态分析	97
4.2.1	实际工程概况和软件简介	97
4.2.2	过电压计算方法及模型	99
4.2.3	反击过电压计算及分析	108
4.3	平抗电场仿真与分析	112
4.3.1	计算原理	112
4.3.2	平抗的电场和电位分布	116
4.4	平抗磁场仿真与分析	127
4.4.1	平抗本体磁场仿真	127
4.4.2	平抗现场磁场仿真	135
4.5	场路耦合仿真	141
4.5.1	电磁暂态计算	141

4.5.2	电场计算	143
4.6	平波电抗器振动仿真研究	146
4.6.1	概述	146
4.6.2	干扰结构模态仿真	147
4.6.3	干扰电磁力仿真	153
4.6.4	干扰谐波响应仿真	155
4.6.5	结论	160
4.7	平波电抗器温升仿真	160
4.7.1	概述	160
4.7.2	计算方法及模型	162
4.7.3	计算结果及分析	170
4.7.4	结论与建议	180
第五章	特高压直流平波电抗器运行与维护	181
5.1	概述	181
5.2	特高压直流平波电抗器结构简介	181
5.3	特高压直流平波电抗器运行分析	182
5.3.1	特高压直流平波电抗器巡视与检测	182
5.3.2	特高压直流平波电抗器巡视周期	189
5.3.3	特高压直流平波电抗器运行常见问题	191
5.4	特高压直流平波电抗器的维护	192
5.4.1	特高压直流平波电抗器日常维护	192
5.4.2	特高压直流平波电抗器日常维护周期	195
5.4.3	特高压直流平波电抗器性能检测	196
5.4.4	特高压直流平波电抗器维护常见问题	202
5.5	特高压直流平波电抗器故障分析及处理措施	207
5.5.1	过电压导致绝缘击穿	207
5.5.2	过电流导致绝缘损坏	208
5.5.3	冰灾导致干扰故障	210
5.5.4	地震导致干扰机械损坏	211
5.5.5	其他损害	212
5.6	小结	213
第六章	特高压直流平波电抗器的改进	214
6.1	概述	214
6.2	特高压直流平波电抗器的应用与研制	214
6.2.1	平波电抗器的应用	214

6.2.2	平波电抗器的研制	215
6.3	特高压直流平波电抗器的布置方式优化	220
6.3.1	平波电抗器布局方式经济性改进及评估	221
6.3.2	平波电抗器安装方式经济性改进及评估	224
6.3.3	小结	227
6.4	特高压直流平波电抗器的电场分布优化	227
6.4.1	平波电抗器改进前电场分布计算	227
6.4.2	平波电抗器屏蔽结构优化后电场分布计算	228
6.4.3	小结	233
6.5	特高压直流平波电抗器的磁场分布优化	233
6.5.1	平波电抗器改进前磁场分布计算	233
6.5.2	有限场单层薄绕组在空间任一点的磁场计算	234
6.5.3	空心电抗器空间任一点磁场的计算	235
6.6	特高压直流平波电抗器在线测温系统	235
6.6.1	测温系统技术背景	235
6.6.2	测温系统性能参数	237
6.6.3	测温系统结构	237
6.6.4	功能特点	238
6.6.5	系统测温原理	239
6.6.6	测温元件的布置	239
6.6.7	系统保护特性(专家库算法)	240
6.6.8	系统监控软件	242
6.7	小结	248
	参考文献	249

第一章 概述

平波电抗器是高压直流输电工程中的主设备之一，对于限制逆变侧电压崩溃时的过电流、平抑传输直流电流中的纹波和防止沿直流线路入侵到换流站的过电压对换流阀绝缘的影响及保持低负荷工况下直流电流不间断等具有重要的作用。平波电抗器具有绝缘可靠、特性好、重量轻、结构简单、使用维修方便等诸多优点，在高压直流输电工程中得到广泛应用。

