

DAXING YOUJIN DIANLIBIANYAQI
YINGYONG JISHU

董宝骅 著

大型油浸电力变压器 应用技术



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

C14059288

TM411
02

DAXING YOUJIN DIANLIBIANYAQI
YINGYONG JISHU

大型油浸电力变压器 应用 技 术

董宝骅 著



TM411 / 02

 中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



北航

C1747437

内 容 提 要

本书为介绍大型油浸电力变压器应用技术的专业书籍，是作者十多年来在全国各地培训大型油浸电力变压器应用技术的讲义精髓。

本书共分 10 章，分别介绍了变压器的基础知识、结构、选购、制造、试验、安装工程、运行及在线维护、状态评估、故障诊断与消缺检修、事故分析与善后处理，其中后两章在该书中有重点介绍。

本书主要用于在电力行业一线从事大型油浸电力变压器相关工作的技术人员使用，也可供电力行业的相关工作者及高校相关专业的师生参考阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

大型油浸电力变压器应用技术/董宝骅著. —北京: 中国电力出版社, 2014. 8

ISBN 978-7-5123-5975-8

I. ①大… II. ①董… III. ①油浸变压器-电力变压器
IV. ①TM411

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 116797 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 8 月第一版 2014 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 17 印张 412 千字

印数 0001—3000 册 定价 50.00 元

敬 告 读 者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

本人几十年来曾在全国各地（包括海南、乌鲁木齐、香港等地）讲解过变压器使用技术。每次讲课后，都有学员反映讲解的内容很有实用价值，希望将相关讲义编写成书。

本人自觉由于每次讲课的时间有限，有所侧重，但不够全面，需要进行系统梳理，以便更好地将理论与实践结合起来。经过十年时间，几经易稿，终于写成本书，其中包括以下几方面内容：一是汇集变压器的基础知识；二是说明变压器的结构；三是主张权衡适用性、可靠性及经济性，择优选购变压器；四是介绍变压器制造的过程；五是分析变压器试验；六是推荐变压器运行中免检修的安装方法；七是建议在控制论的指导下，简化变压器的运行；八是提倡以质变作为界限，使变压器状态评估切实可行；九是列举变压器故障的实例和消缺检修的方法；十是实事求是分析变压器的事故原因，寻找行之有效的反事故措施。

本书的服务对象是具体从事变压器工作的人员，篇幅紧凑、简明扼要，便于学以致用，所以本书照片和示意图较少，主要为文字。

我国电网使用的是全世界主要厂家生产的变压器，在几十年的运行中，可能发生的故障或事故几乎全部出现了。经过全面收集、系统归纳这些故障和事故，可以认清变压器的变化轨迹，对指导变压器的科学发展具有实质性的作用。

本书在成书过程中，得到许多同仁的帮助，不胜感激。但由于人员众多，贡献程度不同，难于排序。只能铭记在心，未能一一列举，敬请谅解。

书中难免会有疏漏和不妥之处，敬请广大读者批评、指正。

董宝骅

2014年4月



自序

1 变压器基础知识	1
1.1 变压器的原理、名称、术语和分类	1
1.2 变压器的关键材料	4
1.3 变压器的相关计算	7
1.4 变压器的运行方式	10
2 变压器结构	13
2.1 变压器的总体构成	13
2.2 变压器的分部构成	13
3 变压器选购	21
3.1 基本常识	21
3.2 变压器规范	24
3.3 变压器性能参数	27
3.4 变压器的外部结构选择	30
3.5 变压器的配件选择	35
3.6 签订商务合同	46
4 变压器制造	48
4.1 变压器生产管理	48
4.2 变压器绕组制造	48
4.3 变压器铁心制造	52
4.4 变压器油箱制造	55
4.5 变压器装配	57
5 变压器试验	61
5.1 概述	61
5.2 适用性试验	62
5.3 可靠性试验	69
5.4 诊断性试验	80
6 变压器安装工程	94
6.1 概述	94

6.2	运输	94
6.3	准备工作	100
6.4	安装工程的核心工作	109
7	变压器的运行及在线维护	130
7.1	概述	130
7.2	变压器运行信息	130
7.3	变压器运行控制	134
7.4	变压器在线维护	137
7.5	提高变压器利用率	141
8	变压器状态评估	145
8.1	变压器的变化过程	145
8.2	变压器的状态	146
8.3	变压器状态评估的方法	152
9	变压器故障诊断与消缺检修	154
9.1	概述	154
9.2	局部过热故障的诊断与消缺检修	157
9.3	放电故障的诊断与消缺检修	181
9.4	形变故障的诊断与消缺检修	205
10	变压器事故分析与善后处理	224
10.1	概述	224
10.2	有关绝缘放电的知识	226
10.3	有关绕组变形的知识	235
10.4	放电事故分析与处理	242
10.5	变形事故分析与处理	258
	参考文献	263

变 压 器 基 础 知 识

1.1 变压器的原理、名称、术语和分类

1.1.1 工作原理

1831 年, 法拉第在实验中使用了两个线圈, 对其中一个通以电流, 另一个线圈则经过检流计接成闭合回路。通过实验发现, 当第一个线圈中电流大小发生变化时, 在另一个线圈中产生感应电动势, 从而出现电流, 使检电计发生偏转。

