

## 第16篇 变压器、电抗器和电容器

主 编 河 村 達 雄 (東 京 大 学)  
执 笔 者 秋 丸 舜 二 (日 立 製 作 所)  
菅 寿 郎 (三 菱 電 機)  
国 枝 誠 昭 (富 士 電 機 製 造)  
栗 田 健 太 郎 (日 立 製 作 所)  
高 橋 寅 夫 (明 電 舎)  
野 田 清 四 郎 (日 新 電 機)  
矢 成 敏 行 (東 京 芝 浦 電 氣)

译 者 韩 志 民 杜 恩 田 孟 繁 梧

# 目 录

|                              |       |                                  |       |
|------------------------------|-------|----------------------------------|-------|
| <b>第1章 变压器概述</b> .....       | 16-1  | 6.6 变压器的呼吸作用和防止油的老化              | 16-29 |
| 1.1 定义 .....                 | 16-1  | 6.7 变压器室的通风 .....                | 16-30 |
| 1.2 种类 .....                 | 16-1  | <b>第7章 噪声和降低噪声的措施</b> .....      | 16-30 |
| 1.3 原理 .....                 | 16-1  | 7.1 噪声产生的原因和传播 .....             | 16-30 |
| 1.4 结构 .....                 | 16-1  | 7.2 噪声试验和基准值 .....               | 16-31 |
| <b>第2章 变压器的特性</b> .....      | 16-5  | 7.3 降低噪声的措施 .....                | 16-32 |
| 2.1 矢量图 .....                | 16-5  | <b>第8章 结 线</b> .....             | 16-33 |
| 2.2 等值电路 .....               | 16-5  | 8.1 $\Delta$ - $\Delta$ 结线 ..... | 16-33 |
| 2.3 额定值 .....                | 16-6  | 8.2 Y结线 .....                    | 16-34 |
| 2.4 效率和损耗 .....              | 16-6  | 8.3 Y- $\Delta$ 结线 .....         | 16-35 |
| 2.5 阻抗电压 .....               | 16-7  | 8.4 Y-Y结线 .....                  | 16-35 |
| 2.6 电压变动率 .....              | 16-7  | 8.5 Y-Y- $\Delta$ 结线 .....       | 16-35 |
| 2.7 三绕组变压器的负载损耗和阻抗 .....     | 16-8  | 8.6 Z(千岛)结线 .....                | 16-35 |
| 2.8 并联运行 .....               | 16-8  | 8.7 变相结线 .....                   | 16-36 |
| 2.9 特 性 .....                | 16-9  | 8.8 自耦变压器 .....                  | 16-36 |
| 2.10 标准容量和重量表 .....          | 16-9  | <b>第9章 电压调整</b> .....            | 16-38 |
| 2.11 尺 寸 .....               | 16-10 | 9.1 电压调整的目的和变压器的分接 .....         | 16-38 |
| <b>第3章 激磁现象</b> .....        | 16-10 | 9.2 有载调压 .....                   | 16-38 |
| 3.1 激磁电流 .....               | 16-10 | 9.3 有载分接开关 .....                 | 16-39 |
| 3.2 激磁涌流 .....               | 16-11 | <b>第10章 特种变压器</b> .....          | 16-41 |
| <b>第4章 漏磁通现象</b> .....       | 16-12 | 10.1 恒流变压器 .....                 | 16-41 |
| 4.1 绕组布置与漏电抗 .....           | 16-12 | 10.2 脉冲变压器 .....                 | 16-41 |
| 4.2 绕组的漏流损耗和杂散损耗 .....       | 16-13 | 10.3 试验变压器 .....                 | 16-41 |
| 4.3 绕组短路时的电磁机械力 .....        | 16-14 | 10.4 电炉变压器 .....                 | 16-42 |
| <b>第5章 绝 缘</b> .....         | 16-16 | 10.5 整流变压器 .....                 | 16-42 |
| 5.1 绝缘标准 .....               | 16-16 | 10.6 接地变压器 .....                 | 16-42 |
| 5.2 绝缘等级与绝缘强度 .....          | 16-17 | <b>第11章 变压器试验方法</b> .....        | 16-42 |
| 5.3 内部电位振荡 .....             | 16-18 | 11.1 变阻比、极性和相位移 .....            | 16-42 |
| 5.4 绝缘结构与绝缘材料 .....          | 16-22 | 11.2 电阻测量 .....                  | 16-43 |
| 5.5 套 管 .....                | 16-23 | 11.3 空载试验 .....                  | 16-43 |
| <b>第6章 变压器的冷却方式与温升</b> ..... | 16-24 | 11.4 阻抗试验 .....                  | 16-43 |
| 6.1 冷却方式 .....               | 16-24 | 11.5 温升试验 .....                  | 16-43 |
| 6.2 温升测量与限值 .....            | 16-26 | 11.6 耐压试验 .....                  | 16-45 |
| 6.3 温升过程 .....               | 16-27 | 11.7 冲击电压试验 .....                | 16-45 |
| 6.4 过负荷运行 .....              | 16-27 |                                  |       |
| 6.5 短路时的温升 .....             | 16-28 |                                  |       |

