

电气设备故障试验诊断 **攻略**

电抗器

丛书主编 包玉树
本册主编 王建刚



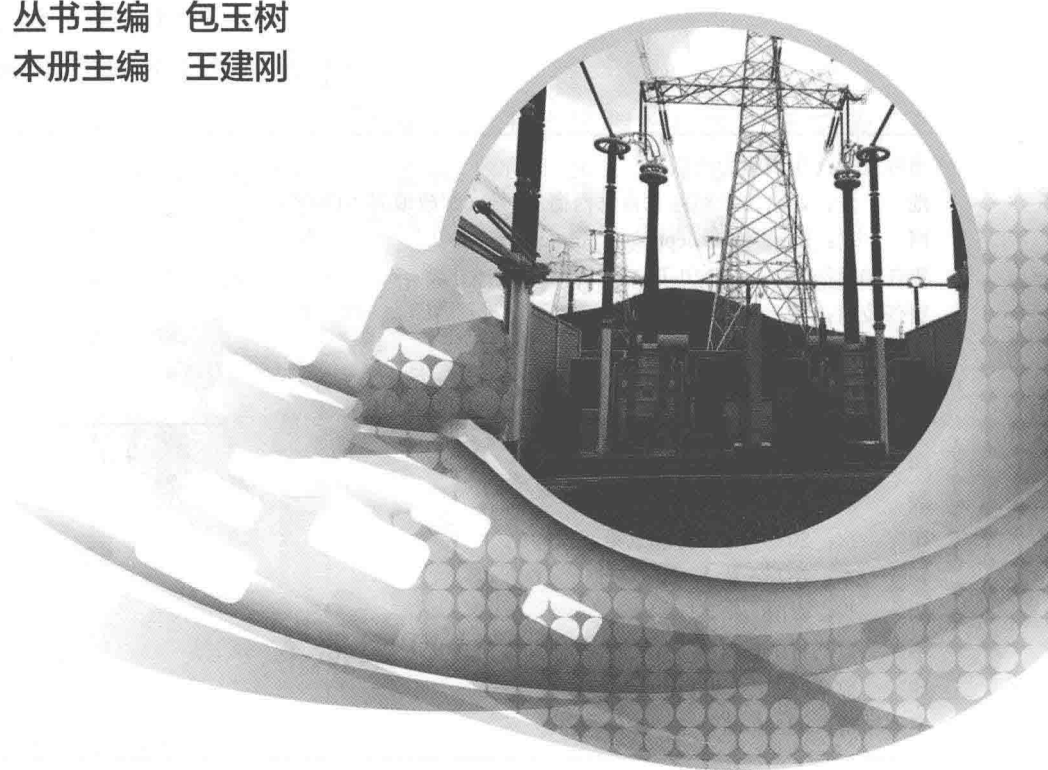
中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

电气设备故障试验诊断 攻略

电抗器

丛书主编 包玉树

本册主编 王建刚



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

为加强对电气设备的检查维护及故障诊断力度,确保电气设备安全稳定运行,特编写《电气设备故障试验诊断攻略》丛书。本丛书以生动的案例介绍、真实的场景再现,将基于电气试验的设备故障诊断案例加以剖析。

本书是《电抗器》分册,主要针对电抗器类设备,结合发生的典型缺陷及故障案例进行了诊断分析,通过电气试验、设备解体等手段,详细介绍了缺陷及故障产生的原因、诊断处理过程及防范措施。

本丛书可供电力系统从事电气设备试验的工程技术人员使用,也可作为高等院校相关专业师生学习的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

电气设备故障试验诊断攻略. 电抗器 / 包玉树主编; 王建刚分册主编. —北京: 中国电力出版社, 2018. 12

ISBN 978-7-5198-2046-6

I. ①电… II. ①包…②王… III. ①电气设备—故障诊断②电抗器—故障诊断 IV. ①TM07②TM470.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 097866 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: 吴 冰 (010-63412356)

责任校对: 黄 蓓 常燕昆

装帧设计: 郝晓燕 赵姗姗

责任印制: 石 雷

印 刷: 三河市百盛印装有限公司

版 次: 2018 年 12 月第一版

印 次: 2018 年 12 月北京第一次印刷

开 本: 787 毫米 × 1092 毫米 16 开本

印 张: 8.5

字 数: 179 千字

印 数: 0001—1500 册

定 价: 38.00 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

《电气设备故障试验诊断攻略》丛书编委会 审定委员会

主 任 黄志高

副 主 任 陈 晟 卞康麟

委 员 (按姓氏笔画排序)

马生坤 王丽峰 王金虎 水为涟 吉 宏 许焕清
杜 森 李 杰 李瑶红 吴 俊 张红光 祝和明
徐建军 郭建伟 翟学锋

编写委员会

丛书主编 包玉树

丛书参编 (按姓氏笔画排序)

马生坤 马君鹏 王成亮 王伟津 王庆胜 王丽峰
王泽仁 王建刚 卞康麟 甘 强 叶加星 付 慧
司增彦 吕 佳 朱孟周 刘 洋 孙和泰 杜 森
杨小平 杨世海 杨景刚 李夕强 李 军 李瑶红
吴 俊 吴 剑 张兴沛 陈华桂 陈志勇 陈 杰
陈明光 范 忠 周 源 孟 嘉 赵 胤 胡永建
钟子娟 钟永和 祝和明 秦嘉喜 贾勇勇 徐敏锐
殷 峰 高 山 高 嵩 黄亚龙 黄 芬 黄 磊
衡思坤