1833 年, 楞次根据他自己的实验结果, 指出感应电动势的方向。减弱原来磁通的变化, 感应电动势为负值; 增强原来磁通的变化, 感应电动势为正值。

后人综合法拉第和楞次的研究成果, 形成电磁感应定律。由于电磁感应现象首先由法拉第发现, 所以电磁感应定律又称为法拉第电磁感应定律。

电磁感应定律是变压器基本的、核心理论。

变压器的工作原理是: 一次绕组接通交流电源以后, 在铁心中感应出交变磁通, 该交变磁通在二次绕组中感应出频率相同的电动势。单相双绕组变压器原理图如图 1-1 所示。

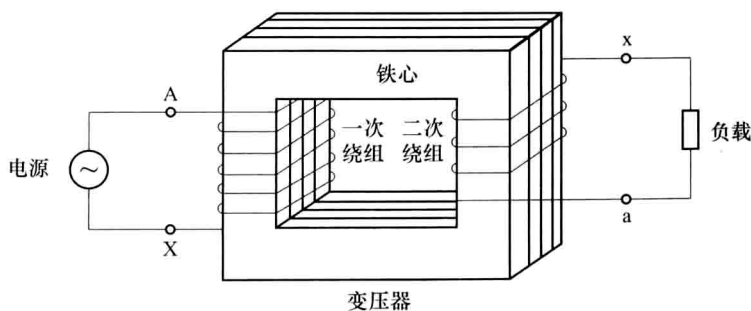


图 1-1 单相双绕组变压器原理图

1.1.2 名称

电磁感应定律出现以后, 匈牙利在 1884 年 9 月 16 日研制出第一台闭合铁心的变压器, 容量为 1400VA, 从此有了“变压器”这个名称。

GB 1094.1—1996《电力变压器 第 1 部分: 总则》定义电力变压器为“具有两个或多个绕组的静止设备”, 它为了传输电能, 在同一频率下, 通过电磁感应将一个系统的交流电压和电流转换为另一系统的电压和电流, 通常这些电压和电流是不同的。这里指的静止设备, 是相对于同样基于电磁感应定律的发电机和电动机。发电机和电动机在运行中是转动的, 变压器在运行中是不转动的。但是不能将“静止”绝对化, 因为电磁感应本身就是一种运动形态, 而且变压器在运行中, 状态是不断变化的。

1.1.3 变压器的相关术语

1. 匝电动势

(1) 定义。电磁感应定律的数学表达式为

$$e = -w d\Phi / dt \quad (1-1)$$

式中 w ——线圈匝数；

Φ ——穿过线圈的磁通 (Wb)；

“—”——感应电动势的方向。

变压器的励磁电压为正弦波 ($U = U_m \sin \omega t$) 时，在铁心中产生的主磁通也为正弦波 ($\Phi = \Phi_m \sin \omega t$)。当 $\omega = 1$ 时，由式 (1-1) 得

$$e_0 = 4.44 f \Phi_m (\text{V}) \quad (1-2)$$

式中 e_0 ——匝电动势 (V)。

(2) 作用。

1) GB 1094.1—1996 指出：变压器绕组是“某一电压值相对应的电气线路的一组线匝”。线匝是变压器绕组的基本单元。

2) 真实的变压器每匝导线耦合的磁通是不完全相同的，因此，匝电动势是一个数学平均值，即等于绕组空载电压除以绕组总匝数的商。

3) 电力变压器的匝电动势一般为几百伏。例如：频率 f 为 50Hz，铁心截面积 1m^2 ，磁通密度 B 为 1.7T，磁通幅值 $\Phi_m = 1.7\text{T} \times 1\text{m}^2 = 1.7\text{Wb}$ ，代入式 (1-2) 得匝电动势 $e_0 = 377.4\text{V}$ 。截面积为 1m^2 的铁心，是容量比较大的电力变压器。由此可以得出，绕组的额定电压越高，绕组的匝数越多。