## 第12章 运输、现场装配、维修和

保护.....16-47

12.1 运输.....16-47

12.2 现场装配.....16-48

12.3 维修.....16-49

12.4 保护.....16-49

## 第13章 感应调压器.....16-50

13.1 原理和结构.....16-50

13.2 额定值和特性.....16-51

13.3 应用.....16-51

## 第14章 电抗器.....16-51

14.1 电抗器概述.....16-51

14.2 串联电抗器.....16-53

14.3 并联电抗器.....16-54

14.4 消弧电抗器.....16-54

14.5 中性点电抗器.....16-55

## 第15章 电容器.....16-56

15.1 种类和用途.....16-56

15.2 额定值、特性及试验.....16-57

15.3 改善功率因数和调相用电容器.....16-58

15.4 串联电容器.....16-61

15.5 高压特种电容器.....16-63

15.6 低压小型电容器.....16-63

参考文献.....16-65

# 第1章 变压器概述

## 1.1 定 义

变压器是一种静止感应电器。它有一个共用的磁路和与其交链的几个绕组，且它们相互之间的空间位置不变，当某一个绕组从电路上接受交流电能时，可通过电磁感应作用而改变电压和电流，在其余绕组以同一频率传输交流电能。

## 1.2 种 类

通常所使用的变压器的分类：按相数分为单相、多相变压器，按绕组数分为二绕组、多绕组变压器，按冷却方式分为油浸自冷、油浸风冷、油浸水冷、强迫油冷、强迫油风冷、干式自冷、干式风冷、干式密封自冷和干式密封风冷变压器，还有把整个干式绕组进行浇注的变压器。

## 1.3 原 理<sup>(1)(2)</sup>

在铁心（共用磁路）上设置匝数为  $n_1$  的一次绕组，设想对它施加的电压为正弦波交流电压  $e_1 = \sqrt{2} E_1 \sin \omega t$ 。假定绕组的电阻为零，则根据基尔霍夫第二定律，与施加电压相平衡的反电势  $e'_1$ ，是由在整个铁心内产生的交变磁通的电磁感应作用而引起的。为了在铁心内建立必要的交变磁通以产生该反电势  $e'_1$ ，从一次线端需流入激磁电流。

设交变磁通的最大值为  $\Phi$  (Wb)，瞬时值为  $\varphi$ ，则

$$e_1 = n_1 \frac{d\varphi}{dt} \quad (1)$$

从而

$$\begin{aligned} \varphi &= \int \frac{e_1}{n_1} dt = \int \frac{\sqrt{2} E_1}{n_1} \sin \omega t dt \\ &= \frac{\sqrt{2} E_1}{\omega n_1} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) \\ &= \Phi \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

由此

$$E_1 = \frac{2 \pi f n_1 \Phi}{\sqrt{2}} = 4.44 f n_1 \Phi \quad (V) \quad (3)$$

假定激磁电流的瞬时值为  $i_0$ ，磁路长度为  $l$ ，截面积为  $A$ ，磁导率为  $\mu$ ，则

$$i_0 = \frac{\varphi l}{n_1 \mu A}$$

如果在该铁心上设置匝数为  $n_2$  的二次绕组，则由磁通  $\varphi$  感应的电势为

$$E_2 = 4.44 f n_2 \Phi \quad (V) \quad (4)$$

由此

$$E_1/E_2 = n_1/n_2 = a \quad (5)$$

也就是说，空载时一、二次线端电压比（变压比）等于匝数比  $a$ 。

其次，如果二次线端连接负荷，流过二次电流  $\dot{I}_2$ ，那末由安匝  $n_2 \dot{I}_2$  产生的磁势要与由激磁电流产生的磁势叠加，使交变磁通  $\varphi$  发生变化。但是，为了以反电势保持电压的平衡，从而必须保持原来的交变磁通，所以在一次侧为了抵消由二次负荷电流产生的磁势，还应流入补偿电流  $\dot{I}'_1$ 。它们之间大小的关系为  $n_1 \dot{I}'_1 = -n_2 \dot{I}_2$ ，因此

$$-\dot{I}'_1/\dot{I}_2 = n_2/n_1 = 1/a$$

从而

$$E_1 \dot{I}'_1 = E_2 \dot{I}_2 \quad (6)$$

一次侧流过的电流是激磁电流  $\dot{I}_0$  和补偿电流  $\dot{I}'_1$  的合成电流  $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}'_1$ 。

实际上，由一次绕组的磁势产生的磁通中，存在仅交链一次绕组而不交链二次绕组的“一次漏磁通”，由二次绕组的磁势产生的磁通中，存在仅交链二次而不交链一次的“二次漏磁通”。一次绕组的电阻和由漏磁通引起的自感所产生的反电势，加上由共同主磁通感应的反电势，与外施电压保持平衡。二次绕组的电阻和漏电抗与负荷阻抗串联相加。