本册编写人员

主 编 王建刚

参 编 陈志勇 许建刚 卞 超 王国良 周 阳 王 骏
陆志强 徐中悦 徐近龙 袁 超



目前，国家电网公司立足自主创新，大力发展特高压和智能电网并取得了重大突破，实现了“中国创造”和“中国引领”，电力事业日新月异，蓬勃向前。国网江苏省电力公司的广大员工随潮而动，逐梦而飞。在此背景下，经过近四年的筹划、组织、立项、编撰、审核、修改，《电气设备故障试验诊断攻略》丛书与读者见面了。

本套丛书按照一次设备的种类分别成册，内容涵盖设备结构、针对性试验、典型故障、诊断攻略等方面，重点放在具有可操作性的故障诊断上。丛书中所列故障案例，既有作者的亲身经历，也有收集借鉴的他山之石，经过筛选、加工一一呈现在读者面前，期望这套丛书能给读者带去不一样的收获。本套丛书各分册内容安排主要以故障描述、缺陷排查、综合分析、诊断攻略的形式呈现，另外对专业领域的试验与诊断新技术做了前瞻性叙述。

《电抗器》分册共分为三章，收集了并联/串联电抗器缺陷及事故案例，并对这些案例进行了诊断分析，提出相应建议、预防措施，同时结合电力行业最新颁布的无功补偿装置的技术规范，力求与规范、标准相一致，具有很强的实操性。

在本书编写过程中，得到了江苏省电力公司方天公司及丛书编委会各位领导的大力支持和帮助，得到了苏州华电电气股份有限公司的大力支持和帮助，在此一并表示感谢。书中参考了其他省市电力公司的事故案例，引用了一些研究成果及试验数据，在此对相关单位的领导和专家表示衷心的感谢。

本套丛书可供电力系统从事电气设备试验的工程技术人员使用，也可作为高等院校相关专业师生的学习参考资料。

由于各分册作者均为在职电力系统专家，利用工作之余的时间编写，时间仓促，书中仍有疏漏与不足之处，敬请读者批评指正。

编 者

2017年5月

目 录



前言

第一章 电抗器概述	1
第一节 电抗器的分类、用途及基本特性	1
第二节 电抗器的结构和常见故障	4
第二章 电抗器的试验项目及方法	13
第一节 油浸式电抗器的试验项目及方法	13
第二节 干式电抗器的试验项目及方法	15
第三章 电抗器故障的典型案例分析	17
第一节 油浸并联电抗器的典型故障案例	17
第二节 干式铁芯电抗器的典型故障案例	71
第三节 干式空芯电抗器的典型故障案例	77
参考文献	125

电抗器概述

电抗器是因其电感特性而应用于电力系统中的装置或器件，在电路中起到无功补偿、限流、稳流（平波）、滤波、阻尼、移相等作用，是电力系统中一种常用的、重要的电力设备，已广泛应用于电力网及电力用户中。

第一节 电抗器的分类、用途及基本特性

电抗器分类方法很多，可分别按产品用途（并联电抗器、串联电抗器等）、结构型式（铁芯、空芯等）、绝缘介质（油浸、干式）、相数（单相、三相）等进行分类。

一、按产品用途分类

电抗器产品按其在电力系统中用途的不同可分为并联电抗器、串联电抗器、限流电抗器、消弧线圈、接地变压器、滤波电抗器、平波电抗器、起动电抗器、防雷绕组、平衡电抗器、饱和电抗器和自饱和电抗器、阻波电抗器等。目前最常用的电抗器主要有并联电抗器、串联电抗器、消弧线圈、接地变压器、限流电抗器；本书主要介绍并联电抗器、串联电抗器的结构、试验方法及常见故障案例分析等。

电抗器的型号意义如图 1-1 所示。

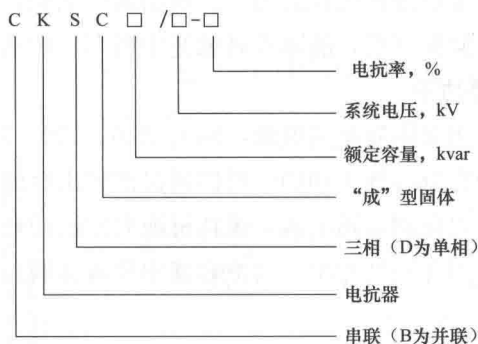


图 1-1 电抗器的型号示意图

代号含义：CK 表示串联电抗器，BK 表示并联电抗器；S 为三相电抗器、D 为单相电抗器；C 为成型固体电抗器。

1. 并联电抗器的主要功能

为了提高远距离输电线路的传输能力和改善线路的运行情况，常常需要在线路上装设电抗器、电容器等无功补偿装置，目前采用最多的是并联电抗器和并联电容器组。该电抗器主要并联接在供电系统上，主要用于补偿电容电流，削弱电容效应，限制系统工频电压升高，并能有效抑制操作过电压，还可以起到消除同步发电机带空载长线时产生的自励磁现象，从而保证线路的可靠运行。

