

变压器故障 与监测

王晓莺 等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



变压器故障与监测

王晓莺 王建民 杨俊海 焦翠坪 编著



机械工业出版社

本书从过热、绝缘、短路、组件几方面阐述了变压器的故障起因和现象。第1章对历年来变压器易出故障和事故的部位进行了统计,并论述了提高大型电力变压器可靠性的几点措施;第2章用电磁场理论对常见过热故障与现象进行了较详细的分析,并有针对性地介绍了预防对策和解决方法;第3章论述了绝缘事故(故障)的起因和预防措施;第4章介绍了变压器绕组短路损坏的各种形式及相应解决办法;第5章介绍了分接开关及变压器其他组件的故障起因和对策;第6章介绍了国内外近年来最新研制的变压器故障在线监测装置和方法;第7章介绍了国内外对变压器的各种维护方法。

本书可作为科研院所、电厂(站)与变压器制造厂从事研究、设计、生产、运行、维护人员和有关大专院校的教师及学生的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

变压器故障与监测/王晓莺等编著. —北京:机械工业出版社, 2004.3

ISBN 7-111-13740-X

I. 变... II. 王... III. ①变压器—故障诊断②变压器—监测 IV. TM407

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第122532号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:赵玲丽 版式设计:冉晓华 责任校对:王欣

封面设计:陈沛 责任印制:施红

北京铭成印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2004年3月第1版·第1次印刷

890mm×1240mm A5·8.375印张·246千字

0 001—4 000册

定价:18.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993821、88379646
封面无防伪标均为盗版

前 言

电力变压器是电网中最重要的设备之一，他的可靠性直接关系到电网能否安全、高效、经济地运行。减少变压器故障，则意味着提高电网的经济效益。由于变压器长期连续在电网中运行，不可避免地会发生各种故障和事故。对这些故障和事故的起因分析和监测是变压器设计、运行维护人员多年来关注的热点问题。为此我们参考国内外大量的变压器事故分析文献资料，并结合自己的工作与认识，归纳整理编写本书，旨在为有关的技术人员提供对变压器事故分析和监测的全面认识和参考。

本书由天威保变电气股份有限公司王晓莺工程师编写第1、5、6、7章，王建民教授级高级工程师编写第2章，焦翠坪高级工程师编写第3章，杨俊海教授级高级工程师以及股份公司的有关领导编写第4章。

天威保变电气股份有限公司的有关专家对本书部分内容提出了许多宝贵的意见。赵银汉高级工程师对本书的编写工作给予了很多支持，在此我们表示衷心地感谢。

由于编者的专业水平所限，不足和缺陷之处在所难免，期望读者予以批评和指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 变压器的事故与故障	1
1.1 概述	1
1.2 变压器事故(故障)率及其原因概述	1
1.2.1 设计制造和材质因素对变压器事故(故障)率的影响	3
1.2.2 由于运行和安装原因所造成的变压器事故和故障	4
1.2.3 对变压器易出故障和事故部位的统计	4
1.3 变压器可靠性	5
1.3.1 变压器可靠性的基本概念	5
1.3.2 变压器的可靠性设计	5
1.3.3 变压器可靠性与经济指标的关系	6
1.3.4 提高大型电力变压器可靠性的措施	7
参考文献	11
第 2 章 变压器过热故障	12
2.1 概述	12
2.2 变压器损耗与发热	13
2.2.1 变压器损耗分类	13
2.2.2 变压器发热过程	18
2.2.3 变压器温升限值	20
2.3 变压器冷却	22
2.4 变压器过热故障及其起因	24
2.4.1 环流或涡流在导体和金属结构件中引起的过热	24
2.4.2 金属部件之间接触不良引起的过热	36
2.4.3 散热或冷却效果差引起的过热	38
2.4.4 异常运行或诱发因素引起的过热	39
2.5 过热故障的预防对策	43