## 1.4 结 构

1.4.1 变压器的型式<sup>(2)(3)(11)~(13)</sup> 可分为心式和壳式二种。各相有单一磁路的铁心，绕组设

注：仅在第一章节向量加点号“·”，以下各章省略。

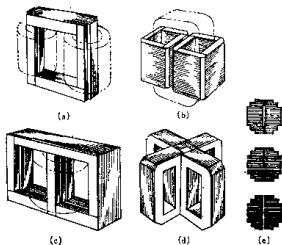


图1 变压器的铁心结构

置在铁心周围的称心式(图1(a));绕组的周围被二个以上的磁路包围的称壳式(图1(b))。但是如图1(c)的三柱铁心只有中柱设置绕组时,在磁路上虽与壳式相同,但可看作是特种心式结构。

心式的三相变压器结构的例子如图2所示。

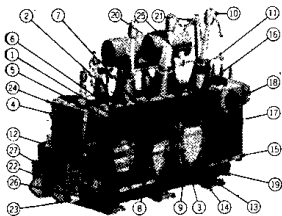


图2 心式变压器的结构

- ①—铁心 ②—铁心柱紧固件 ③—铁轭紧固件  
④—高压绕组 ⑤—中压绕组 ⑥—低压绕组  
⑦—压环 ⑧—绝缘筒 ⑨—引线 ⑩—高压套管  
⑪—套管型电流互感器 ⑫—油箱 ⑬—底座  
⑭—地脚螺栓 ⑮—强油风冷冷却器  
⑯—散热器 ⑰—散热管 ⑱—冷却风扇  
⑲—送油泵 ⑳—储油柜 ㉑—安全气道  
㉒—指针式温度计 ㉓—名牌 ㉔—有载分接开关  
㉕—指针式油面计 ㉖—分接开关电动操作机构 ㉗—带电净油器

#### 1.4.2 铁心的结构<sup>(1)(2)(3)(4)(5)(6)(7)</sup>

(a) 硅钢片有冷轧硅钢带 [JIS C 2552 (1975)](S级)和取向硅钢带 [JIS C 2553 (1975)](G级)二种。前者主要用于小型变压器,后者主要

用于大型变压器。热轧硅钢片从1968年起就停止制造, JIS标准(日本工业标准)也把它废除了。

取向硅钢带的制造方法是在常温下连续地轧制,由冷轧机轧成细长带状的硅钢片后,再进行适当的热处理。

这种钢带的晶粒良好地发展着,在轧制方向上可充分发展为磁性优良的结晶结构,因此磁通沿着该方向流通时,铁耗和激磁电流小,且比沿垂直于轧制方向的小。

市场上现出售的钢带卷料内径为50~52cm,辐宽最大为97.5cm。

(b) 变压器铁心由分层的长方形硅钢片叠积装配而成。为了有效地利用取向硅钢带的方向性,例如如图3那样把剪断的铁心片叠积成的框形结构,是通常使磁通易于在轧制方向流通的结构。小型铁心由于对接的缝隙影响较大,所以宜采用以钢带连续卷制的卷铁心。

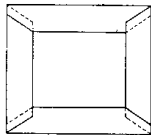


图3 框形铁心的结构

(c) 钢片的层间绝缘,是制造时在高温的氢中进行退火消除应力的过程中生成的玻璃状保护膜上,再涂敷无机质处理溶液烧结而成的薄膜。也有再烧结一层清漆的,但是由于提高了薄膜的性能,不涂清漆就可直接用薄膜作为层间绝缘。

对于心式变压器铁心,为了有效地利用圆形线圈内侧的空间,如图1e所示,铁心由几种不同宽度的铁心片叠积而成,以使各级叠片组成的周边内接于圆,形成圆柱状铁心柱。

为了降低大型铁心的内部温升,在平行或垂直于叠片方向设置1cm左右的油道。

心柱的紧固采用螺栓或用FRP(玻璃纤维加强塑料)的绑带紧固结构等。绑带紧固结构的例子如图4所示。

对于壳式变压器,因为线圈轴在水平方向且线圈空间多为长方形,所以只需用同一宽度的硅钢片叠成长方形截面的铁心。可用上下紧固框架和紧固

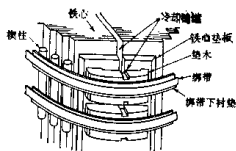


图4 绑带紧固结构的铁心

螺栓来紧固,或如图5所示利用油箱侧壁的强度,由油箱本身兼作紧固框架。

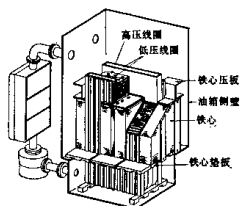


图5 壳式变压器的结构

比较小型的变压器采用卷铁心,卷铁心的形式有各种各样的。图6(b)是层间粘合后截断成U形,再装配而成的结构;图6(c)是加工成椭圆后,再把它拆开并每隔一匝半或二匝半剪断,然后在线圈中逐次叠装起来的结构;图6(d)是线圈绕在铁心上的结构。