早期，我国 $\pm 500\text{kV}$ 超高压直流输电工程采用的平波电抗器均从国外引进，随着我国 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程建设的不断开展和本土高压设备厂家研发能力的提升，作为高压直流输电系统关键主设备之一的平波电抗器， $\pm 800\text{kV}$ 平波电抗器的研制在国内外无成熟技术和成功经验背景下实现完全自主化，世界首台 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流干式平波电抗器研制成功，并在某 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电示范工程中得到应用。

随着输电工程电压等级的不断提高，电力负荷的不断提升，电磁环境日益成为社会和民众关心的重点，与电抗器相关的磁场计算、磁场测量以及磁场屏蔽研究逐步深入。当今数值计算方法的蓬勃发展和计算硬件性能的快速提升，围绕平波电抗器的研究工作日益细化、不断深入。然而，涉及特高压 $\pm 800\text{kV}$ 平波电抗器的理论与设计、计算与试验、运行及维护、改进及评估等方面的综合研究亟待解决。

本书以某 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程为研究背景，围绕特高压 $\pm 800\text{kV}$ 平波电抗器运行展开深入研究，研究范畴包括平波电抗器五个方面：特高压直流平波电抗器理论研究、特高压直流平波电抗器试验测量方法分析、特高压直流平波电抗器仿真研究、特高压直流平波电抗器运行维护研究和特高压直流平波电抗器改进研究及效果评估。本书的五部分内容全面涵盖了研发、设计、运行、维护和改进等各个方面，各部分内容简述如下：

研究内容一：特高压直流平波电抗器理论研究。该研究内容从电抗器的功能用途、应用分类入手，对常见电抗器如并联电抗器、串联电抗器、限流电抗器、平波电抗器等进行介绍，分析各类型电抗器的工作原理及主要应用情况。基于干式电抗器的结构分析，介绍平波电抗器的三种类型，包括干式空心电抗器、干式铁芯电抗器以及新型的干式半芯电抗器，在设计、结构特点、生产工艺和技术特

点进行比较分析。简述国内平波电抗器主要生产厂家现状，总结国内平波电抗器的科研成果，展望平波电抗器的发展趋势。结合国内平波电抗器生产厂家引进并消化平波电抗器的生产工艺技术背景，对国外平波电抗器生产厂家进行简介，并对国外学者关于干式空心电抗器的研究成果进行介绍。结合我国特高压直流输电工程，对平波电抗器在特高压直流输电工程中的实际应用进行总结分析。

研究内容二：特高压直流平波电抗器试验测量方法分析。平波电抗器在国内直流输电工程的占有率及国产化率较高的应用背景下，自主研发平波电抗器工艺水平和性能指数均达到国际领先水平。由于平波电抗器在换流站工况运行下的试验测量研究鲜有报道，鉴于此，本研究中，平波电抗器试验测量选取国内具有典型代表作用的四个换流站作为测量对象，对上述四个换流站内不同极性的平波电抗器分别进行各方面参数测量。基于行业试验测量标准，参考工程试验测量经验，制定平波电抗器的试验测量方法，根据换流站内高压设备布置的实际情况，合理布置试验测量点和试验测量区域，记录试验测量参数。

研究内容三：特高压直流平波电抗器仿真研究。作为直流输电换流站内的感性元件之一，国内外学者围绕平波电抗器数值计算方面展开了一系列研究。最初研究热点主要集中在自感与互感计算和磁场计算，随着计算方法的发展和计算机软硬件的提升，围绕平波电抗器的研究工作日益细化、不断深入，如平波电抗器在换流站的优化布置研究，兼顾其稳定性和经济性；平波电抗器的电磁兼容研究，符合环境友好型，满足环境保护以及行业相关标准；平波电抗器的损耗及温升研究，使其达到绿色节能型、节能减排，对其运行监测、维护检修提供指导意见和参考依据。本研究内容在上述研究背景下，结合典型特高压直流输电工程，以某 $\pm 800\text{kV}$ 换流站内平波电抗器为研究对象，展开一系列的数值仿真计算，并结合相关试验测量，检验仿真计算的准确性。