2.5.1	采用新技术与优化产品结构	43
2.5.2	工艺制造和运输安装规范化操作	45
2.5.3	完善试验与检测过程	46
2.5.4	在线监测与运行维护	47
2.6	过热故障的诊断	48
2.6.1	变压器外观检查	48
2.6.2	变压器内部故障诊断	49
2.6.3	变压器器身检查	57
2.6.4	变压器典型过热故障例题分析	58
	参考文献	64
第3章	变压器绝缘事故	65
3.1	概述	65
3.1.1	引言	65
3.1.2	近年来的绝缘事故统计分析	66
3.1.3	绝缘事故发生的起因	70
3.2	变压器的绝缘结构与作用电压	74
3.2.1	变压器的绝缘结构分类	74
3.2.2	油纸组合绝缘结构的特点	75
3.2.3	变压器绝缘性能要求	77
3.2.4	作用电压的种类	80
3.2.5	试验电压类型	82
3.2.6	作用电压在变压器绕组上的电压分布	82
3.3	工作电压下的绝缘事故	83
3.3.1	悬浮导体	83
3.3.2	金属异物	84
3.3.3	杂质	85
3.3.4	绝缘受潮	87
3.4	过电压下的绝缘事故	93
3.4.1	暂时过电压	93
3.4.2	雷电过电压	94
3.4.3	操作过电压	101
3.4.4	陡波前过电压 (VFTO)	105
3.5	预防事故的检测	109

3.5.1	变压器油中溶解气体分析法	111
3.5.2	电气检测法	118
3.6	事故的预防措施	124
3.6.1	制造质量	124
3.6.2	运行维护	125
	参考文献	126
第4章	变压器短路故障	128
4.1	变压器短路故障概述	128
4.2	对变压器承受短路能力的要求	130
4.2.1	过电流条件	130
4.2.2	热稳定要求	136
4.2.3	动稳定要求	141
4.3	变压器绕组短路故障的主要形式	145
4.3.1	绕组变形导致匝绝缘破裂而引起匝间短路	146
4.3.2	绕组变形导致主绝缘强度降低而造成主绝缘击穿	146
4.3.3	绕组的辐向失稳	147
4.3.4	绕组的轴向失稳	156
4.3.5	三相变压器绕组的整体位移与倾斜	160
4.4	提高变压器抗短路故障能力的措施	161
4.4.1	设计方面	161
4.4.2	工艺和材料方面	164
4.4.3	结构方面	165
4.4.4	试验方面	166
4.4.5	对运行维护方面的建议	166
	参考文献	167
第5章	变压器组件故障	169
5.1	概述	169
5.1.1	分接开关的形式和结构特点	169
5.1.2	分接开关的安装和运输注意事项	176
5.2	分接开关故障	176
5.2.1	分接开关常见故障	176
5.2.2	分接开关常见故障的起因分析和相应措施	181

5.2.3 分接开关的维护	183
5.3 常见的套管故障	185
5.4 其他组件故障	186
5.4.1 冷却器故障	186
5.4.2 储油柜、油泵、阀门等组件的故障	187
参考文献	187
第 6 章 变压器在线监测	189
6.1 概述	189
6.1.1 在线监测的经济意义	189
6.1.2 变压器在线监测的条件和特点	191
6.1.3 在线监测的对象和经济效益	191
6.2 变压器在线监测的方法和装置	192
6.2.1 变压器在线监测的原理和程序	192
6.2.2 变压器在线监测的范围	193
6.2.3 变压器在线监测装置	194
6.2.4 变压器绕组热点和变形的在线监测	197
6.2.5 变压器油中微水在线监测	199
6.2.6 变压器油性能指标在线监测	200
6.2.7 变压器漏油在线监测	200
6.2.8 变压器铁心在线监测	201
6.2.9 局部放电在线监测	202
6.3 红外监测	209
6.4 国外变压器在线监测概况	211
参考文献	219
第 7 章 变压器的运行和维护	221
7.1 概述	221
7.1.1 变压器经济运行的条件和相关因素	221
7.2 变压器维护	222
7.2.1 变压器维护的经济意义	222
7.2.2 变压器维护战略	222
7.3 变压器的现场检测	222
7.3.1 各种现场检测方法和检测内容	222

7.3.2	大型变压器的现场局部放电试验	223
7.3.3	极化和非极化电流测定法	225
7.3.4	现场检测装置	225
7.4	现场干燥受潮变压器	227
7.5	现场对大型变压器绕组的替换维修	228
7.6	现场处理变压器油	230
7.6.1	变压器油的各项性能指标	230
7.6.2	现场处理变压器油的方法	230
7.6.3	现场处理变压器渗漏油	233
7.7	利用因特网对变压器进行维护	236
7.8	变压器的寿命损失和寿命管理	238
7.8.1	变压器寿命损失的影响因素	238
7.8.2	水分对油纸绝缘寿命的影响	239
7.8.3	水分进入变压器的各种途径	242
7.8.4	水分对变压器部件的影响	243
7.8.5	变压器绝缘表面的沉积物对绝缘性能的影响	245
7.8.6	国外对大型变压器的状态分类	246
7.8.7	变压器状态评价的特点和方法	247
7.8.8	变压器剩余寿命与绝缘纸寿命指标	252
7.8.9	变压器剩余寿命评估程序	252
7.9	国外现场维护安装高压变压器的经验	254
7.9.1	现场维修经验	254
7.9.2	大型变压器的解体运输和现场安装	255
	参考文献	257