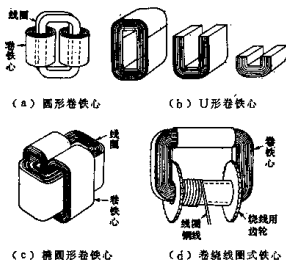


图6 卷铁心型变压器

(d) 三相变压器的铁心<sup>(1)(5)</sup> 心式三相变压器如图7a所示,多数采用三柱式。三个柱上的绕组的线端电压如果是三相平衡的电压,三个柱的磁通大小相等而相位依次相差 $120^\circ$ 。因为它们瞬时值之和为零,所以可以省去磁通的回路,节约了制造材料。由于中柱和左右两边柱磁路长度不同,各相的激磁电流是不平衡的,但实用时并无妨碍。三柱式铁心由于没有三次谐波磁通和零序磁通的磁回路,因此对它们的磁阻非常高。

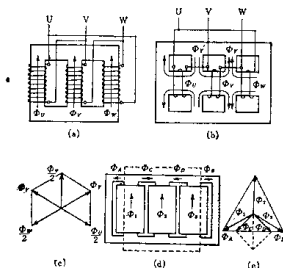


图7 三相变压器的铁心

由于运输尺寸的限制而要降低铁心高度的时候,也有采用图7(d)所示的五柱式铁心。此时,各柱的磁通分布如图7(e)所示,其中 $\Phi_A$ 和 $\Phi_C$ 、 $\Phi_B$ 和 $\Phi_D$ 不仅有相位差,而且由于磁路长度不同大小也不相等。因此铁轭的高度不能下降到三柱式铁心的50%,而应是它的60~70%,所以铁心重量和铁耗比三柱式铁心要大。

三相壳式变压器的平面图如图7(b)所示,有如由三个单相变压器并排而成,但因各相中间的铁轭宽只需单相变压器对接时的1/2就可以了,所以节约了材料。由于中柱绕组的绕向和两旁的二个绕组的绕向相反,从图7(c)的矢量图可见,例如V、W相间铁轭中因两侧相的磁通有 $120^\circ$ 相位差,故只通过 $\Phi_r/2$ 和 $\Phi_w/2$ 的矢量和,因而它的大小等于 $\Phi_r/2$ 。但是,相间设置油道或中柱绕组绕向与其它绕组相同时,上面的关系不能成立。

#### 1.4.3 绕组的结构<sup>(1)(5)(6)</sup> 绕组分为直接绕

⑤ 原书图7(c)中矢量关系有误,已改正。——译者注

制和成型绕制的二种。前者是在铆接的或者用绑带捆扎的铁心柱上铺设绝缘后绕制低压绕组,然后再在其上铺设绝缘并绕制高压绕组,主要用于小型柱上变压器。中、大型变压器由于铁心和绕组的重量大,不能采用直接绕制,所以在木模上或绝缘筒上绕制成线圈,采用组装式成型绕制。若用成型绕制,则铁心和绕组的制造可以同时进行,缩短生产周期,并且在故障时有容易拆卸的优点。

成型绕制线圈的各种型式如图8所示。图8(a)的圆筒式线圈是把扁铜线直接或通过撑条在绝缘筒上绕制成线圈匝数靠紧的螺旋管形线圈。扁铜线长方形截面的长边沿轴向绕制的称平绕,长边沿径向绕制的称立绕(端立绕)。后者机械强度高,但轴向宽度大,涡流损耗也大。为了增加线圈的厚度以提高机械强度,而又要减小涡流损耗,大电流时可采用换位导线(见图27)。

图8(b)是把圆筒式线圈以油道隔成同心重叠的几层后,再把它们全部串联连接成的多层圆筒式

线圈,用于大容量高压变压器上。它具有因冲击波而产生的内部电位振荡(见5.3节)小的优点。

图8(c)称为螺旋线圈(螺旋式线圈),适用于大容量变压器的大电流低压绕组。与圆筒式线圈的不同之处是在轴向把多根扁铜线并列重叠后进行平绕。一匝的宽度大时,为了很好地冷却,在各匝间插入层压板制成的垫块作为油道。为使并联铜线间电流分配均等,需要进行换位(见4.2节)。

图8(d)称为饼式线圈,是以厚0.5~5mm、宽5~15mm的扁铜线在绕线模上重叠平绕而绕成的圆饼形线圈。每一个饼称为一段,如图那样在两段的内侧连续地插入隔成油道的垫块而绕成的线圈称为双饼线圈。在绝缘筒的周围叠装几十组这种双饼线圈,把其外侧的引出线依次串联连接就形成整个绕组。

高电压小容量时扁铜线太细,一层一排的饼式线圈不能保证足够的机械强度,因此象图8(e)那样采用圆形导线,一层绕几排,并在层间插入绝缘纸绕成的饼式线圈。

上述的主要是用于同心布置的绕组的线圈,交错布置的绕组时心式变压器采用饼式线圈,壳式变压器主要采用长方形线圈。长方形线圈除了形状是长方形外,其结构和双饼线圈相同,但为减小涡流损耗一般用5mm左右宽的铜线,轴向为2~4排重叠绕制。

象电炉变压器二次侧那样的大电流绕组,是用裸铜排或铝排代替扁铜线,同心布置时采用圆筒式,交错布置时也采用长方形的线圈。另外,小容量同心布置绕组的变压器(主要是柱上变压器)可用铝箔作为导体,并与绝缘纸重叠绕成筒形的箔式线圈。