在远距离输电线路上，装设并联电抗器具有改善电力系统无功功率等有关运行状况的多种功能，主要包括：

(1) 削弱空载或轻载时长线的电容效应，以降低工频暂态过电压。这种电压升高是由于空载或轻载时，线路的电容（对地电容和相间电容）电流在线路的电感上的压降所引起的，国外称这种电压升高为“弗兰梯”效应，它将使线路电压高于电源电压。越接近末端时，电压升高越严重；通常线路越长，则电容效应越大，工频电压升高也越大。

(2) 改善沿线电压分布和轻载线路中的无功分布并降低线损。当线路上传输的功率不等于自然功率时，则沿线各点电压将偏离额定值，有时甚至偏离较大，如依靠并联电抗器的补偿，则可以抑制线路电压的升高。通常是根据不同的传输容量，采用投、切电抗器的方法来改善沿线电压分布及降低有功功率损失。

(3) 使轻负荷时线路中的无功功率尽可能就地平衡，防止无功功率不合理流动，同时也减轻了线路上的功率损失。

(4) 在大机组与系统并列时降低高压母线上工频稳态电压，便于发电机同期并列。

(5) 有利于消除发电机的自励磁。当同步发电机带容性负载时，发电机的电压将自行建立而不与发电机的励磁电流相对应，这种现象称为自励磁。当发电机自励磁时，系统电压将超过其允许值而危及线路和变电设备的绝缘。当远离输电线路空载或轻载运行时，就有可能产生这种自励磁现象。

(6) 当采用电抗器中性点经小电抗接地装置时，还可用小电抗器补偿线路相间及相地电容，减少潜供电流，加速潜供电弧的熄灭。所谓潜供电流，是指当发生单相瞬时接地故障时，在故障相自两侧断开后，故障点处弧光中所存在的残余电流。

2. 串联电抗器的主要功能

(1) 串联电抗器主要用来限制短路电流：500、220、110、35、10kV 电网中的电抗器是用来吸收电缆线路的充电容性无功的，可以通过调整串联电抗器的数量来调整运行电压。母线串联电抗器可以限制短路电流，维持母线有较高的残压。

(2) 串联电抗器也有用在滤波器中，与电容器串联或并联用来限制电网中的高次谐波，其作用主要有：

1) 与电力电容器组串联组成并联电容器无功补偿装置以补偿系统无功，从而限制乃至消除不装设串联电抗器时电力电容器组对系统谐波的放大作用。

2) 降低电容器组的合闸涌流和涌流频率，使得易于选择回路设备及保护电容器。为避免发生“谐波放大现象”，应要求串联电抗器的伏安特性尽量线性化。

3) 与电容器组容抗全调谐后, 组成某次谐波的交流滤波器, 可降低母线上该次谐波的电压值; 若处于过调谐状态下, 即为一种并联电抗器装置, 并部分地降低该次谐波电压值, 提高供电质量。

4) 在电容器组容抗某次谐波全调谐或过调谐状态下, 可以限制高于该次谐波电流流入该电容器组, 抑制高次谐波, 保护电容器。

5) 减少健全电容器组向故障电容器组的放电电流值, 保护了电容器。

6) 减少电容器组断路器分闸电弧重击穿时的涌流倍数和频率, 以利断口灭弧, 降低操作过电压幅值。

二、按结构型式分类

电抗器按结构型式可分为铁芯电抗器和空芯电抗器。

1. 铁芯电抗器

铁芯电抗器是以闭合的铁芯为磁路, 其中铁芯带有一定长度的气隙, 铁芯外面套绕组。由于铁磁材料的导磁性能比空气高很多, 所以相同容量的铁芯电抗器比空芯电抗器体积小很多, 一般只有 1/5 左右。由于磁性材料存在饱和现象, 当磁密超过一定值后, 铁芯饱和, 电感将会降低。所以一般铁芯电抗器的磁密选取比同容量变压器的磁密要低许多。干式铁芯电抗器采用空气和环氧树脂复合绝缘的形式, 因体积小、对周围环境电磁干扰小、绝缘耐热等级高、阻燃、防爆、免维护、寿命长等优点, 得到了广泛的应用。铁芯电抗器的铁芯结构如图 1-2 所示, 铁芯饼由硅钢片叠成, 叠片方式一般有平行叠片、渐开线状叠片、辐射状叠片三种 (见图 1-3)。