第 1 章 变压器的事故与故障

1.1 概述

变压器在运行中，会受各种因素的影响而造成其部件不能正常工作，最严重的情况是造成变压器失效，从而影响电网的正常运行，这种情况会造成巨大的经济损失。

根据电力部门的规定，变压器的故障与事故的区别在于：如果在运行中变压器某个部位（或部件）经过检查、试验，证实存在问题或缺陷，但通过检修的方式能够使变压器继续正常运行，或者由于变压器自身的某种原因引起变压器跳闸，但不需要修理便可重新投入运行的情况，均属于故障。

故障又可细分成两类。如果按照变压器对电力系统供电影响的程度来划分，在运行中出现的故障必须停电检修，应属于一类故障。对于一类故障首先应当从结构设计、制造工艺、材料质量和运行维护方面严加注意。如果故障是出在计划检修或预防性试验中，但仍可以使变压器坚持运行到检修期的，应属于第二类故障。对于第二类故障，应当加强现场的维护和监测，设法控制故障不向严重发展。

对于事故的定义是：凡是由于变压器本身的原因，或者由于系统中其他原因，致使变压器在运行中出现跳闸或者被迫停止运行，同时变压器受到明显破坏，必须经过修理才能重新投入运行的，称之为事故。

1.2 变压器事故（故障）率及其原因概述

变压器事故率是电力系统评价高压设备运行状况的一项重要指标。他还是衡量产品质量优劣的一项基本标准。按照能源部规定，事

故障率的计算公式如下：

$$\text{事故率} = \frac{\text{事故台数}}{100 \text{ 台} \cdot \text{年}}$$

造成变压器出现高事故率的原因有许多方面，如果按照运行时间来分析事故率的分布，投入运行不到一年的变压器事故率最高，占事故总数的 1/5；投入运行 5 年以内的变压器事故率，大约要占事故总数的 1/3。因此，在运行前 5 年内，变压器事故率最高，这期间事故一般称为早期损坏的事故。

从变压器结构方面来说，变压器设计结构不合理（存在明显的结构设计缺陷）和工艺材质控制不严等方面的缺陷，均是造成高事故率的主要原因。

在变压器运行的初期阶段，由于设计和制造因素以及运行环境等因素造成的事故屡见不鲜。例如，某 500kV 级联络变压器，由于调压绕组引线结构复杂、部位拥挤、静电环连线结构不合理，致使局部场强过高，造成绝缘的薄弱环节。变压器运行几十个小时便发生了事故。这起事故造成绝缘垫块位移，绝缘纸板有两处存在 100mm 损伤、中压绕组出现严重烧损、中性点引线绝缘和调压绕组绝缘纸筒被破坏、静电环出线被烧断、油箱加强筋焊缝开裂等严重后果。造成事故的主要原因是设计结构不合理。

变压器的运行实践表明，当变压器经过一段运行时间后，其事故率呈现下降的趋势。究其原因是由于经历过初始事故期后，变压器会处于一种比较稳定的状态。经历过这段稳定运行期后，变压器将进入结构部件的老龄化时期。在这一时期，事故率又有增高的趋势，这是因为变压器存在磨损部件，因此需要采取必要的维修和更换措施。在实际运行中，有的变压器在投入运行 10 年以后（按照常规判定应属于进入稳定期或低事故状态阶段），仍然出现了由于设计结构或制造缺陷导致的事故。其根本原因是由于不同性质的事故具有不同的潜伏周期。如果属于安装质量方面的问题，往往暴露得比较早。