研究内容四：特高压直流平波电抗器运行维护研究。鉴于某 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程为全球首次建设，特高压直流平波电抗器在特高压直流输电工程中首次应用，缺乏相应的国际标准及国内标准。本研究内容参考其他高压设备的运行检修规范、归纳干式电抗器的常见故障，结合实际运行维护经验，对特高压直流平波电抗器的运行维护研究及其周期做出分析，对运行维护中的常见问题进行了系统的整理说明。

研究内容五：特高压直流平波电抗器改进研究及效果评估。平波电抗器是直流输电工程换流站内用的主设备之一，在直流输电工程中起着重要的作用。本书以某 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程的楚雄换流站平波电抗器为研究对象，总结已投入运行的直流工程平波电抗器设计原理与制造经验，对特高压平波电抗器的整

体性能进行统计分析与研究,分别从平波电抗器运行状态的电场分布、磁场分布、平波电抗器在换流站直流场内的布置形式、造价及占地面积等多方面进行计算与分析,同时也对平波电抗器运行时的绕组温度分布进行了数值计算,得到了理想状态下绕组的温度分布云图。结合平波电抗器温度分布理论计算,选择合适的测温系统,研发平波电抗器智能在线监测系统,实时监测平波电抗器内部热点位置绕组温度分布并通过数据专家库系统实时判断温升是否异常,避免过热故障。

特高压直流平波电抗器运行状态研究的开展,可系统全面地对特高压直流平波电抗器进行深入研究,其中,特高压直流平波电抗器理论研究有助于科研人员及工程人员加深对平波电抗器的理解和认识,为其后的平波电抗器仿真计算、试验测量、运行维护和改进研究等提供依据和坚实基础。特高压直流平波电抗器试验测量方法分析总结换流站内的平波电抗器合成电场、磁感应强度分布情况,比较四个换流站工况情况下平波电抗器的温度、噪声和局放情况,为其巡检和维护提供依据及改进建议。特高压直流平波电抗器仿真研究有助于平波电抗器的设计研究,可为平波电抗器的技术改进提供建议,对平波电抗器的性能提升提供参考依据,同时为平波电抗器在特高压直流输电工程的运行、检测、维护等提供参考。特高压直流平波电抗器运行维护研究为平波电抗器的巡视项目、巡视周期和维护项目及维护周期提供规划,对常见问题进行系统分析,并给予解决方案。特高压直流平波电抗器改进研究及效果评估在前期的研究基础上,进一步优化计算布置方式,在温升研究基础上,研发适合于平波电抗器的智能在线监测系统,可有效预防过热故障,提高运行稳定性,从而提升直流输电工程运行可靠性。

第二章 特高压直流平波电抗器工作理论

2.1 理论概述

平波电抗器作为特高压直流输电工程中的关键设备之一，在直流输电系统中起到减少直流电压和电流的谐波分量，抑制故障电流上升速度，限制短路电流峰值等作用。

目前，平波电抗器工作原理、结构分析、绝缘特性等相关研究课题少有报道，有必要对直流系统中的关键设备——平波电抗器进行全面而综合的研究分析。因此，本章立足于特高压平波电抗器理论研究，从电抗器的功能、用途、分类逐一展开，由平波电抗器的两种类型——干式平波电抗器和油浸式平波电抗器进行比较，分析总结了平波电抗器的优点，引申到平波电抗器相关的理论研究，并重点分析了干式电抗器的外绝缘特性；分析平波电抗器匝间短路、漏电起痕、局部温升过高、漏磁等常见故障，并对故障原因进行一一解释；从平波电抗器的生产工艺、制造流程、材料结构等方面进行说明，结合我国特高压直流输电工程，对平波电抗器在特高压直流输电工程中的实际应用进行了总结分析。

