

变压器油的选择、使用和处理

BIANYAQIYOU DE XUANZE SHIYONG HE CHULI

姚志松 姚磊 等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



推荐用书

新型配电变压器结构、原理和应用

49.00 元



策划编辑：张沪光

电 话：010-88379767

☆ ISBN 978-7-111-20720-7

☆ 封面设计 / 电脑制作：陈沛

上架指导：工业技术 / 电气工程 / 电工技术

ISBN 978-7-111-20720-7



9 787111 207207

地址：北京市百万庄大街22号 邮政编码：100037
联系电话：(010) 68326294 网址：http://www.cmpbook.com
(010) 68993821 E-mail: online@cmpbook.com

定价：25.00 元

变压器油的选择、 使用和处理

姚志松 姚 磊 等编著



机械工业出版社

本书对用于变压器类、开关类、高低压电器设备的变压器油作了系统介绍,包括品种、组成、牌号、规格、提炼工艺、物理、化学、电气质量指标与性能关系,各种试验、标准、选择、对比、运输、贮存、运行、维护、管理、鉴别、检测周期、油务工作、监督方法、油的老化、防劣、净化再生,液体电介质特点,油处理设备和吸附剂应用实例,油分析诊断故障原理和实例,油介质损耗因数增高和处理的机理和实例,油流带电和金属杂质的产生原因和处理,在线净油器和油气体在线监测装置等。对高燃点油和不燃油等其他绝缘油也作了简介。

本书适合供电、制造、工矿、农村电工和技术人员使用,尤其适用油品供销、试验和处理因油引起设备故障的管理人员和技术工人。

图书在版编目 (CIP) 数据

变压器油的选择、使用和处理/姚志松等编著. —北京:机械工业出版社, 2007. 2

ISBN 978-7-111-20720-7

I. 变... II. 姚... III. 变压器油 - 基本知识
IV. TE626. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 002804 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑: 张沪光 责任编辑: 王 玫 版式设计: 张世琴
责任校对: 王 欣 封面设计: 陈 沛 责任印制: 杨 曦
北京机工印刷厂印刷

2007 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

140mm × 203mm · 11 875 印张 · 316 千字

0 001—4 000 册

标准书号: ISBN 978 7 111 20720 7

定价: 25.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379767

封面无防伪标均为盗版

前 言

变压器、开关等高低压电器设备论述的书目前市面上较多，但其所用的变压器油的专论书籍缺乏。随着设备电压提高、数量增多、油品工艺简化、油源逐渐枯竭而代用等诸多因素，引起因油品而发生的故障大幅上升，产生了许多新问题、新试验、新设备，为此作者经过努力，将这些资料汇总、提炼、深化、补充而成本书。

全书剖析了变压器油整个链条中各个环节。对石蜡基油和环烷基油作了对比，对油介质损耗因数以解释介电常数和原子结构来引导搞清机理。对故障分析有氢超标等各种类型，包括变压器、套管、耦合电容器等处理。对油流带电、氢狗等新事物也有专论。对九个油标准分别列出和介绍。还有国家标准中的油气判断导则的编制说明，导则中只有三比值法，为分析复杂故障，又介绍了国内外最新成果的立体比值法、四比值法、浓度图谱法。

贯穿全书内容是新、广、实、深入浅出，掌握详略。

作者在成书过程中，查阅和吸取了有关单位和个人的最新论文和成果，在此对所引用资料的作者表示诚挚的感谢！

编著本书除署名者外，参加编写的还有方大千高工、陈希明高工和高山、潘林凤、吴军、廖凤香等，全书由姚志松高工负责统稿。由于作者的水平，书中的不妥之处，望广大读者批评指正。

作 者

目 录

前言

第 1 章 变压器油综述	1
1.1 变压器油概述	1
1.1.1 用途和作用	1
1.1.2 组成和牌号	2
1.1.3 变压器油构成绝缘的特性	4
1.2 变压器油提炼制作工艺	8
1.2.1 提炼工艺简介	8
1.2.2 油中加氢精制机理	12
1.2.3 油中添加剂	13
1.3 变压器油的老化和防止	18
1.3.1 油的老化	18
1.3.2 影响油老化的因素	19
1.3.3 金属对油劣化的催化作用	20
1.3.4 油热老化的变化情况	21
1.3.5 防止油老化的措施	24
第 2 章 变压器油质量指标和使用关系	25
2.1 概述	25
2.2 变压器油物理质量指标	25
2.2.1 凝固点或倾点	25
2.2.2 闪点	26
2.2.3 粘度	27
2.2.4 密度	28
2.2.5 水分	28
2.2.6 界面张力	31