2. 电压比和电流比

(1) 定义。电压比 K_u 是一绕组电压与另一绕组电压的比值，即

$$K_u = U_1 / U_2 \quad (1-3)$$

式中 U_1 ——一次侧电源电压 (V)；

U_2 ——二次侧空载时的输出电压 (V)。

假定没有漏磁通，两个绕组完全耦合（理想变压器），则电压比 K_u 为

$$K_u = E_1 / E_2 = w_1 e_0 / w_2 e_0 = w_1 / w_2 \quad (1-4)$$

式中 E_1 ——一次侧电动势 (V)；

E_2 ——二次侧电动势 (V)；

w_1 ——一次绕组匝数；

w_2 ——二次绕组匝数。

电流比 K_i 是一绕组的电流与另一绕组电流的之比值，即

$$K_i = I_1 / I_2 \quad (1-5)$$

式中 I_1 ——一次侧输入电流 (A)；

I_2 ——二次侧输出电流 (A)。

假定一、二次绕组的磁动势相互平衡（理想变压器），即 $I_1 w_1 = I_2 w_2$ ，因此电流比 K_i 为

$$K_i = I_1 / I_2 = w_2 / w_1 \quad (1-6)$$

(2) 作用。

1) 真实变压器每匝导线耦合的磁通是不完全相同的，电压比或电流比与绕组匝比之间的定性关系是主要的，定量存在偏差是次要的。

2) 改变电压比和电流比，必须依靠改变绕组匝比。例如，升高绕组电压需要依靠线匝累加，低压绕组的匝数一定比高压绕组的少。

3. 变压器容量

(1) 定义。变压器绕组的容量是以视在功率表示，单位为 VA。一次绕组的容量为 $U_1 I_1$ ；二次绕组的容量为 $U_2 I_2$ 。

(2) 作用。

1) 由于变压器的效率很高，将一次绕组的容量与二次绕组的容量近似地认为相等（即 $U_1 I_1 = U_2 I_2$ ），对于解决工程问题，偏差不大，且方便得多，所以变压器的额定容量等于一次绕组或二次绕组的额定容量。对于三绕组变压器，第三绕组的额定容量不等于变压器容量时，注明相当于变压器额定容量的比例，如 50% 或 30% 额定容量。

2) $U_1 I_1 = U_2 I_2$ 的前提是变压器没有漏磁和损耗，这是理想变压器，不是真实变压器。但 $U_1 I_1$ 与 $U_2 I_2$ 越接近，变压器的性能越优良。

4. 变压器阻抗

(1) 含义。变压器的阻抗源自广义的欧姆定律，表示输入电压与输出电流的关系。由于绕组的电阻分量、电容分量及电感分量是无规则的分布参数，以及铁心的非线性特征，变压器阻抗是综合的等效阻抗，只能通过试验测定。

变压器空载或负载时有各自的阻抗。励磁阻抗以 Z_m 表示。变压器阻抗一般是指负载阻抗，由电阻与电抗合成。一次绕组的电阻以 R_1 表示，电抗以 jX_1 表示；二次绕组的电阻以 R_2 表示，电抗以 jX_2 表示。

一次绕组和二次绕组建立联合方程式时，将二次绕组的电阻和电抗均利用变比关系归算到一次侧，分别以 R'_2 和 jX'_2 表示。负载以负载阻抗 Z'_l 表达。

(2) 作用。变压器在正常稳态运行中，电压、电流和磁通都是频率相同的时间正弦函数。电压与电流相互关系的定量计算，需要使用阻抗。

5. 变压器的等效电路

变压器等效电路有以下三种形式。

(1) 电磁方程式。根据基尔霍夫电流定律，一个节点上三个电流的相量和等于零，磁动势平衡方程式为

$$I_1 + I'_2 = I_m \quad (1-7)$$

根据基尔霍夫电压定律，回路内所有电压之和等于所有电动势之和。一次绕组的电动势平衡方程式可表示为

$$U_1 = -E_1 + I_1(R_1 + jX_1) = -I_m Z_m + I_1(R_1 + jX_1) \quad (1-8)$$

因为 $E_1 = E'_2 = I_m Z_m$ ，经归算后二次绕组的电动势平衡方程式可表示为

$$U_2 = E'_2 - I'_2(R'_2 + jX'_2) = I_m Z_m - I'_2(R'_2 + jX'_2) \quad (1-9)$$

将负载阻抗用 Z_l 表示，则

$$U_2 = I'_2 Z'_l \quad (1-10)$$

(2) 等效电路图。等效电路图采用数学模型图表示法，以阻抗为框架，对每个阻抗标明电流和电压，表示电流与电压的分布关系。例如，根据式 (1-8)～式 (1-10)，可绘制出 T 型等效电路图，如图 1-2 所示。

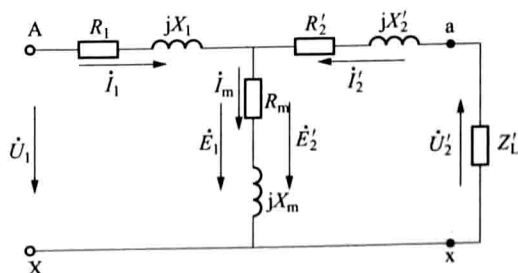


图 1-2 变压器 T 型等效电路图

(3) 相量图。相量图是按照电动势、电压、电

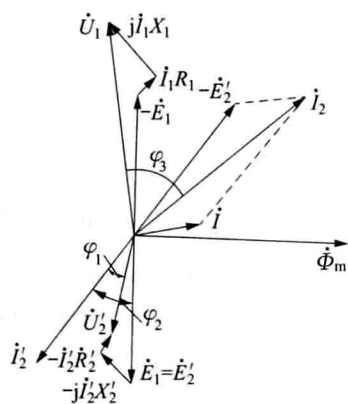


图 1-3 变压器带感性负载时的相量图

流和磁通的数值（电压、电动势和电流取方均根值）和相位（通常是以主磁通幅值 Φ_m 定方向基准，电动势 E_1 和 E_2 取相反方向）绘制，直观显示电磁方程式中电压与电流的数值和相角关系。变压器带感性负载时的相量图如图 1-3 所示。