1.4.4 油箱 对于油浸变压器,油箱是个重要组成部分。它的功能首先是能承受住平时的油压而不漏油,但随着电压和容量的增大,其真空强度、承受内压、经受振动以及抗震性能显得重要起来。通常它采用普通钢板的焊接结构。

大型变压器运输时还要承受各种载荷,尤其是整体搬运的变压器,因为运输时安装着套管、散热器等组件,所以设计时也应考虑到运输时这些组件的振动情况。更大的变压器使用悬挂式(Schnabel)货车时(见12.1节),必须把油箱作为货车的一部分来进行强度设计。

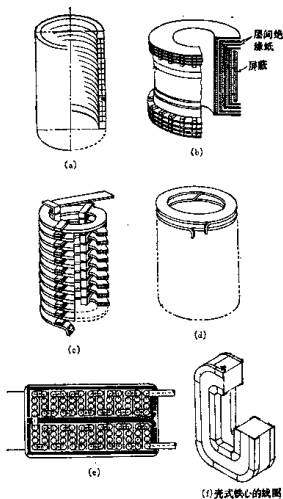


图8 绕组的结构

1.4.5 组件 主要组件有如下几种: 套管(见 5.5 节)、冷却装置(见 6.1 节)、无激磁分接开关(见 9.1 节)、有载分接开关(见 9.3 节)、温度计

(见 6.2 节)、储油柜(见 6.6 节)、放压装置(见 12.4 节)、气体继电器(见 12.4 节)、冲击压力继电器(见 12.4 节)。

## 第2章 变压器的特性

### 2.1 矢量图<sup>(1)(2)</sup>

电压、电流关系用矢量图表示时如图9所示。它的绘制顺序为: 首先选取交变主磁通矢量 $\Phi$ 在垂直方向, 画出滞后 $\Phi 90^\circ$ 的为一次感应反电势 $\dot{E}_1$ 的 $\frac{1}{a}$ 倍的二次感应电势 $\dot{E}_2$ 。其次画出和 $\Phi$ 大致同相, 仅稍稍超前而相当于铁耗有功分量的激磁电流 $\dot{i}_0$ 。再画出用二次感应电势 $\dot{E}_2$ 除以二次绕组漏抗 $r_2 + jx_2$ 与负荷阻抗之和得出的二次电流 $\dot{i}_2$ 。取 $\dot{i}_2$ 的 $\frac{1}{a}$ 倍的反方向电流为一次补偿电流 $\dot{i}'_1$ , 再和 $\dot{i}_0$ 合成为 $\dot{i}_1$ 。在与 $\dot{E}_1$ 大小相等方向相反的 $\dot{E}_1$ 上加上 $\dot{i}_1(r_1 + jx_1)$ 得一次电压 $\dot{V}_1$ , 由 $\dot{E}_2$ 减去 $\dot{i}_2(r_2 + jx_2)$ 得二次电压 $\dot{V}_2$ 。于是, 电压比 $V_1/V_2$ 不等于 $a$ , 而电流比亦不等于 $\frac{1}{a}$ 。

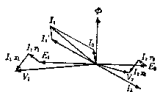


图9 矢量图

### 2.2 等值电路<sup>(1)(2)</sup>

设变压器的二次全部阻抗为 $\dot{Z}$ , 其上如流过二次电流 $\dot{i}_2$ , 则对应于 $\dot{i}_2$ 在一次侧流过的补偿电流为 $\dot{i}'_1 = \dot{i}_2/a = \dot{E}_2/a\dot{Z} = \dot{E}_1/a^2\dot{Z}$ , 所以在变压器二次侧连接 $\dot{Z}$ 时, 可以认为在一次侧直接连接 $a^2\dot{Z}$ , 关于流入的电流和功率的关系是等值的。 $a^2$ 倍的二次阻抗称为折算到一次的二次阻抗。

这与必须流过激磁电流 $\dot{i}_0$ 的并联激磁阻抗 $\dot{Z}_0$  (或是激磁导纳 $Y_0$ )成为并联的回路, 而把一次漏阻抗串联接入的图10的电路称为二绕组变压器的等值电路。如把等值电路中所得的值还原到实际的

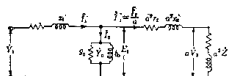


图10 等值电路

二次侧数值时, 电压可除以 $1/a$ , 电流可乘以 $a$ 。

另外等值电路可以从相互感应的二个回路的电势平衡方程式出发导出如下。设 $L_1$ 、 $L_2$ 分别为一次、二次回路整个自感,  $M$ 为互感, 则

$$\begin{aligned}\dot{V}_1 &= r_1 \dot{i}_1 + j\omega L_1 \dot{i}_1 + j\omega M \dot{i}_2 \\ 0 &= r_2 \dot{i}_2 + j\omega L_2 \dot{i}_2 + j\omega M \dot{i}_1 + \dot{V}_2\end{aligned}$$