2.2.7 含气量和溶解气体组分	34
2.2.8 机械杂质和游离碳	36
2.2.9 色度	37
2.2.10 呋喃甲醛(糠醛)含量	37
2.2.11 多环芳烃含量	38
2.2.12 苯胺点	38
2.2.13 金属离子含量	38
2.2.14 添加剂含量	38
2.3 变压器油化学质量指标	39
2.3.1 酸值和水溶性酸(或碱)	39
2.3.2 腐蚀性硫(活性硫和苛性钠)	41
2.3.3 抗氧化安定性	41
2.3.4 析气性	42
2.4 变压器油电气性能质量指标	42
2.4.1 击穿电压	42
2.4.2 脉冲击穿电压	43
2.4.3 介质损耗因数	43
2.4.4 体积电阻率	45
2.4.5 油流带电度	46
2.4.6 相容性	47
2.4.7 样机换油试验	47
第3章 变压器油的试验	49
3.1 综述	49
3.2 全分析试验和简化试验	50
3.3 油击穿电压试验	51
3.4 油介质损耗因数试验	53
3.5 微水测量	56
3.6 油色谱分析试验	58
3.7 混油试验	65
3.8 糠醛试验和聚合度试验	67
3.9 油的各个质量指标试验方法简述	68

3.9.1	凝固点或倾点测定	68
3.9.2	闪点测定	68
3.9.3	粘度测定	68
3.9.4	密度测定	68
3.9.5	水分测定	69
3.9.6	界面张力测定	69
3.9.7	含气量和溶解气体组分测定	69
3.9.8	机械杂质和游离碳测定	69
3.9.9	色度测定	70
3.9.10	糠醛含量测定	70
3.9.11	金属离子含量测定	70
3.9.12	酸值测定	70
3.9.13	水溶性酸或碱的测定	71
3.9.14	腐蚀性硫测定	71
3.9.15	抗氧化安定性测定	71
3.9.16	析气性测定	71
3.9.17	击穿电压测定	71
3.9.18	脉冲击穿电压测定	72
3.9.19	介质损耗因数测定	72
3.9.20	体积电阻率测定	72
3.9.21	相容性测定	72
3.9.22	样机换油试验	72
3.9.23	抗氧化剂含量测定	72
3.9.24	油流带电度测定方法及影响因素	74
第4章	变压器油标准	81
4.1	概述	81
4.2	安装或大修交接时油标准	83
4.3	安装新油标准	86
4.4	运行中变压器油质量标准	86
4.5	变压器油预防性试验标准	88
4.6	油中气体分析判断标准	88

4.7 超高压变压器油交接和预防性试验标准	88
4.8 超高压变压器新油标准	92
4.9 进口变压器油标准	93
4.10 变压器油糠醛、纸聚合度和产气速率标准	95
4.11 变压器油其他综合标准	105
第5章 变压器油的选择	106
5.1 变压器油的结构组成与性能的关系	106
5.1.1 变压器油的基本结构	106
5.1.2 变压器油组分性能比较	108
5.2 环烷基油和石蜡基油性能的对比	110
5.3 变压器油选用原则	113
5.3.1 变压器油性能	113
5.3.2 变压器油选用原则	117
5.4 高压加氢基础油作变压器油性能	120
5.4.1 高压加氢基础油现状	120
5.4.2 高压加氢基础油性能容易变差	124
第6章 液体电介质的性能特点	129
6.1 各种液体电介质的特点和用途	129
6.2 相对介电常数	131
6.3 液体电介质击穿机理	133
6.4 液体电介质的击穿特性	135
6.4.1 工频击穿电压	135
6.4.2 影响击穿电压的因素	136
第7章 油务工作	144
7.1 供电部门油务管理制度	144
7.2 制造厂油务管理工作	147
7.3 油脱气和脱水	149
7.3.1 制造厂使用的脱气脱水方法	149