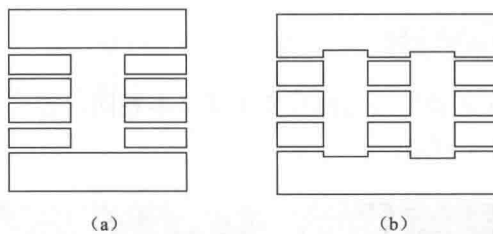


图 1-2 铁芯电抗器的铁芯结构

(a) 单相电抗器铁芯; (b) 三相电抗器铁芯

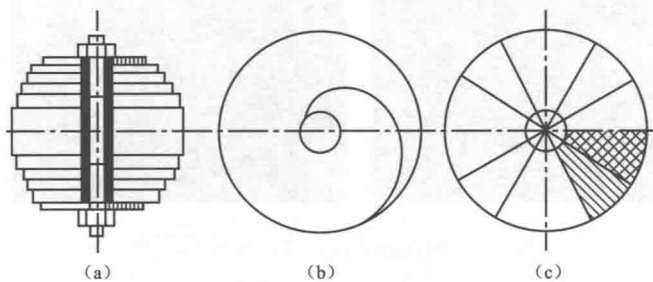


图 1-3 铁芯饼

(a) 平行叠片; (b) 渐开线状叠片; (c) 辐射状叠片

(a) 平行叠片：其叠片方式与一般变压器相同，每片中间冲孔，用螺杆、压板夹紧成整体，适用于较小容量的电抗器。

(b) 渐开线状叠片：其叠片方式与渐开线变压器的叠片方式相同，中间形成一个内孔，外圆与内孔直径之比约为 4:1 至 5:1，适用于中等容量的电抗器。

(c) 辐射状叠片：其叠片方式为硅钢片由中心孔向外辐射排列，适用于大容量电抗器。

2. 空芯电抗器

空芯电抗器这种电抗器只有绕组，没有铁芯，实际上就是一个空芯的电感绕组。以空气为磁路，空气的磁导恒定，不存在饱和现象，所以空芯电抗器的电感值是个常数，不随通过电抗器电流的大小而改变。早期的空芯电抗器多为水泥电抗器，由于其绝缘耐热等级低、易开裂以及损耗大、占地面积大、安装使用不便等原因，逐渐被淘汰；随着树脂材料的广泛运用，现在的干式空芯电抗器几乎全部是以高强度的玻璃纤维加环氧树脂为复合绝缘的结构；由小截面圆铝线，多层、多包封、多并联支路绕制，环氧树脂浇注高温固化成形。

第二节 电抗器的结构和常见故障

目前系统内最常用的串联、并联电抗器主要有油浸并联铁芯电抗器（内芯式）、干式铁芯电抗器、干式空芯电抗器三大类，下面就这三类电抗器的结构和常见故障进行简单介绍。

一、油浸并联电抗器的结构

油浸电抗器的结构和试验方法与油浸变压器基本相同，芯式（内铁芯）油浸并联电抗器的外观图结构如图 1-4 所示。

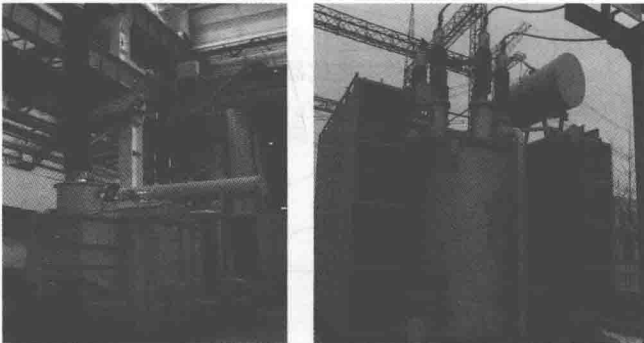


图 1-4 内铁芯油浸并联电抗器外观图

1. 铁芯

新型并联电抗器的芯柱为气隙饼式结构，铁轭为截面矩形的方框结构。铁芯饼、气

隙垫块之间采用环氧浇注树脂粘接方式，以缓冲铁芯饼间力的冲击，减小铁芯的振动。心柱与上下铁轭之间有磁屏蔽板全面覆盖线圈，控制漏磁分布，减小夹件、油箱壁中的磁通，防止结构件局部过热。而且磁屏蔽板中有“磁导向”，将降低磁场中磁密大的点，可防止局部磁密大造成的一系列后果。铁芯整体有穿心螺杆和特制碟簧、螺母组成的压紧装置，从而降低振动和噪声。如图 1-5 为内铁芯油浸并联电抗器内部结构图；图 1-6 为并联电抗器的芯柱结构。