变换上式得

$$\begin{aligned}\dot{V}_1 &= r_1 \dot{i}_1 + j\omega(L_1 - aM) \dot{i}_1 + j\omega M(a\dot{i}_1 + \dot{i}_2) \\ -\dot{V}_2 &= r_2 \dot{i}_2 + j\omega(L_2 - M/a) \dot{i}_2 + j\omega M(\dot{i}_1 + \dot{i}_2/a)\end{aligned}$$

式中  $r_1 + j\omega(L_1 - aM) = r_1 + jx_1 = \dot{Z}_1$

= 一次漏阻抗

$$r_2 + j\omega(L_2 - M/a) = r_2 + jx_2 = \dot{Z}_2$$

= 二次漏阻抗

$$\begin{aligned}\text{设 } j\omega aM &= \dot{Z}_0, \quad \dot{i}_2/a = -\dot{i}'_1, \\ \dot{i}_1 + \dot{i}_2/a &= \dot{i}_1 - \dot{i}'_1 = \dot{i}_0.\end{aligned}$$

于是

$$\begin{aligned}\dot{V}_1 - \dot{Z}_1 \dot{i}_1 &= \dot{Z}_0 \dot{i}_0 = -a(\dot{V}_2 + \dot{Z}_2 \dot{i}_2) \\ &= -a\dot{V}_2 + a^2 \dot{Z}_2 \dot{i}_2/a\end{aligned} \quad (7)$$

由上式可得图10的等值电路。

上述的矢量图和等值电路中, 一、二次所具有的漏抗是分开的, 但实际上这两者单独测量和计算都是困难的<sup>(4)</sup>, 只能测量或计算折算到任何一侧的两者的总和。由于激磁电流比较小, 所以实际计算时可以忽略它在一次漏阻抗中的电压降, 如图11所示, 激磁阻抗可移至一次阻抗的左边, 把一次阻抗及折算到一次侧的二次阻抗看成是串联阻抗。因此, 广泛采用简化的等值电路进行计算。另外, 系

② 原文误为 $\dot{Z}_2$ 。——译者注



统短路电流的计算、电压变动率的计算以及并联运行负荷分配的决定等等,都可以忽略激磁电流而只考虑串联阻抗。

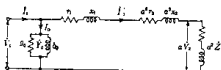


图11 简化等值电路

## 2.3 额定值

变压器的额定值,是在规定条件(电压、电流、频率、功率因数)下所保证使用的极限值。

额定电压是名牌上标志的某一个绕组端子电压的有效值,额定一次电压是额定二次电压乘以匝数比的电压。为了得到负荷状态下的额定二次电压,则一次绕组就不是所应加的电压值。

额定一次电流是额定二次电流除以匝数比的电流,实际的一次电流还要加上激磁电流。

额定容量是名牌标志的视在功率,是指在额定二次电压、额定频率和额定功率因数下,不超过所指定的温升限值时二次端子间所得到的值,用kVA或MVA表示。在多绕组变压器中定义比较困难,或取各绕组中最大的容量为额定容量,或取各绕组容量的总和除以2的值,即认为与该变压器大小相近的二绕组变压器的容量相当;实际使用时称为等值容量。串联变压器或有载调压器中,由串联绕组各分接头电压和电流算出的最大容量称为固有容量,由串联绕组连接的线路的额定电压和电流算出的容量称为线路容量。自耦变压器的容量见3.8节。

变压器的额定值类别大部分是连续额定值,而试验变压器、起动变压器等采用短时间额定值,接地变压器的空载损耗是连续产生的,而负荷电流只在短时间内流过,则采用连续激磁短时间额定值。另外,主要用于直流变电所的电气铁道用或轧机用的变压器,往往采用连续额定值加上短时间过负荷的特殊额定值。

## 2.4 效率和损耗

变压器的效率是以产生的千瓦输出与接受的千瓦输入之比用百分数表示,而附属的冷却装置等的损耗除外。

效率的标准采取常规效率。它由11.3和11.4节中测定的空载损耗与负载损耗之和计算出

$$\text{效率} = \frac{\text{千瓦输出功率}}{\text{千瓦输出功率} + \text{总损耗}} \times 100(\%)$$

只要不作特别规定,额定功率因数取100%,另外负载损耗为折算到绕组温度为75°C的损耗。

空载损耗包括铁损、激磁电流产生的绕组电阻损耗和绝缘体中的介质损耗(测量方法见11.3节)。

负载损耗包括由负荷电流产生的绕组的电阻损耗、在绕组及其他金属部分中由漏磁通产生的负载杂散损耗(见4.2节)以及在有并联绕组时由其间循环电流产生的损耗。测量方法在11.4节中叙述,在 $t$ (°C)时测量的负载损耗 $W$ ,要折算到75°C。测量温度时的电阻损耗由绕组的直流电阻 $R$ 和负荷电流 $I$ 算出,由 $W$ 减去这个电阻损耗可分离出负载杂散损耗;电阻损耗与电阻成正比,负载杂散损耗与电阻成反比,故折算到75°C时的负载损耗可由下式求得

$$W_{75} = I^2 R_1 \left( \frac{310}{235 + t} \right) + (W_t - I^2 R_1) \left( \frac{235 + t}{310} \right)$$