本章全面地对特高压直流平波电抗器进行了研究分析，有助于提高工程人员对平波电抗器的理解和认识，为平波电抗器相关的仿真计算、试验测量、巡视检修等提供了理论依据和坚实基础。

2.2 电抗器工作原理分析

电抗器因为具有电感特性用于电力系统中的装置或器件，在电力系统中有无功补偿、限流、稳流（平波）、滤波、阻尼、移相等作用，是电力系统中一种常见的、重要的电力设备。例如大量运用在电力系统中的并联电抗器、串联电抗器、限流电抗器、接地变压器、消弧线圈、阻波器、防雷绕组等；以及大量运用在电力用户的串联电抗器、限流电抗器、限流分流电抗器、滤波电抗器、并联电抗器、起动电抗器、平波电抗器、平衡电抗器及其他电抗器等。

按电抗器结构的不同，电抗器可分为铁芯电抗器、空心电抗器。铁芯电抗器

的优点是：容易做成高电压；对周围环境电磁干扰小；电抗器内绝缘故障可再修复。但也具有线性度不好、容易出现饱和；重量大，噪声大；维护工作量大、对防火要求高；结构复杂等缺点。空心电抗器具有线性度高、重量轻、机械强度高、噪声小、结构简单、维护工作量小、防火要求低等优点。而其缺点是不易做成高电压、对周围设备有磁场干扰、线圈内的绝缘故障不可修复。饱和电抗器和自饱和电抗器都是铁芯电抗器的一种，它利用磁性材料在高磁密下非线性的特点进行工作。但是由于其谐波污染较大，应用领域很小。

按照安装环境、使用条件则可分为户内式和户外式。一般情况下，干式铁芯电抗器为户内式；若户外使用，则需增加外壳并注意采用适当的冷却方式。空心电抗器具有磁路的开放性特点，所以空心电抗器大多数是户外安装；当容量小，室内空间足够并采取一定的防护措施时，空心电抗器也可用于室内；大容量空心电抗器由于开放性磁场的影响及室内空间的限制，一般不安装于室内。

按电抗器在电力系统中的用途不同可分为：并联电抗器、限流电抗器、线路平衡电抗器、平波电抗器、中性点接地电抗器、串联电抗器、滤波电抗器、双分裂电抗器。

大多数情况下需要在输电线路路上装设电抗器、电容器等无功补偿装置，以此来改善线路的运行情况和提高远距离输电线路的传输能力。

限流电抗器是用于限制电力线路短路电流的。一般使用的是电抗值线性度较好的空心电抗器。限流电抗器分为一般限流电抗器和限流分裂电抗器。

消弧线圈是一个具有铁芯的可调电感绕组，它装设于发电机、变压器或接地变压器的中性点。当发生单相接地故障时，可形成一个与接地电流的大小接近但方向相反的电感电流，这个电流与电容电流相互补偿，使接地处的电流变得很小或等于零，从而消除了接地处的电弧及由它产生的一切危害。此外，当电流经过零值而电弧熄灭之后，消弧线圈的存在还可以显著减小故障相电压的恢复速度，从而减小了电弧重燃的可能性。