1.1.4 分类

按变压器绕组耦合主磁通的方式，变压器常用分类如下：

(1) 双绕组变压器。一个铁心柱套两个绕组，产生两种电压。

(2) 三绕组变压器。一个铁心柱套三个绕组，产生三种电压。

(3) 自耦变压器。一个铁心柱套一个绕组，产生两种电压。绕组的一部分为公共绕组，另一部分为串联绕组。公共绕组为低压绕组；公共绕组与串联绕组串联，成为高压绕组。一般自耦的电力变压器，附有单独的低压绕组，这种自耦变压器的公共绕组称为中压绕组。

自耦变压器的特点是：①自耦变压器的公共绕组可以两用，因此，与额定容量相同的双绕组或三绕组变压器相比，体积小、质量轻；②一次绕组与二次绕组既有磁的联系，又有电的联系。变压器运行时，二次绕组（公共绕组）的中性点必须接地。

1.2 变压器的关键材料

1.2.1 导磁材料

1. 简介

变压器铁心使用的导磁材料经历了由钢丝、普通钢片、热轧硅钢片到晶粒取向冷轧硅钢片的发展。晶粒取向冷轧硅钢片问世以后，经过不断改进，损耗和导磁性能已经趋于极限。现在，大型电力变压器使用的电工钢带（片）都是晶粒取向冷轧硅钢片。为了适应晶粒取向冷轧硅钢片的特点，以降低铁心的空载电流和空载损耗，铁心制造采用全斜（45°斜角）步进叠积，用绑扎和夹件紧固。

1980 年研制出非晶合金材料（又称金属玻璃）的电工钢带。其优点是使变压器的空载损耗小，缺点是价格高、宽度小。适用于轻负载的小型配电变压器。

2. 特性

(1) 晶粒取向冷轧硅钢片的损耗。晶粒取向冷轧硅钢片的损耗由两部分组成：①磁滞损耗，即磁畴运动时消耗的电能；②涡流损耗，包括正常涡流损耗和异常涡流损耗。正常涡流损耗是涡流通过金属时在电阻上产生的损耗，与硅钢片厚度的二次方成正比；异常涡流损耗是由磁畴壁移动产生，与磁畴壁所占空间的大小成正比，与片厚成反比。

用晶粒取向冷轧硅钢片制造的铁心，磁通密度约为 1.7T。硅钢片的品牌选择取决于对变压器空载损耗的要求。例如：①厚度为 0.30mm、单位损耗为 1.05W/kg 的硅钢片不能满足要求时，需要选择厚度为 0.27mm、单位损耗为 0.95W/kg 的硅钢片；②厚度为 0.27mm 的硅钢片仍不能满足要求时，需要选择经过激光照射、单位损耗由 0.95W/kg 降到 0.85W/kg 的硅钢片。

(2) 晶粒取向冷轧硅钢片的剩磁。晶粒取向冷轧硅钢片在外磁场作用下，磁畴的排列与外磁场的变化不同步，因此，磁化过程中有磁滞现象，由磁滞回线可知，励磁电流归零后出现剩磁。铁磁材料的磁滞回线如图 1-4 所示。铁心越饱和，剩磁越大。例如，变压器的励磁电流超过额定空载电流的 10%，铁心便趋于饱和。如果用超过空载电流几十倍的直流电流测量绕组直流电阻，铁心极度饱和。测量电流归零后，剩磁特别大。

(3) 晶粒取向冷轧硅钢片的稳定性。晶粒取向冷轧硅钢片，是利用机械应力促使磁畴向便于磁化的方向排列，从而改善导磁性能。在冲击、剪切、振动、冲孔或弯曲等机械应力的反作用下，导磁性能将有所下降。导磁性能越好的新硅钢片，稳定性可能越差。

(4) 硅钢片的表面涂层。硅钢片表面涂有无机磷化高温烧结涂层，其厚度为 $0.0015 \sim 0.002\text{mm}$ ，可承受高达 820°C 的温度，绝缘电阻系数为 $60 \sim 105\Omega \cdot \text{cm}^2$ 。该涂层的作用如下：

- 1) 阻止磁通在两硅钢片间穿越，使磁通在每个硅钢片中均匀分布，以减少损耗。
- 2) 两硅钢片之间不绝缘，而是高电阻导通，所以铁心一点接地，整个铁心处于地电位。
- 3) 涂层的张应力削弱硅钢片的磁致伸缩，起到降低噪声的作用。

3. 注意事项

用晶粒取向冷轧硅钢片制造的铁心的缺点是非线性、容易饱和，所以，变压器运行中应该尽可能避免过励磁。

1.2.2 导电材料

1. 简介

绕制大型电力变压器绕组的导线包括扁线、组合线及换位导线。导线的材质为铜和铝。现代大型电力变压器几乎全部使用铜线。铜线的铜含量至少应该达到 99.9%。铜的导电率仅次于银和金。 20°C 时，软铜线的电阻率为 $0.017\,241\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ，半硬铜线的电阻率为 $0.017\,560\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ，后者大约比前者高出 2%。导线的温度系数接近于常数。

2. 特性

(1) 铜导线形变。铜导线属于弹、塑性材料。由拉伸试验的曲线可知，铜导线形变的特点是：在比例极限以下，是弹性变形；超过比例极限，会发生永久变形。变压器绕组通过的电流不大于额定电流时，作用于绕组的电磁应力在比例极限以下时，铜导线只有弹性变形，没有累积效应。变压器绕组过电流时，作用于绕组的电磁应力超过比例极限，铜导线发生永久变形，有明显的累积效应。