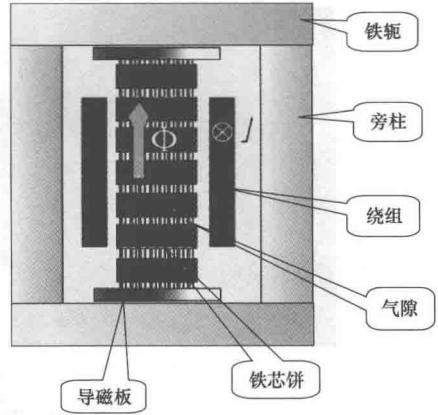


图 1-5 内铁芯油浸并联电抗器内部结构图

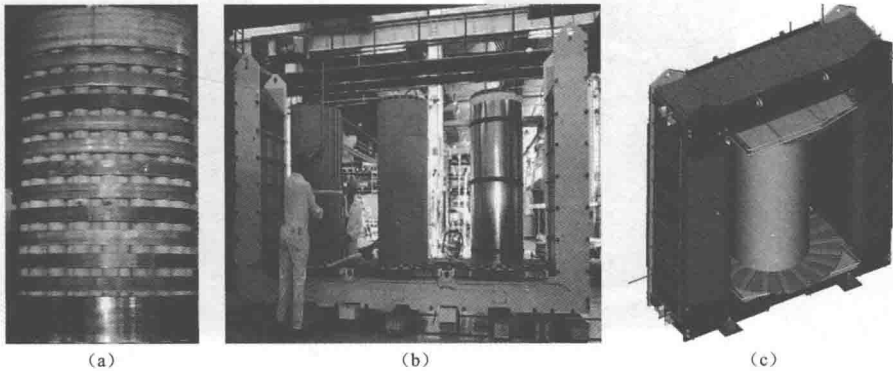


图 1-6 并联电抗器的芯柱结构

(a) 铁芯柱（单相柱）；(b) 铁芯柱（三相柱）；(c) 铁芯结构模拟图

2. 绕组

绕组采用工艺成熟的内屏蔽连续式绕组，并作出如下改进：

- (1) 增加关键部位绝缘，保证绕组的耐冲击能力；
- (2) 设置新型纵向油道，增强散热能力，降低绕组温升；
- (3) 采用气相恒压干燥，使绕组高度定型，电抗值更精确；
- (4) 为减小绕组窝流横向损耗，绕组上下端设置了磁压板。

如图 1-7 所示为并联电抗器的绕组结构图。

3. 器身绝缘

主柱器身主绝缘采用薄纸筒、小油隙以增加绝缘强度，端绝缘采用带有特殊形状垫块的端圈增加了爬距。旁轭设有屏蔽，并且具有安装简便的特点。整个器身结构通过了多种软件的电场、磁场精确计算，保证了每处的绝缘强度。如图 1-8 所示为并联电抗器的器身绝缘结构图。

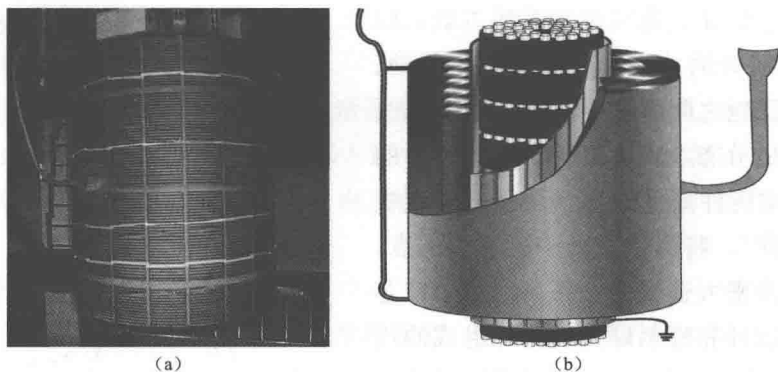


图 1-7 并联电抗器的绕组结构
(a) 绕组结构图；(b) 绕组结构模拟图

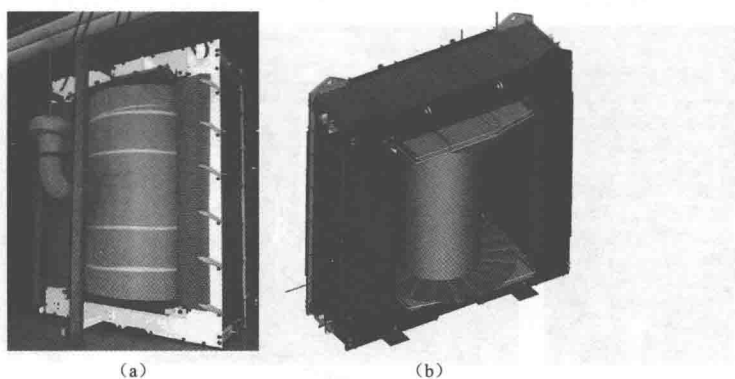


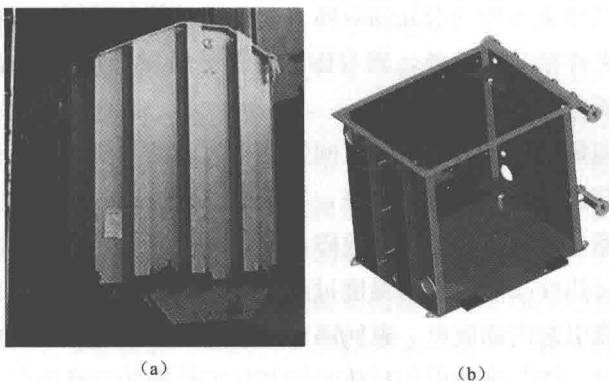
图 1-8 并联电抗器的器身绝缘结构
(a) 器身结构图；(b) 器身结构模拟图

4. 油箱

油箱采用矩形桶式结构，长宽比接近黄金比例，外观给人以和谐的美感。加强铁采用槽型，有效控制了箱壁振动，加强铁上、下端有法兰盘，为控制噪声可在需要时加添或放出沙子，十分便利。箱盖顶端有纵横向的加强筋，不但保证了箱盖的强度，而且不失美观。油箱采用钟罩式或桶式结构，采用槽形折板加强铁加强油箱。如图 1-9 所示为并联电抗器的油箱结构图。