7.3.2 供电部门使用的脱气脱水方法	153
7.4 变压器的真空处理和注油	157
7.4.1 变压器油的检查和要求	157
7.4.2 变压器抽油和注油的一般规定	157
7.4.3 变压器真空注油	158
7.4.4 胶囊式储油柜的注油	160
7.4.5 隔膜式储油柜的注油	161
7.5 热油循环	161
7.6 变压器油的运输和贮存	162
7.7 带电滤油和带电注油	165
第8章 变压器油的运行维护和几种处理方法	167
8.1 变压器油的保护系统和运行	167
8.1.1 变压器油系统概述	167
8.1.2 绝缘结构对油的保护作用和机理	170
8.1.3 变压器的油保护装置	173
8.2 变压器油的采样	181
8.3 油的简易鉴别和检测周期	185
8.3.1 变压器油质量的简易鉴别	185
8.3.2 变压器油的检测周期	186
8.4 油的几种处理方法	188
8.4.1 油处理方法综述	188
8.4.2 压力滤油法	192
8.4.3 真空滤油法	194
8.4.4 油再生处理	198
8.5 油处理设备和吸附剂应用实例	198
8.5.1 油处理设备的应用实例	198
8.5.2 用高效吸附粉再生变压器油	203
8.6 污油处理系统	207
第9章 油分析诊断故障原理和减少误差方法	211
9.1 气相色谱分析法诊断故障的原理	211

9.1.1	故障诊断原理	211
9.1.2	变压器故障类型和油中气体组分关系	218
9.1.3	用四比值法判断故障类型	220
9.1.4	用浓度图谱法判断故障类型	221
9.1.5	故障热点温度和绝缘分解的判断	221
9.2	《变压器油中溶解气体分析和判断导则》编制说明	224
9.2.1	诊断方法的理论基础	224
9.2.2	诊断方法与实践经验相结合	226
9.2.3	关于“注意值”的说明	229
9.2.4	导则中对于产气速率规定的说明	230
9.2.5	用比值法来判断故障类型的说明	231
9.3	非故障缺陷引起的色谱异常	232
9.3.1	制造厂出厂前变压器油色谱分析	232
9.3.2	变压器运行后非故障引起的油色谱异常	234
9.4	减少油色谱分析中误差的方法	236
9.4.1	减少分析各环节误差	236
9.4.2	分析中氢含量严重偏差的原因	240
9.4.3	油色谱分析流程的改进	241
第10章	油色谱分析处理故障的实例	247
10.1	油中氢气超标的治理	247
10.1.1	变压器油中氢气超标的治理	247
10.1.2	互感器中氢气超标的治理	248
10.2	用油色谱分析变压器故障的实例	256
10.2.1	铁心多点接地故障的判断和处理	256
10.2.2	铁心发热引起色谱异常的处理	258
10.2.3	绕组断股时的色谱分析	262
10.2.4	匝间短路的分析和对策	264
10.2.5	油色谱监测高能量放电故障	267
10.2.6	调压开关故障的油色谱分析	271
10.2.7	引线绝缘破损故障	272

X

10.3	高压套管引起油色谱异常的处理	275
10.4	油色谱分析在耦合电容器中应用	279
10.4.1	油色谱分析对早期故障能弥补预防性试验的不足	279
10.4.2	严格采油样工艺是保证准确性的关键	280
10.4.3	耦合电容器油色谱数据的统计分析	281
10.4.4	7 台耦合电容器解体检查的情况	283
10.4.5	从耦合电容器事故看预防性试验	285
第 11 章	油介质损耗因数增高及处理	289
11.1	油介质损耗因数的意义	289
11.1.1	充电、吸收、泄漏三个电流与油介质损耗因数的关系	289
11.1.2	油介质损耗因数增高的危害	291
11.2	油介质损耗因数产生的原因	291
11.2.1	充电、吸收、泄漏三个电流的原子结构成因	291
11.2.2	产生油介质损耗因数的原因	294
11.3	油介质损耗因数增高的原因	295
11.3.1	混油、污染、水分和老化	295
11.3.2	微生物和产生胶体	296
11.3.3	油介质损耗因数试验仪器和测试方法的影响	300
11.3.4	频率、温度、光照的影响	303
11.4	油介质损耗因数增高的解决办法	304
11.4.1	解决办法综述	304
11.4.2	各种吸附方法	305
11.5	解决油介质损耗因数高实例	307
11.5.1	用吸附滤板法处理油介质损耗因数实例	307
11.5.2	三次大处理无效后换油而成功的实例	312
11.5.3	换油的分析和处理实例	313
11.5.4	实施换油的具体方法	316
第 12 章	油流带电和油中金属杂质的处理	323
12.1	油流带电	323
12.1.1	油流带电现象	323