由于老化而造成变压器损坏的情况并不多见。这主要是由于目前的状态维修已对问题进行了及时的处理和解决。

运行经验表明，制造质量和运行维护两方面都做得较好的变压

器，其故障率和事故率都较低，因此运行效率也高。

1.2.1 设计制造和材质因素对变压器事故（故障）率的影响

根据历年对变压器事故统计分析可以看出，由于变压器结构设计、制造工艺和材质方面的因素，造成变压器出现事故的比例很大，根据统计，大约占 80% 左右。例如，变压器抗短路强度不够，最终可以导致变压器损坏，这明显是制造方面的原因。短路事故在事故总数中大约占 44% 左右。几年前，某电厂一台 220kV 级 12 万 kVA 主变压器则由于变压器相间出现短路，最后造成整台变压器烧毁。分析事故的直接原因是由于变压器垫块和围屏纸板的接触部位场强较高，当绝缘油中进入水分和杂质以后，在电场力的作用下，杂质向高场强区集中，因此导致发生放电。受潮纸板在长期放电和沿面场强的作用下，会以枝状放电通道向两端延伸，最后造成相间或对地的击穿。还有另一个电厂的 110kV 级变压器，由于焊接质量问题（开焊），使变压器中压分接引线与绕组焊接处烧断，造成上、下分支负载不均匀，导致事故发生。还有的变压器是由于低压引线铜排过长，a、b 相间距离不够，引起相间短路。此外，由于低压绕组压紧力不够，在经受短路力的作用下，绕组必定要产生轴向位移，迫使高低压绕组间的高度差加大，并且加剧了匝间的不平衡。在强大的过电流或过电压作用下，会导致绝缘击穿。

由于材质本身质量不好所导致的变压器事故也很常见。例如，当变压器压板的机械强度和刚度不够时，在强大的外力作用下，层压纸板容易被折断。因为受强大的电磁场作用，径向力会使内绕组向铁心方向挤压，最终造成铁心损坏。如果低压绕组采用机械强度很差的换位导线，则会使导线出现胀包、堵塞油道，造成变压器动稳定性能差、耐受短路的能力不够，最后造成绕组低压侧三相短路、引线支架断裂和绕组变形。

由于材质不良和制造工艺不良给组件带来的影响主要体现在分接开关上。开关的质量问题主要是内部连接件松动、材料强度差，以及触头接触不良和脱落、限位开关失灵等方面。由于套管本身质量问题所导致的变压器事故很少，问题大多出现在设计结构方面。例如，套管的出线端和主绝缘结构设计不合理，引线绝缘距离和局部高场强区

主绝缘设计裕度不够。属于工艺制造方面的问题是引线连接紧固时应消除应力，防止绝缘筒在干燥过程中变形。也有的变压器在完成总装后的注油过程中，由于油箱的真空度不够，造成套管在出厂试验中多次出现闪络和击穿。

1.2.2 由于运行和安装原因所造成的变压器事故和故障

与设计制造相比之下，由于运行和安装原因导致的变压器事故和故障约占总数的 20% 左右。

由运行和安装所导致的事故和故障主要包括以下几个方面：

1) 变压器在投入运行后，器身或部件进水受潮。例如，防爆筒薄膜破损、防爆管失去作用后使变压器绝缘受潮。

2) 在变压器的检修或运行及维护方面不当。例如，在安装或检修时造成变压器部件的碰伤。

3) 由许多外界因素，例如，雷击、过电压运行、污闪等引起变压器事故。

1.2.3 对变压器易出故障和事故部位的统计

对变压器易出故障和事故的部位进行统计分析是十分必要的。他可为制造厂的设计人员和电力部门的运行、维护人员提供侧重和加强的着眼点。

根据历年来电力部门对变压器事故的统计分析数据可以看出，变压器较容易出现事故的部位主要是绕组、主绝缘和引线等绝缘系统。多年来这些部位所出现的变压器事故率始终占第 1 位。分接开关和套管的事故率则占第 2 位。

对于变压器故障和缺陷来说（从统计分析资料可以看出），由于及时采取了运行维护和试验检修措施，使不少故障和缺陷得以及时消除在运行的初期阶段。但也有一些故障和缺陷依然潜伏下来。例如，变压器油色谱分析超标，直流电阻、局部放电和介质损耗超标等。从故障和缺陷的统计数据中可以看出，变压器的渗漏油故障占第 1 位（大约占故障总数的 1/3 左右）；第 2 位是分接开关的故障和缺陷（大约占故障和缺陷总数的 1/5 左右）；第 3 位是铁心的故障和缺陷（大约占故障和缺陷总数的 1/7 左右）；第 4 位是套管的故障和缺陷（大约要占故障总数的 1/8 左右）；第 5 位是绕组的故障和缺陷（大约要