5. 引线

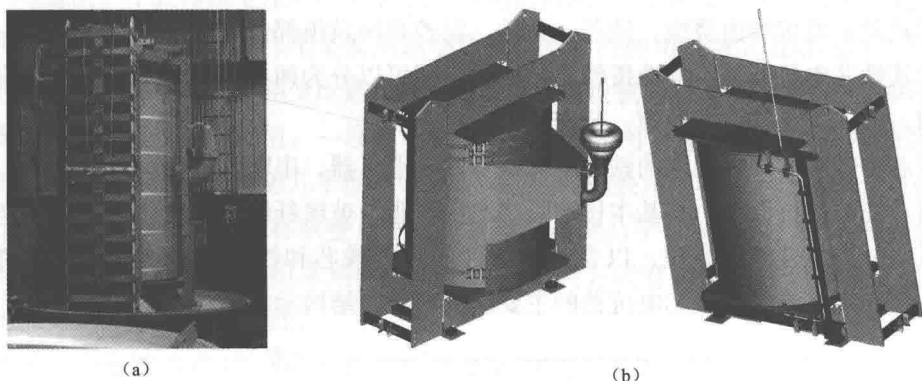
引线采用直接出线，高压引线与低压引线分别位于器身异侧，极大控制了外部绝缘距离。高压出线穿过均压管进入均压球再连接套管，有效控制了内部的绝缘距离，而且均压管采用特殊方式夹持以减小振动造成的影响。500kV 均压球形状经过优化设计和计算，电极形状十分出色，结构为全铝材质骨架，外包魏德曼成型绝缘件，安装方式为吊装于套管尾部，具有重量轻、安装简便、性能可靠等特点。图 1-10 为并联电抗器的引线结构图。



(a) (b)

图 1-9 并联电抗器的油箱结构

(a) 油箱结构图；(b) 油箱结构模拟图



(a) (b)

图 1-10 并联电抗器的引线结构

(a) 引线结构图；(b) 首端引线、末端引线模拟图

二、油浸并联电抗器的常见故障

通常情况下，油浸并联电抗器除与变压器具有相同的绝缘问题外，还存在振动和局部过热的问题。

(1) 油浸并联电抗器局部过热（铁芯、绕组、引线联结点、夹件等）、局部放电和电弧（如匝间及层间短路，沿面放电及磁闭合回路等），可通过油色谱分析方法加以判断；应用 DL/T 722—2000《变压器油中溶解气体分析和判断导则》、GB/T 7252—2001《变压器油中溶解气体分析和判断导则》，利用变压器油产气速率、一氧化碳和二氧化碳的指标、三比值法和特征气体法对判断电抗器故障性质进行分析和判断，对电抗器油色谱进行分析，发现了许多早期故障及事故隐患，对预防电抗器事故起了重要作用。

(2) 电抗器过热引起的故障。从全国统计的电抗器故障资料看，出现该类问题的产品主要集中在个别厂家。造成这种情况的原因首先是油质量存在问题，其次是电抗器存在的过热现象没有解决好，可通过油介损值分析方法加以判断。

(3) 铁芯未压紧或夹件松动引起的故障。引起振动的主要原因是磁回路有故障和制造时铁芯未压紧或夹件松动。此外，器身固定、安装质量等均可造成振动和噪声异常，可通过振动噪声分析方法加以判断。

(4) 电抗器匝间短路故障。电抗器匝间短路事故，其主要原因是设计和制造存在先天缺陷，尤其是局部过热问题没有解决好，导致电抗器烧毁。

(5) 过热性故障。纵观电抗器过热故障，不管是进口还是国产早期的电抗器，在运行初期均发生由于过热性故障而引起温度过高的问题，但现在基本得到控制。

(6) 磁回路故障引起内部放电。磁回路出现故障的原因是多方面的，如漏磁通的过于集中引起局部过热，铁芯接地引起环流和铁芯与夹件间的绝缘破坏，接地片的松动与熔断导致悬浮放电及地脚绝缘故障等。

三、干式铁芯电抗器的结构

干式铁芯电抗器由绕组、铁芯、夹件、温控系统及组部件等组成。

干式铁芯电抗器基本构造按铁芯结构的不同可以分为两类：一类是铁芯中带有非磁性间隙，另一类是铁芯无间隙，与变压器一样。

铁芯中带有非磁性间隙的铁芯电抗器有并联电抗器、串联电抗器、消弧线圈、起动电抗器及滤波电抗器等。其基本构造是绕组由树脂与玻璃纤维复合固化绝缘材料浇注成形、以空气为复合绝缘介质、以含有非磁性间隙的铁芯和铁轭为磁通回路。铁饼和间隙、铁轭和绕组是干式铁芯电抗器的主要组成部分。结构示意图如图 1-11 所示。

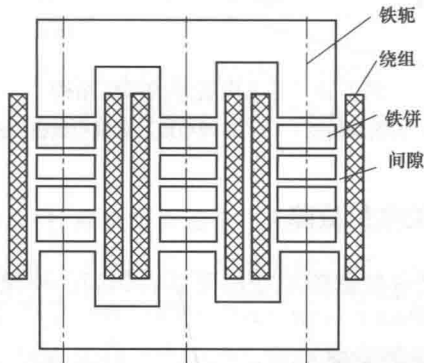


图 1-11 干式铁芯电抗器外形构造示意图

带有非磁性间隙是这类铁芯电抗器在铁芯结构上区别于变压器的主要特点，这个特点是由铁芯电抗器在电网上补偿容性电流的实际作用决定的。如果铁芯为完全闭合的磁通回路，则其激磁电流很小，电感电抗值很大，即容量很小。铁芯磁导将呈非线性，当励磁电流超过一定数值时，铁芯就会饱和，其磁导率会急剧下降，电感、电抗也将急剧下降，从而影响电抗器正常工作。而带间隙的铁芯结构由于铁芯部分的相对磁导率远远高于树脂和空气的复合绝缘的磁导率，磁路的磁阻几乎都由间隙部分形成，即磁阻的大小主要取决于间隙的长度。因此，在一定的范围内，铁芯电抗器的电感值仅取决于间隙