(2) 铜导线的名义比例极限。弹、塑性材料的实际比例极限无法确定，所以工程中使用“名义比例极限”。在我国，变压器导线的名义比例极限由非比例伸长率为 0.2% 的应力决定，用 $\sigma_{0.2}$ 表示。不同变压器制造厂选用的名义比例极限不同。例如，有的变压器制造厂，由非比例伸长率为 0.1% 的应力决定名义比例极限，用 $\sigma_{0.1}$ 表示。

提高铜导线名义比例极限的方法：生产铜导线时增加机械应力可以提高铜导线的硬度，

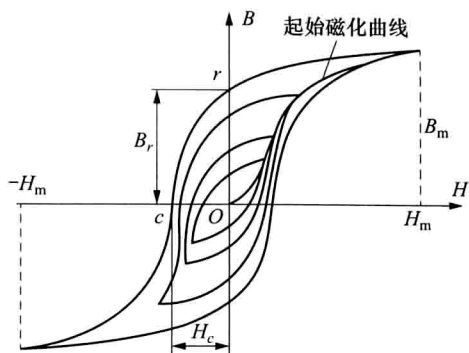


图 1-4 铁磁材料的磁滞回线

形成软铜线、半硬铜线及硬铜线。由于使用硬铜线绕制绕组时不能保证其紧密性，所以实际绕制绕组时，只使用软铜线或半硬铜线。

半硬铜线的 $\sigma_{0.2}$ 要比软铜线的 $\sigma_{0.2}$ 大很多。例如，某软铜线的 $\sigma_{0.2}$ 为90MPa，某半硬铜线的 $\sigma_{0.2}$ 为220MPa。

3. 注意事项

作用于绕组导线的电磁应力超过名义比例极限时，绕组导线发生永久变形，永久变形有累积效应。当永久变形累积到损伤绝缘结构的程度时，容易导致绝缘事故，所以变压器运行中，应该尽可能避免绕组过电流。

1.2.3 绝缘材料

1. 简介

油浸变压器内的绝缘结构是液体油与固体绝缘构成的油浸纸绝缘结构，简称油纸绝缘。油纸绝缘有多种构成方式，例如：纸包—纸包结构，纸包—油隙—纸包结构，纸包—纸板（垫块）—纸包结构，纸包—油隙—纸板（围屏）—地结构及纸包—纸板（撑条）—纸板（围屏）—地结构等。构成方式的多样化，既可以满足电气强度的需要，又可以满足机械强度的需要。

2. 特性

（1）油纸绝缘的强度。变压器油是用石油提炼而成，介电常数约为2.2；纸绝缘是由木质纤维构成，介电常数约为4.4。油与木质纤维（以下简称纸）合理结合后的绝缘强度明显比油和纸单独的绝缘强度高。例如，匝绝缘在空气中的1min工频击穿强度为10kV/mm左右。浸渍击穿电压为50kV的油（击穿强度为20kV/mm）后，匝绝缘的1min工频击穿强度大于30kV/mm。

（2）油纸绝缘中的水分。油纸绝缘中有大量的水分。例如，一台高质量真空处理和真空注油的变压器，油量为50t，纸（包括纸板和层压纸板）为10t。其中，油的含水率为10mL/L，油中含水量为0.5kg；纸的含水率为0.5%，纸中含水量为50kg。油和纸中的水分都可以活动，而且不停地交换。在特定条件下，进出油或纸中水分相等时，达到平衡。

由于温度驱散水分聚集，而电场吸引水分聚集。变压器在运行中，温度和电场的分布是不均匀的，所以水分的分布也是不均匀的；温度和电场是变化的，所以水分的平衡是相对的，不平衡是绝对的。

（3）油纸绝缘的击穿强度与含水量的关系。在常温下，油纸匝绝缘的1min工频击穿强度与含水量的大致关系为：含水量为0.5%时，击穿强度为100%；含水量为3%时，击穿强度为95%；含水量为6%时，击穿强度为85%；含水量为9%时，击穿强度为60%。然而，实际情况是：平均工作电场强度为2kV/mm的匝绝缘，仍可能发生匝绝缘击穿事故。匝绝缘中局部含水量密度达到足以引起破坏性局部放电的程度，才可能导致匝绝缘击穿事故的发生。由此可见，水分在油纸绝缘中的分布是不均匀的，油纸绝缘的允许含水量密度与电场强度有关。

3. 注意事项

变压器运行过程中，唯有水分可以变动并导致绝缘强度下降。所以，对于油纸绝缘，应该特别注意预防水分局部聚集。

1.3 变压器的相关计算

1.3.1 变压器的电路计算

1. 目的

变压器运行中的状态有稳定状态和瞬变状态，两种状态下电压与电流的变换关系，通常是用电路法进行计算。

2. 方法

变压器在稳定状态运行中，电压、电流和磁通是频率相同的正弦函数。正弦函数可用旋转矢量来表示，而矢量可用复数表示。矢量用复数表示后，可以把矢量的几何运算变成代数运算。矢量的代数运算方法简称符号法。由于符号法简便，所以变压器的电路计算主要使用符号法。