起动电抗器用于大型交流电机降压起动。起动时，电抗器与电动机串联，增加电动机起动回路的等效阻抗从而减少电机起动电流；起动后，电抗器即拆除，电动机直接接入电网运行。

在有各种谐波源的交流线路中，主要用滤波电抗器来滤去谐波电流从而使电源接近正弦波。

平波电抗器可分为干式平波电抗器和油浸式平波电抗器两种。干式平波电抗器与油浸式平波电抗器相比有如下特点：

(1) 由支持绝缘子承担对地绝缘从而提高了主绝缘的可靠性；而油浸式电抗

器是由油/纸绝缘系统承担对地绝缘,相对而言比较复杂。

(2) 无油,有一定阻燃能力,消除了火灾危险和环境影响问题,不需设置防火设施。

(3) 功率倒送时不会产生临界电介质应力。

(4) 无铁芯,在故障条件下不会出现铁芯饱和问题。

(5) 运行维护费用低,维护工作量少。

(6) 重量轻,一次投入费用低,有利于降低工程造价。

2.3 电抗器电气特性分析

2.3.1 电抗器的一般特性

电抗器有高压铁芯串联电抗器、高压空心电抗器、限流电抗器、低压串联电抗器、变频进出线电抗器、直流平波电抗器、水冷电抗器、磁控电抗器、相控电抗器、谐振电抗器、高压启动电抗器等多种。

(1) 按用途分为 7 种。

1) 限流电抗器:串联在电力电路中,限制短路电流。

2) 并联电抗器:通常接在超高压输电线路的最末端和地之间,用来抑制长线路容升效应,起到无功补偿的作用。

3) 通信电抗器:又称阻波器,串联在兼作通信线路用的输电线路中。

4) 消弧电抗器:又称消弧线圈,常常接在三相变压器的中性点和地之间,当发生单相接地故障时,提供感性电流,从而消除过电压。

5) 滤波电抗器:主要被用于两个方面,一是用来减小整流电路中直流电流上纹波的幅值;二是用以消除电力电路某次谐波的电压或电流。

6) 电炉电抗器:通过与电炉变压器串联来达到限制变压器的短路电流的作用。

7) 起动电抗器:通过与电动机串联来达到限制电动机的起动电流的作用。

(2) 按有无铁芯可分为 2 种。

1) 空心式电抗器:电抗器线圈中没有铁芯,磁通通过空气形成回路。

2) 铁芯式电抗器:其磁通全部或大部分经铁芯闭合。

(3) 按绝缘结构又可分为 2 种。

1) 干式电抗器:其线圈敞露在空气中。

2) 油浸式电抗器:其线圈装在油箱中,以纸、纸板和变压器油作为对地绝缘和匝间绝缘。

2.3.2 干式及油浸式电抗器的电气特性

在低压电抗器中，干式空心电抗器的优点有：结构简单、重量轻、噪音低、不渗油、维护方便和无铁芯饱和、电抗值保持线性等。但是与油浸铁芯式比较，还存在着相当的不足。表 2.1 是油浸铁芯式并联电抗器和干式空心式电抗器在经济及技术上的比较。

表 2.1 两种电抗器的差异

项目及性能	经济、技术比较	
	油浸式铁芯并联电抗器	干式空心并联电抗器
冷却效果	较好	温升高
空载损耗	损耗低	损耗高
过励磁能力	一般	较好
噪声、振动	比干式空心大	比油浸式铁芯小
寿命	长	短
运行的可靠性	高	较低
运行的经济性	运行成本低	运行成本高
寿命周期成本	低	高
优缺点概述	影响供电时间较短、效果好	影响供电时间短，效果一般

注：寿命周期成本是制造成本和运行、维护、能耗、保险、检修的费用所构成的未来运行成本的总和。

2.3.3 干式铁芯与空心电抗器的电气特性

2.3.3.1 干式铁芯电抗器的性能

铁芯电抗器的结构主要是由铁芯和线圈组成的。铁芯构成电抗器的磁路，在铁芯电抗器中的铁芯柱是带间隙的，其磁阻主要是取决于气隙的尺寸。由于气隙的磁化特性基本是呈线性的，所以铁芯电抗器的电感不取决于外在的电压和电流，而取决于其自身的结构参数。

（1）干式铁芯电抗器的铁芯。

铁芯材料通常采用高矽片（如 30Q140、30Q130）、中矽片（35WW270、300 等），厚度通常为 0.35mm、0.3mm、0.27mm。

1) 铁芯电抗器铁芯的特点是铁芯结构带气隙，因为衍射磁通含有较大的横向分量，所以将在铁芯和线圈中引起极大的附加损耗。因此为了减小衍射磁通，需