长度以及自身绕组的匝数，不再取决于外在电压或电流。

带间隙的铁芯结构是通过将铁芯柱分成若干个铁饼、在铁饼之间用非磁性材料隔开来实现的。铁饼为圆饼状结构，高度为 50~100mm，铁饼的叠片方式根据磁通密度、磁通量以及生产工艺性综合考虑来确定，通常有平行阶梯状叠片、渐开线状叠片和辐射状叠片三种。铁饼间非磁性材料采用圆片状高硬度、不同厚度的平面固体材料，厚度一般为几毫米。为保证铁芯在运行过程中不振动和错位，将视铁饼柱的大小和叠片形式采用环氧树脂粘贴、玻璃布带绑扎固定或环氧树脂高温固化整体刚性成形固定。

铁芯采用同干式变压器铁芯一样的、无间隙的这一类干式铁芯电抗器包括接地变压器、平衡电抗器等。其主要组成部分如铁芯、绕组、紧固件均与干式变压器相同；与变压器的区别仅在于绕组的连接方式上。如采用 ZN 曲折形连接方式的接地变压器，当其提供变电站站用电源时，可带有低压绕组，其连接组别常为 $Znzn1$ 和 $Znyyn11$ 等；当其不带站用电源时，干式接地变压器仅有 ZN 连接的高压绕组。平衡电抗器结构为单相式，联结在两个整流电路之间。其作用是使两组电压相位不同的换相组整流电路能够并联工作，因此其铁芯、铁轭结构与单相变压器相同。由于其所接负载的电流值通常很大，因而一般采用铜箔绕制，每柱绕两组，一柱的内绕组与另一柱的外绕组串联，剩余两绕组串联。要求工作时，铁芯中直流磁势几乎没有，只有两组不同的换相组电压差产生的交流磁势。

小容量产品铁饼采用阶梯状叠片方式，铁轭采用倒凸字形轭结构，铁芯和铁轭之间采用拉紧螺杆轴向拉紧，绕组采用圆筒式结构，出线方式有螺母出线和铜排出线两种，工作电流大时多采用铜排出线。

大容量产品铁饼采用辐射状或渐开线状叠片方式，铁轭采用一字轭结构，由辅助拉杆或浸透树脂高温固化后的绝缘无纬带轴向拉紧，绕组采用多风道圆筒式结构，风道内外曲折连接以降低风道间电压。由于大容量产品一般电流较大，导线截面积及并绕根数较多，在设计时，应充分考虑产品的绝缘结构，使绕组内电场均匀分布，借以减少局部放电量。一般干式铁芯并抗多数采用这种铁饼。

干式铁芯电抗器外形结构如图 1-12 所示。

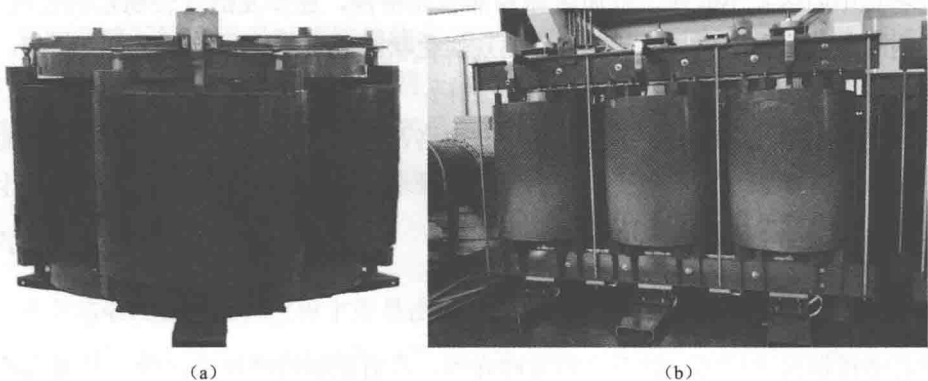


图 1-12 干式铁芯电抗器外形结构
(a) 品字形布置结构；(b) 一字形布置结构

四、干式铁芯电抗器的常见故障

1. 绝缘材料表面性能劣化引起的故障

由于材料选择、配方及固化工艺不当等问题引起的缺陷，主要表现为绝缘表面皲裂、粉化、表面性能下降及高温下流淌等。主要原因有以下几点：

(1) 固化速度好坏同固化剂、促进剂、周围环境等有较大关系，同一配方、工艺可因固化剂、促进剂活性的差异，环境温度、湿度的差异而得出性能差异很大的树脂料，最终导致电抗器绝缘表面出现皲裂、粉化，表面性能下降。