变压器正常运行时，电压和电流是三相对称系统。当三相负载不对称，或负载侧发生单相或两相短路时，变压器就处于不对称运行状态。为了便于计算，先将一组不对称量分解成正序、负序和零序三组对称的量，根据变压器的实际正序、负序和零序阻抗，分别建立正序、负序和零序的等值电路；然后，分别列出计算公式，计算出各组对称分量；将三组对称分量叠加起来，就可以得到电流或电压的实际不对称量。例如，计算变压器的单相短路电流时就使用这样的方法。

3. 作用

(1) 计算变压器输出电压的变动范围。变压器的一次绕组接在额定频率和额定电压的电网上，由于变压器内部存在阻抗，负载后二次绕组的输出电压不等于空载电压。电阻性和电感性负载电压低于空载电压，电容性负载电压高于空载电压。所以，需要按照负载性质计算实际可能输出的电压，并根据供电的质量要求决定调节输出电压的方法。

(2) 计算变压器并列运行的循环电流。变压器并列运行的理想条件是联结组标号相同，电压比和短路阻抗相等，并联变压器之间不产生循环电流。联结组标号不同的变压器不允许并列运行，而实际上两台变压器的电压比和短路阻抗不可能完全相同。每个变压器绕组实际通过的电流是负载电流和循环电流之和。负载电流方向和循环电流方向相同的变压器，绕组实际通过的电流等于负载电流加循环电流；而负载电流方向和循环电流方向相反的变压器，绕组实际通过的电流等于负载电流减循环电流。为了避免其中一台变压器过载，需要根据实际电压比或短路阻抗计算变压器并列运行的循环电流。

(3) 计算变压器出口短路电流。研究变压器出口短路电流的变化过程，需要使用微分方程式进行求解，一般使用 GB 1094.5—2008《电力变压器 第5部分：承受短路的能力》规定的工程计算方法。该方法是将电力系统加于变压器的电压除以电网的短路阻抗和变压器的短路阻抗之和，得到对称短路电流方均根值。对称短路电流方均根值乘以峰值因素值，得到短路电流的最大值。

1.3.2 电场计算

1. 目的

变压器的绝缘分匝绝缘、油道绝缘、主绝缘、端绝缘及引线绝缘等多种形式。在工频电压下，电场强度的分布是不均匀的，而且差别很大。通过电场计算才能掌握各部分绝缘承受

的电场强度。

2. 方法

(1) 解析法。在没有使用电子计算机以前, 变压器的电场强度计算都采用解析法。例如, 计算高、低压绕组间主绝缘的电场强度时, 把两个绕组看作同心圆筒电容器的两个电极。将电极间的纸绝缘按油与纸的介电系数比值折合成等值油隙, 得到比实际主绝缘距离小的等值距离。将作用电压(工作电压或工频试验电压)除以等值距离, 便得到油中的平均电场强度。油隙的许用绝缘强度与油中电场强度的比值称为绝缘裕度。绝缘裕度可以作为确定主绝缘结构的依据。

解析法也用于计算最大电场强度, 包括镜像法等经典方法。工程上计算电场强度的近似方法是将计算出的平均电场强度乘以电场畸变系数。例如, 计算变压器绕组端绝缘的电场强度, 曾经采用过这种方法。

解析法简便, 在可以满足工程需要的条件下, 至今仍然适用。但在用于改进绝缘结构方面, 解析法有其局限性。

(2) 数值法。数值法包括有限差分法、有限元法和模拟电荷法等多种方法, 其中有限元法对复杂的边界条件和复合绝缘结构适应性较好, 所以变压器的电场强度的数值计算, 一般都使用有限元法。

有限元法计算电场强度的基本程序是: ①确定计算区域, 根据求解区域的对称性, 决定按三维或二维问题处理; ②用自动剖分的办法, 将求解区域分为许多在节点处互相连接的有限单元; ③对单元节点的标量电位构造线性插值函数, 组成一组代数方程, 其中边界条件为已知量; ④求解代数方程, 得到单元节点的标量电位值; ⑤根据电场强度 E 是标量电位 φ 的散度 ($E = -\text{div}\varphi$ 或 $E = -\nabla\varphi$), 便可确定任一点的电场强度, 得到计算区域的电场强度分布, 并确定最大电场强度。

3. 作用

随着变压器的额定电压越来越高, 变压器绝缘结构上的电场强度分布越来越复杂。要实现变压器的可靠性和经济性, 首先要实现绝缘结构电场分布的均匀化和绝缘裕度的合理化, 而电子计算机的电场数值计算, 为其创造了有利条件。

电场强度数值计算的水平, 不仅标志变压器的设计水平, 而且显示变压器制造厂的产品质量水平。

1.3.3 雷电冲击波过程计算

1. 目的

变压器绕组中电阻、电抗和电容的分布是非常复杂的。沿绕组的纵向, 有电阻、电抗和电容分布; 沿绕组的横向, 有绕组对地、绕组之间的电容分布。雷电冲击波是频率很高、频谱很宽的脉冲, 所以当雷电冲击波作用于变压器绕组时, 沿绕组的电压分布很复杂, 不可能均匀分布。雷电冲击波过程计算是计算雷电冲击标准波在绕组总绝缘上的电压降分布(简称雷电冲击梯度)和对地的电位分布, 其主要目的是确定雷电冲击在总绝缘上的最大电压降和对地的最高电位。