12.1.2	油流带电现场测试情况	323
12.1.3	试验结果的分析	326
12.1.4	油流带电的处理	329
12.1.5	油流带电的机理	333
12.1.6	油流带电的模拟测试	334
12.1.7	变压器投产时油流带电实测	337
12.2	油中的金属杂质及处理	340
12.2.1	油中金属杂质的来源及危害	340
12.2.2	受金属污染后油的处理措施	344
12.2.3	油中金属元素的检测方法和建议	344
第 13 章	在线净油器和油气体在线监测	346
13.1	使用在线净油器的原因	346
13.2	在线净油器的工作原理和结构简介	349
13.2.1	在线净油器概述	349
13.2.2	MR 公司在线净油器	350
13.2.3	国产 LTC7500—10 型在线净油装置	352
13.2.4	国产 ZXJY 型在线净油装置	355
13.3	油色谱的便携式检测和在线监测	356
13.3.1	油色谱便携式检测装置	356
13.3.2	氢狗	360
13.3.3	HYDRAN201R 型在线监测装置	361
13.3.4	大型变压器色谱在线监测装置	362
参考文献		365

第 1 章 变压器油综述

1.1 变压器油概述

1.1.1 用途和作用

变压器油是指从石油炼制的天然烃类混合物的矿物型绝缘油，故变压器油又称绝缘油。它广泛应用于变压器类和断路器类等设备，如各类变压器（电力变压器、整流变压器、电炉变压器、试验变压器、矿用变压器、接地变压器、电除尘变压器等）、套管、电流互感器、电压互感器、调压器、电抗器、消弧线圈、耦合电容器、多油断路器、少油断路器、柱上油断路器、启动补偿器电容器、电缆等。其性能见表 5-6 和表 6-1。变压器油属易燃油，所以一般不包括合成油，即不包括不燃油和高燃点油。不燃油有聚氯联苯（PCB）和氟油两种，而高燃点油有硅油、 α 油、 β 油、 M 油、聚 α 烯、十二烷基苯、 E 油、 γ 油。变压器油的燃点是 165°C ，而高燃点油的燃点均在 300°C 以上，不燃油是不会着火的。高燃点油又称阻燃油，主要用在高燃点油浸式变压器、阻燃油有载分接开关、电容器、电缆等场合。而不燃油的聚氯联苯因致癌有毒，已禁用，氟油因价高货少，很少用。但现在有的厂商将高燃点油也称高燃点变压器油（如大连高路宝公司）。

目前广泛应用的绝缘液体还是矿物油系变压器油。变压器油以其优良的电气、物理热工性能应用于电气设备中，尤其是用于油浸式变压器中，已有 100 多年的历史。1887 年美国汤姆生取得变压器油专利，当时这种矿物油叫润滑油。1892 年被美国通用电气公司应用于变压器。因其需求量大，大变压器每台需 $50 \sim 60\text{t}$ ，品质和技术经济指标优越，使其使用经久不衰，始终占据着变压器液体介质的统治地位。变压器油的电气强度、

化学成分和介质损耗的好坏,直接影响整个电气设备的绝缘性能。变压器油闪点温度的降低和酸价的增加,是因电气设备局部过热使油分解而造成的。变压器油击穿电压的降低和介质损耗的增加,可以说明变压器受潮。因此,研究变压器油的性能及其变化对电气设备的安全可靠运行很有必要。

纯净的变压器油的电气强度达 $200 \sim 250 \text{ kV/cm}$, 比空气高 $4 \sim 7$ 倍。因此用它作绝缘可大大缩小变压器的体积。由于纸和纸板的原料很丰富、价格较便宜、机械强度尚好,浸变压器油后电气强度高,当油被击穿以后,绝缘可以恢复,不会留下永久性的放电通道,因此变压器油得到了广泛的应用。变压器油绝缘强度高,在电气设备中主要作绝缘介质使用,又因比热容较大,故也作冷却介质,在断路器和有载分接开关及起动补偿器中作熄弧介质使用和起冷却触头作用。在高压电缆中,油起填充、浸渍的作用,以清除电缆内部的气体,提高电气强度。在油浸纸介电容器中,油起填充、浸渍、绝缘的作用,以提高电容量和绝缘强度。由于灭弧强度主要取决于油气分解产生的油气混合物,这种油耐压降低不会显著降低其灭弧能力,故少油断路器的油要求可以比变压器中所用油的要求低些。