多绕组变压器和自耦变压器是以损耗代替效率来表示的。

全日效率是指一天的能量效率,在效率表达式中输出功率和损耗以24小时内的千瓦小时表示,同样以一年为单位的全年效率也有用这种办法表示的。通常在负荷率低的时候,负载损耗与空载损耗之比越大,全日和全年效率越高。

当负载损耗和空载损耗相等时,有的变压器的效率最高;在某一期间内的能量效率,当负载损耗和空载损耗产生的千瓦小时相等的负荷状态时为最高<sup>(2)</sup>。

一般情况下,电力变压器的最高效率大多在负荷为50~60%左右出现,配电变压器希望在60%负荷时达到最高效率。因此,满负荷时负载损耗和空载损耗之比(称为损耗比)为2~4左右。

图12为已知总损耗和空载损耗对满负荷输出功率的百分数,求125、100、75、50和25%负荷时效率值的计算图表。反之,已知满负荷和部分负荷时的效率,由该图可求得负载损耗和空载损耗。

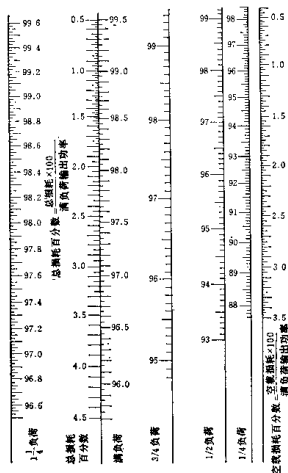


图12 效率计算图表

## 2.5 阻抗电压

二绕组变压器的阻抗电压是指一侧绕组加额定频率的电压,而另一侧绕组短路并流过额定电流时所施加的电压。只要不作特别规定,则用所施加的电压对该绕组额定电压的百分数来表示。

表1表示我国电力变压器的标准阻抗电压值。为了限制短路容量,可采用高阻抗电压,其值可达表1的1.5倍左右。

表1 变压器的标准阻抗电压(%)

| 标称电压(kV) | 11  | 22  | 33  | 66  | 77  | 110 | 154 | 187 | 220 | 275 | 500 |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 阻抗电压(%)  | 4.5 | 5.0 | 5.5 | 7.5 | 7.5 | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 14  |

阻抗电压根据变压器的电压和容量有个经济值,其值太大或太小均将丧失经济性,因此在采用特殊值的时候要特别注意。

## 2.6 电压变动率<sup>(1)(5)</sup>

电压变动率是在规定的电流、功率因数和频率下,调整一次端电压以保持二次绕组的端电压为额定值,当变压器一次电压不变,空载时二次端电压的变动对额定二次电压的百分数。也就是说,如设二次额定电压为 $E$ ,空载二次端电压为 $E_0$ ,于是

$$\text{电压变动率} = [(E_0 - E) / E] \times 100(\%)$$

电压变动率可用在11.4节所示的负载损耗测量中的施加电压(阻抗电压,  $V$ )和负载损耗(阻抗功率,  $W$ )的测量值,由下式计算。如果 $W$ 为阻抗试验中测量的负载损耗,  $W_{75}$ 是其折算到75℃的值,  $E$ 是阻抗电压,  $E$ 为测量端的额定电压,  $I$ 为测量端的额定电流,且 $q_r$ 是与电流同相位的电压降(电阻电压)对额定电压的百分数  $= (W_{75} / E^2) \times 100$ ,  $q_s$ 是与电流成90°相位的电压降(电抗电压)对额定电压的百分数  $= (IX / E) \times 100 = \sqrt{E^2 - (W / I)^2} / E \times 100$ ,在功率因数为1时可近似为

$$\text{电压变动率} = q_r + q_s^2 / 200(\%)$$

功率因数为 $m$ ,电抗百分数为 $n$ 的感性负荷时,可用下面的近似式。这在电抗百分数不超过20%时

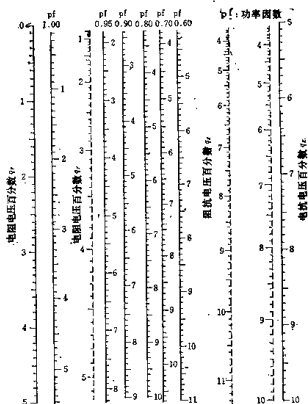


图13 电压变动率计算图表

① 原文为 $E_0$ ,有誤。——译者注

才是正确的。

$$\text{电压变动率} = m q_r + n q_x + (m q_x - n q_r)^2 / 200 (\%)$$

更加精密地求解可用下式。

$$\text{电压变动率} = \sqrt{(100 + m q_r + n q_x)^2 + (m q_x - n q_r)^2} - 100 (\%)$$

图 13 是由  $q_r$ 、 $q_x$  相对于各种功率因数求电压变动率(实线)和阻抗电压百分数  $q_x = \sqrt{q_r^2 + q_x^2}$  (虚线)的计算图表。