2. 方法

(1) 建立仿真的等值电路。雷电冲击波过程计算的依据是雷电冲击波主要通过电容传递, 因此仿真等值电路由分布电容构成。例如, 对于心式变压器, 以单个绕组每个线段(线

饼)的纵向电容和对地电容为单元,连接成单个绕组的简化等值电路。使用现成的计算软件时,输入绕组的结构参数(绕组内、外径和高度尺寸、匝数、匝绝缘厚度、段间油道高度以及主绝缘距离等),便可以得到分布电容构成的仿真等值电路。

(2) 雷电冲击波数字化。雷电冲击波过程计算中使用的是雷电冲击试验的标准全波和截波。将标准波数字化,才能进行运算。雷电冲击波数字化的方法,是对应于时间间隔取雷电电压数值。

(3) 运算结果。计算软件输出的计算结果为梯度分布和电位分布的数值和曲线。由于雷电冲击波过程计算是简化了的近似计算,并且不同的计算软件(包括引进的国外软件)对于同一台变压器,即使输入相同的绕组结构参数和标准波,计算结果的具体数值仍有差别。在雷电冲击许用强度裕度比较大的情况下,一般不影响通过雷电冲击出厂例行试验,但是,计算结果的可信性需要通过试验检验。

3. 作用

(1) 确定改善雷电冲击分布的措施,如采用纠结式绕组或插入电容式绕组。

(2) 选择匝绝缘的厚度。

1.3.4 磁场计算

1. 目的

变压器内的磁通分主磁通和漏磁通,主磁通在铁心中的分布基本上是均匀的,不需要计算磁场分布。变压器的磁场计算是指计算绕组流通电流后产生的漏磁场。

漏磁场计算,是为计算变压器的绕组的感抗(短路阻抗)、计算绕组和金属结构件中的附加损耗及计算绕组动稳定能力提供根据。

2. 方法

(1) 解析法。漏磁场的解析法是根据安培全电流定律,通过电流来推算磁场。在使用解析法计算变压器同心绕组间漏磁场时,做了两个近似的假定:

1) 包围全电流的磁力线长度为与绕组高度(h)相等的非导磁体的磁路长度,铁磁体和其他非导磁体磁路的磁路长度忽略不计。

2) 漏磁通的磁力线与绕组的轴线平行。实际上有一部分漏磁通的磁力线并不与绕组的轴线平行,并且漏磁通的磁力线在绕组的端部是弯曲和分散的,在此采用经验系数(洛果夫斯基系数)进行修正。

做了上述两个假定后,根据绕组的安匝(全电流)和高度,便可以计算出漏磁通密度。

(2) 数值法。漏磁场的数值计算包括有限差分法和有限元法等多种方法,其中有限元法对复杂的边界条件适应性较好,所以变压器的漏磁场计算一般都使用有限元法。

有限元法计算磁场强度的基本程序与有限元法计算电场强度的基本程序类似:先是确定计算区域,根据求解区域的对称性,决定按三维或二维问题处理。用自动剖分的办法,将求解区域分为许多在节点处互相连接的有限单元。对单元节点的矢量磁位构造线性插值函数,组成一组代数方程,其中边界条件为已知量。求解代数方程,得到单元节点的矢量磁位值。根据磁感应强度 $\mathbf{B}$ 为矢量磁位 $\mathbf{A}$ 的旋度($\mathbf{B}=\text{rot}\mathbf{A}$),便可确定任一位置的磁场强度,从而得到计算区域的磁场强度分布。

现在变压器磁场强度的数值计算是利用专业性或通用性数值计算软件,在计算漏磁场的基础上,进行金属中涡流场的数值计算,是变压器设计计算的新课题。

3. 作用

(1) 解析法和数值法计算的漏磁场强度是计算变压器的阻抗和电力的基础。在此基础上, 分别用相应的方法计算变压器的短路阻抗和绕组的动稳定能力。

(2) 数值法计算漏磁场为计算金属中的涡流场创造了条件, 并可对减少附加损耗和避免局部过热发挥作用。

1.3.5 热(温度)场计算

1. 目的

变压器运行时, 内部的温度分布是不均匀的。在没有局部过热故障时, 绕组某一导线出现的最高温度简称热点温度。绕组热点温度高到损坏匝绝缘的程度时, 妨碍变压器的安全运行。热(温度)场计算的目的是确定热点温度的部位及程度。

2. 方法

(1) 解析法。绕组热(温度)场的解析法是根据变压器的总损耗和冷却装置的冷却容量计算出油的平均温度, 再根据绕组线段的安匝和线段(线饼)的外表面尺寸计算线段表面的单位热负荷, 利用经验公式计算线段对油的平均温升(简称铜油温差)。铜油温差加上油的平均温度, 便得到绕组的平均温度。通过温升试验验证计算结果, 计算结果与试验结果有明显差别时, 按试验结果修正经验公式。