(2) 室温固化的电抗器有局部过热或焊口不良等缺陷时，这些看似已经固化良好的树脂在高温（大于 80°C ）的作用下，将出现流淌和重固化的过程，由于在固化前伴随树脂流淌而使绝缘内部形成空泡，极易造成匝间绝缘的破坏。

(3) 多数厂家控制环氧树脂质量手段有限，更难以做到根据不同批次的环氧树脂调整配方，因此材料、配方不一，导致环氧树脂的固化难以达到最佳状态而留下隐患，从而加速表面劣化。

2. 漏磁引起的故障

(1) 在电抗器轴向位置有接地网，径向位置有设备、遮栏、构架等，都可能因金属体构成闭环造成较严重的漏磁问题，若有闭环回路，如地网、构架、金属遮栏等，其漏磁将感应环流达数百安培。

(2) 如是径向位置有闭环，将使电抗器绕组过热或局部过热，如同变压器二次侧短路情况，如果是轴向位置存在闭环，将使电抗器电流增大和电位分布改变，故漏磁问题并不能简单地认为只是发热或增加损耗。

3. 沿面放电引起的故障

沿面放电故障主要表现为电抗器表面放电和绝缘撑条放电两种。

(1) 电抗器表面放电故障：电抗器的环氧树脂外绝缘属于亲水性物质，在雨、潮湿天气下表面易形成水膜，导致表面泄漏电流增大。受潮、污秽不均则产生局部干带状并造成电场集中而引发小电弧，进而破坏局部表面特性，逐步发展成较稳定的放电通道。如材料耐漏电起痕水平低，则绝缘表面出现炭化状的浅表痕迹，使电场前突畸变，痕迹前端更易形成干区和火花放电，形成恶性循环。

(2) 绝缘撑条放电痕迹：不仅使表面易闪络，而且导致绕组的电位分布同表面电位分布不一致，使本来基本不承受电压的径向绝缘承受一定的电压，并使绕组易发生匝间绝缘击穿。

五、干式空芯电抗器的结构

空芯电抗器没有铁芯，以空气作导磁介质，没有限制性磁回路，所以其最大的结构特点就是空芯。空芯电抗器绕组采用多包封、多层、小截面圆铝线的多并联支路结构，其绕组包封采用环氧树脂玻璃纤维材料增强绕包，端部用高强度铝合金星形架夹持、环

氧玻璃纤维带拉紧结构，使电抗器绕组成为刚性整体。以支柱绝缘子和非磁性金属底座支撑绕组完成安装。

其设计与结构特点如下：

(1) 绕组采用性能优良的电磁铝线，绕制时同一支路的多根导线并绕，匝数完全一致，股间电压均分、等距离排列，匝间、股间电压小（见图 1-13）；不同绕制半径的各支路之间并联连接（层间并联），匝数接近，层间电压极低、相应部位几乎等电位，电场分布非常理想。保证了绕组能具有较高的运行可靠性。

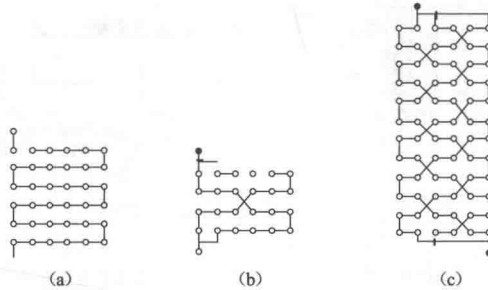


图 1-13 电抗器绕组各并联支路的换位
(a) 单根绕；(b) 二根并绕；(c) 三根并绕

(2) 绕组包封采用外加环氧树脂玻璃纤维增强，端部用高强度铝合金星形架夹持，整体玻璃纤维带拉紧等结构，再通过干燥浸胶工艺固化成型，使电抗器各部分成为一个坚固的复合体。因此，产品具有极高的机械强度。

(3) 绕组采用多并联支路设计，每个支路又由多根相同的导线并联绕制；数个支路并联叠绕组成一个包封，数个包封并联组成一个绕组，包封与包封之间安排有散热风道。为了均衡分配电流及合理散热，采取了“等电阻电压法”设计，建立电压方程式计算每层每匝的自感及匝与匝之间的互感，再计算层与层之间的互感，从而总体计算出绕组的电感、绕组的温度分布，空芯电抗器绕组结构如图 1-14 所示。

(4) 空芯电抗器多做成单相，组成三相电抗器组时，有三种排列方式：不同的排列方式，相间互感不同，因而对绕组的绕向和匝数的要求也不同，结构如图 1-15 所示，图 1-15 (a) 的排列方式，为了减少相间支撑瓷座的拉伸力，中间一相的绕向应与上下两相相反；图 1-15 (b) 的排列方式，重叠两相绕组绕向相反，下节绕组与旁边相绕向相同；图 1-15 (c) 的排列方式，则三相绕向相同。

六、干式空芯电抗器的常见故障

干式空芯电抗器的运行故障主要是由于线圈受潮、局部放电电弧、局部过热绝缘烧损等线圈匝间绝缘击穿，以及漏磁造成周围金属构架、接地网、高压柜内接线端子损耗和发热等。主要表现为：外表面树枝放电、滑闪、局部击穿、匝间短路和烧损等。