占故障总数的 1/12 左右)；第 6 位是变压器主绝缘和引线的故障和缺陷 (大约要占故障总数的 1/20 和 1/25 左右)。

根据以上数据可以说明，变压器绕组、主绝缘和引线绝缘系统应当是制造厂家重点加强的部位，其次是应当加强分接开关和套管的质量。而变压器的渗漏油问题则是电力运行部门应当重点维护和检修的方面。

1.3 变压器可靠性

1.3.1 变压器可靠性的基本概念

可靠性是指一个部件或者一台变压器在他的寿命期间能否执行正常的功能，会不会出现早期失效，由此可直接反映出他的可靠性高低。机电产品（变压器）的主要质量标志是可靠性。通过现场试验所反映的状态信息能够体现出一台产品的可靠性指标。

可靠性是产品质量的核心内容，表示产品可靠性的一种数值定量是可靠度。

可靠性的广义概念是指产品在整个寿命期内的某一时刻具有维持规定功能的能力。提高变压器可靠性的目的和意义在于降低故障概率，提高运行效率，减少或避免不必要的经济损失。

能源部规定，变压器或发电机组的可靠性指标如下：

$$\text{变压器或发电机组的可用率} = \frac{\text{可用小时数}}{\text{统计期间}}$$

$$\text{强迫停运率} = \frac{\text{强迫停运小时}}{\text{运行小时} + \text{强迫停运小时}}$$

1.3.2 变压器的可靠性设计

要保证变压器在运行中不发生故障，最关键的是应当使所设计的变压器达到规定的可靠性要求。在设计人员设计变压器时，必须同时进行可靠性方面的设计。其设计目标参数包括可靠度、可靠寿命、失效率等。

变压器设计人员进行变压器可靠性设计时，必须要全面考虑变压器各部件之间的可靠性、维护性及经济性。只有让变压器具备良好的

维护性，才有可能提高变压器的可用性。维护性指变压器部件应当容易维护并且容易撤换，容易保养。可用性指变压器能够充分发挥效能，使其适合于人的使用和控制、适合于环境条件的性能。

1.3.3 变压器可靠性与经济指数的关系

产品可靠性直接与经济指标相关。一台可靠性很高的变压器，在其设计、研制和制造过程中，对于工艺和所用材料等方面的要求必然很高。因此导致相应的制造成本和投资费用都在增高。如果一台变压器的故障率、事故率高，所造成的维护费用必然会大。这是产品可靠性低的必然后果。