绕组中导线最热的部位在线饼内部。绕组的热点温度不仅高于绕组的平均温度, 而且高于线段的平均温度。由于解析法不能计算热点温度, 根据经验估计绕组的热点温度高于平均温度某一数值, 在绕组平均温度上叠加上经验数值后, 即可认为是绕组热点温度。例如, 假定绕组的热点温度高于平均温度 13K , 绕组的平均温度为 65°C , 环境温度为 20°C 时, 绕组的热点温度为 98°C ; 环境温度为 40°C 时, 绕组的热点温度为 118°C 。

(2) 数值法。绕组热(温度)场的数值法是基于绕组导线的热量通过传导散发到油中, 再经过油的对流散热形成的温度场进行计算。计算时, 先根据绕组损耗计算热负荷分布, 再根据冷却方式计算油流在绕组中的流速分布, 按照热交换机理确定油纸绝缘的热交换系数(散热率), 由各部分的热负荷和散热率计算出各部分的温度, 便可以得到变压器内部的热(温度)分布, 即掌握温度场。依据温度场, 不仅可以更准确地确定绕组的平均温度, 而且可以明确绕组热点温度的大小和位置。

3. 作用

变压器的运行过程是发热与散热的平衡过程。变压器的运行温度不是越低越好, 而应该保持在一定水平。将热(温度)场的计算结果用于确定变压器运行温度与环境温度和负载的关系, 可以充分发挥变压器的负载能力。

1.4 变压器的运行方式

1.4.1 变压器空载合闸

1. 特征

变压器空载合闸是指变压器在低压绕组空载的状态下, 高压绕组突然接通额定电压, 高压绕组中通过的瞬变励磁电流, 称为励磁涌流。

励磁涌流与空载合闸时的电压相角及铁心中的剩磁有关。在电源电压为幅值(相角为

90°) 时合闸, 铁心中没有剩磁, 励磁涌流最小, 接近于额定空载电流; 在电源电压为零 (相角为 0°) 时合闸, 铁心中存在极性相反的剩磁, 励磁涌流最大。非极端情况下的励磁涌流处于最小与最大之间, 并存在偶然性。

三相变压器或单相变压器组, 相位相差 120°, 空载合闸时每相的合闸相角不可能相同, 每个铁心柱的剩磁也可能不一样, 所以不可能同时出现最大励磁涌流。

铁心中的剩磁与测量绕组直流电阻时的电流大小有关, 还与变压器停电时切断电流的大小和负载性质有关。高压绕组的匝数较多, 直径也较大, 因此, 高压绕组空载合闸的励磁涌流比低压绕组的小。

2. 危害

(1) 励磁涌流在变压器内产生相当大的电磁力, 引起器身连同整个变压器剧烈振动。振动过程中, 不但出现异常响声, 而且导线和绝缘结构都可能变动。

(2) 绕组和铁心的剧烈振动, 扰动变压器内部的油流。油流对气体继电器重瓦斯挡板的冲击力超过其整定值时, 重瓦斯动作跳闸。

(3) 快速切断励磁涌流时, 操作过电压的倍数取决于被切断电流对时间的变化率 (di/dt), 可能出现大于 2 倍额定电压的操作过电压。

3. 对策

(1) 尽可能减少空载合闸的次数。例如, 变压器安装后交接试验时, 额定电压下空载合闸 5 次; 变压器检修后交接试验时, 额定电压下空载合闸 3 次。而定期停电测量绕组绝缘电阻或直流电阻时, 都需要增加空载合闸次数。应该根据现实状况, 及时改进。

(2) 重要的大型电力变压器必须进行空载合闸时, 应该采取防止励磁涌流过大的措施。

1.4.2 变压器长期运行

1. 特征

变压器长期运行过程中, 负载是在很大的范围内变动的, 不同季节、不同地区的环境温度也是不同的。所以, 变压器的运行温度是一个变量。

变压器各部分的发热和散热相对平衡后, 会出现复杂的温度场, 不同部位或不同时间的温度是不相同的。其实, 变压器运行中经常出现的过热故障, 并不在绕组上。

2. 危害

(1) 变压器运行温度过高的危害。变压器由金属和油纸绝缘构成。绝缘纸和油都是有机化合物, 耐热性比金属差。但是, 油纸绝缘的温度在高于 150℃ 时才能发生质变。除了个别变压器因为油道堵塞, 丧失散热条件而发生绝缘事故以外, 大型电力变压器至今没有因为运行温度过高而引起绝缘事故的。而由于运行温度过低引起的绝缘事故却经常发生。

(2) 变压器运行温度过低的危害。变压器在正常工作电压下, 绕组绝缘上的电场强度分布很不均匀, 个别极小区域, 电场强度可能异常突出。变压器内的水分不少于几十千克, 水可以活动。水是极性分子, 电场对水有很强的吸引力, 引起水在高电场强度区域聚集。变压器运行中, 唯一可以驱散水分聚集的是温度。电场的吸引力超过温度的驱散力时, 水分聚集到足以引起局部放电的程度, 就会发生绝缘事故。

3. 对策

充分利用变压器的散热能力可以主动控制的条件下, 保持变压器的运行温度既不过高, 也不过低。当前, 对于大型电力变压器, 主要是避免运行温度过低。