1.1.2 组成和牌号

变压器油是从石油中提炼出来的,它的成分很复杂,主要是由环烷烃、烷烃和芳烃构成。工程上用的净化变压器油,电气强度达到 $50 \sim 60 \text{ kV/2.5 mm}$, 运行中受到电场和热场的影响,油会分解出气体和聚合物。在高电场中,这些分解出来的气体,以及油中的水分和纤维等杂质,在电场的作用下,顺着电场方向排列成水分、气泡或杂质的“小桥”,成为泄漏的通道。情况严重时,导致“小桥”击穿,使油的电气强度降低。因此,变压器内部的绝缘结构,要考虑这个因素,采取必要的措施,防止形成泄漏“小桥”通道。

一般来说,各种变压器油含芳香烃的比例大约为 $3\% \sim 15\%$, 含烷烃大约为 $25\% \sim 60\%$, 含环烷烃大约为 $10\% \sim 60\%$

(均指体积分数)。对含环烷烃 40% 以上、烷烃 50% 以下的油称为环烷基油，而其他的油称为石蜡基油或混合基油（中间基油）。

变压器油的牌号有 DB-10、DB-25、DB-45 三种，它们的凝固点分别为 -10°C 、 -25°C 、 -45°C 及以下温度。也称为 10 号、25 号、45 号变压器油，后者用于寒冷地区。其中“D”表示“电”力用油，“B”表示“变”压器油。我国南方前两种牌号用得较多，而我国北方后两种牌号用得较多。

变压器油又根据是否含有抗氧化添加剂而分为阻化油和非阻化油两类。阻化油含有抗氧化添加剂，非阻化油不含抗氧化添加剂，但可以含有其他添加剂。按国际电工委员会（IEC）标准，根据油的物理性能（主要是闪点、凝固点和粘度），将油分成三个等级 I、II、III 级，如果是阻化油，后面再加“A”字，即 IA、IIA、IIIA 级。目前我国生产的变压器油多属阻化油，其性能指标见表 1-1。

表 1-1 阻化油标准（IEC-396）

变压器油性能	指 标		
	IA 级	IIA 级	IIIA 级
运动粘度/ (mm^2/s)			
40 $^{\circ}\text{C}$ 时	≤ 16.5	≤ 11.0	≤ 3.5
-15 $^{\circ}\text{C}$ 时	≤ 800		
-30 $^{\circ}\text{C}$ 时		≤ 1800	
-40 $^{\circ}\text{C}$ 时			≤ 150
闪点/ $^{\circ}\text{C}$	≥ 140	≥ 130	≥ 95
凝固点/ $^{\circ}\text{C}$	≤ -30	≤ -45	≤ -60
外观	澄清，无沉淀及悬浮物		
密度/ (kg/dm^3) (20 $^{\circ}\text{C}$ 时)	≤ 0.895		
界面张力/ (N/m) (25 $^{\circ}\text{C}$ 时)	$\geq 40 \times 10^{-3}$		
腐蚀性硫	无		
含水量/ (mg/kg)	30 ~ 40		

(续)

变压器油性能	指 标		
	I A 级	II A 级	III A 级
抗氧化添加剂	协商规定		
酸值/(mgKOH/g)	≤ 0.03		
击穿电压/kV 新油	≥ 30		
经过处理	≥ 50		
90℃时 $\tan\delta$ (40~60Hz)	≤ 0.005		
氧化安定性/h	120		

各地变压器油的油基和工艺过程都不一定相同, 变压器油的化学成分为饱和碳氢化合物, 产地不同的变压器油一般因油基不同而不能混合使用。不同牌号的油一般也不能混用。不同油基的油有不同的老化速度, 混用后的油, 老化速度要加快, 因此不能混用。

1.1.3 变压器油构成绝缘的特性

变压器油构成的绝缘, 有如下特性, 在设计和使用中应予以注意。

1. 油中含水量和油耐压密切相关

据 GB50150—2006《电气装置安装工程 电气设备交接试验标准》、GBJ148—1990《电气装置安装工程 电力变压器、油浸电抗器、互感器施工及验收规范》、GB/T7595—2000《运行中变压器油质量标准》及 DL/T596—1996《电力设备预防性试验规程》标准规定, 各电压等级变压器对油的耐压和含水量(微水)要求见表 1-2。而油耐压(在标准油杯中电极间距 2.5mm 时工频击穿电压)与含水量关系如图 1-1 所示。

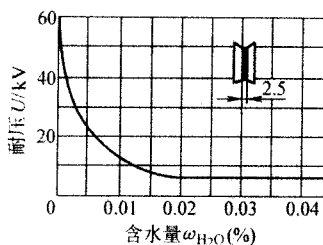


图 1-1 油内微水与油耐压关系曲线