产品可靠性指标体系和可靠性技术指标体系见图 1-1 和图 1-2。

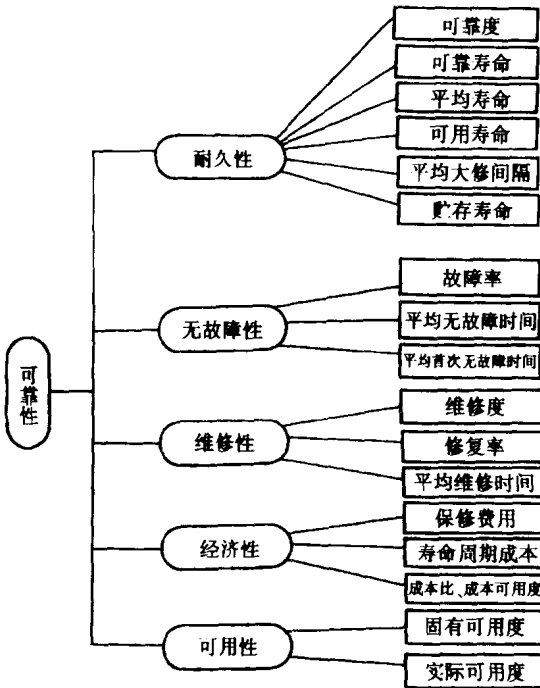


图 1-1 可靠性指标体系

1.3.4 提高大型电力变压器可靠性的措施

大型电力变压器是电网中至关重要的高压设备，他的可靠性将会直接影响电站（电厂）的运行效率。

根据电力部门对国内 500kV 大型电力变压器运行质量的分析资料可以看出，提高大型电力变压器可靠性主要应从以下几方面考虑：

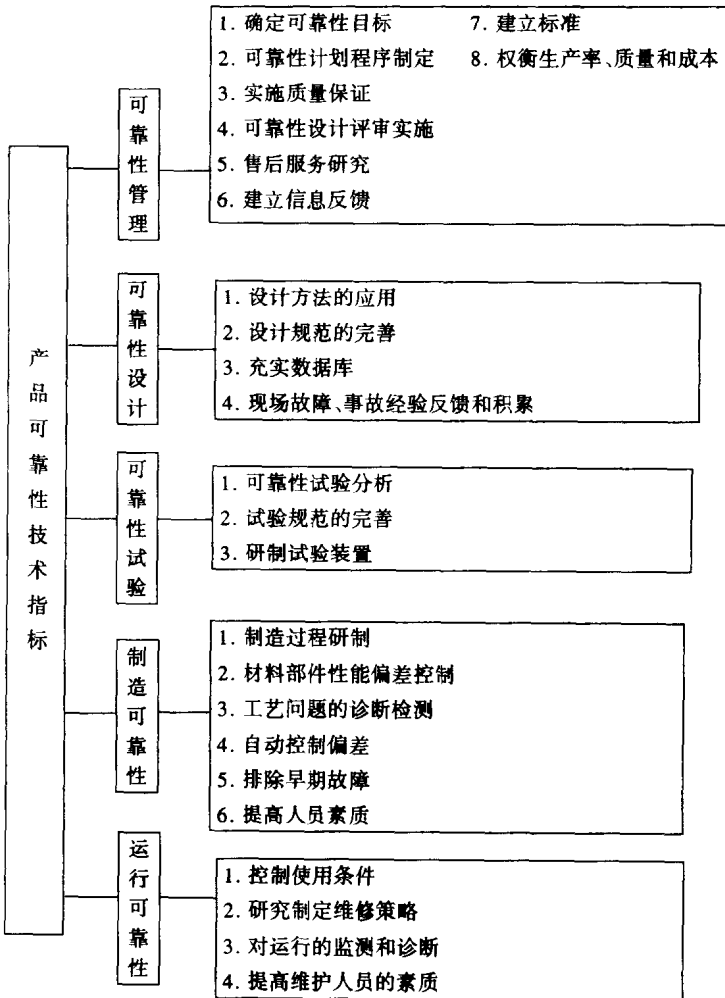


图 1-2 可靠性技术指标

1. 提高大型电力变压器的主绝缘强度

大型电力变压器的绝缘系统是运行质量的关键，因此绝缘系统的最佳化设计十分重要。特别是对于 500kV 级及其以上的超高压大型电力变压器更是如此。变压器绕组内绝缘和绕组端绝缘结构的最佳化设计能够使变压器尺寸得到降低。绝缘系统的最佳化体现在以下几个方面，即在选择最小的绝缘距离时，在规定的裕度范围内可保持最大的局部电气应力。设计人员必须考虑瞬变过电压对变压器绝缘产生的瞬变影响。应当使应力出现在具有介电强度的绝缘结构和设计的安全裕度范围内。变压器设计人员还要考虑与最大局部电气应力有关的位置、应力大小和波形。最大电气应力是评价绝缘强度的一项关键指标。变压器高压和低压绕组之间的主绝缘空道的电气应力也应当予以研究和重视。

通过对于 500kV 变压器发生的主绝缘沿绝缘纸板表面放电事故的分析 and 试验研究发现，加强对第一油隙的设计十分关键。设计人员要合理选取端部绝缘尺寸，对于自耦降压变压器来说，还要使中压端部带有载分接开关的调压部件结构设计合理，要适当增加绝缘裕度，避免中压端部的场强最大处发生局部放电。

2. 防止油流带电

变压器油流带电的主要原因取决于油的流动速度。由于变压器油温在 40℃ 左右时产生油流带电的倾向性最大，所以应当通过控制变压器油泵的运行数量来避免变压器绝缘油处于 35 ~ 45℃ 温度范围内。应当合理选择并准确地计算绕组各个部位的油流速度，这是防止油流带电的重要关键。应当尽可能使变压器的最大油流速度降低到 0.5m/s 以下。因为变压器油流带电的起因是油与纤维板绝缘之间的相对运动所引起的摩擦。这种摩擦会造成电荷的分离。电荷的数量则受油的流速、油的带电性、油的温度和油道的光滑程度等多种因素的影响。在高静电场和正常运行电压形成的交流场强叠加作用下，电荷会使绝缘表面出现闪络和击穿现象。

3. 必须提高变压器绕组的抗短路机械强度

应当侧重解决大型电力变压器低压绕组内侧的支撑问题，以便保证变压器各绕组之间的轴向能够均匀压紧。采取的措施包括将线圈垫