## 2.7 三绕组变压器的负载损耗和阻抗<sup>(2)(3)(6)</sup>

在三绕组变压器中,是以每二个绕组的组合来进行阻抗试验,并以任意的同一容量为基值计算一、二次间,二、三次间和一、三次间的折算到 75°C 的电阻电压和电抗电压的百分数。如设它们分别为  $q'_{12}$ 、 $q'_{23}$ 、 $q'_{13}$ 、 $q'_{x12}$ 、 $q'_{x23}$ 、 $q'_{x13}$ , 则各绕组对应某容量的  $q'_r$ 、 $q'_x$  为

$$q'_{r1} = (q'_{r12} + q'_{r13} - q'_{r23}) / 2$$

$$q'_{r2} = (q'_{r12} + q'_{r23} - q'_{r13}) / 2$$

$$q'_{r3} = (q'_{r13} + q'_{r23} - q'_{r12}) / 2$$

$$q'_{x1} = (q'_{x12} + q'_{x13} - q'_{x23}) / 2$$

$$q'_{x2} = (q'_{x12} + q'_{x23} - q'_{x13}) / 2$$

$$q'_{x3} = (q'_{x13} + q'_{x23} - q'_{x12}) / 2$$

再将它们折算至各绕组本身的容量,可求得  $q_{r1}$ 、 $q_{r2}$ 、 $q_{r3}$ 、 $q_{x1}$ 、 $q_{x2}$ 、 $q_{x3}$ 。

如果各  $q_r$  分别乘以各自的绕组容量,再求其总和,可得三绕组均有负荷时的总负载损耗。这时,各绕组所分担的负载损耗由于负载杂散损耗的影响,与各绕组内实际产生的损耗确切地说不相等的<sup>(7)</sup>。

三绕组变压器承受负荷时的二绕组端子间的合成阻抗电压,可由图 14 的各绕组分开的电压降的等值电路进行合成计算。但是上面求  $q'_r$ 、 $q'_x$  时是以  $EI$  为基准容量的,如把  $E$  折算到一侧的额定电压,则

$$R_1 = \frac{q'_{r1} E}{I} \times 100$$

$$X_1 = \frac{q'_{x1} E}{I} \times 100 \dots\dots$$

该等值电路也表示由各端子看进去的三绕组变压器的特性,但与内部的绕组并不对应。例如并不

存在电阻单独成为负值,或也有一部分电抗表现为容抗。

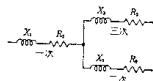


图 14 三绕组变压器等值电路

## 2.8 并联运行<sup>(2)(5)(8)~(12)</sup>

凡台变压器的一次和二次端子各自并联联结时的运行称为并联运行。

如二台变压器的变压比和折算到二次侧的短路阻抗分别为  $a'$ 、 $a''$ 、 $Z'_2$ 、 $Z''_2$ , 并设共同的一次电压为  $\dot{V}_1$ , 满负荷电流为  $\dot{I}_1$ , 则各变压器所分担的电流  $\dot{I}'_1$ 、 $\dot{I}''_1$  由下式表示。

$$\dot{I}'_1 = \frac{\dot{I}_1 Z''_2}{Z'_2 + Z''_2} + \frac{\dot{V}_1 / a' - \dot{V}_1 / a''}{Z'_2 + Z''_2}$$

$$\dot{I}''_1 = \frac{\dot{I}_1 Z'_2}{Z'_2 + Z''_2} + \frac{\dot{V}_1 / a'' - \dot{V}_1 / a'}{Z'_2 + Z''_2}$$

如变压比相等则上式第 2 项等于零, 二台变压器分担的电流与阻抗成反比。

各变压器正确地按各自容量成比例分担电流, 而不产生环流的条件为: (i) 极性相同; (ii) 三相变压器组时相序和相位移相等; (iii) 变压比相等; (iv) 电阻电压和电抗电压百分数分别相等。要严格满足第 (iv) 个条件是困难的, 如果二台变压器的额定容量之比在 3:1 以下, 且阻抗电压绝对值之差在它们平均值  $\pm 10\%$  以内, 实际运行时可以看到并没有什么妨碍。容量差别很大, 而电阻和电抗之比不同的变压器并联运行时, 小容量变压器有过负荷的危险, 所以是应该避免的。电阻和电抗分别为  $R'$ 、 $R''$ 、 $X'$ 、 $X''$  的变压器的分担电流  $I'$  和  $I''$  之间有如下的相位差。

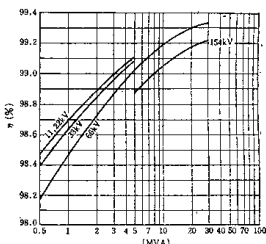
$$I'、I'' \text{ 间的相位角} = \tan^{-1}(X'/R') - \tan^{-1}(X''/R'')$$

为了使三绕组变压器完全并联运行, 各绕组的阻抗电压必须分别对应相等, 因此型号不同的变压器并联运行时要注意。另外, 若仅仅是一、二次并联联结, 即使一、二次间阻抗也相等时, 三次如单独带不同负荷, 它的影响也将打乱二次电流的分布。二绕组变压器和三绕组变压器一、二次间并

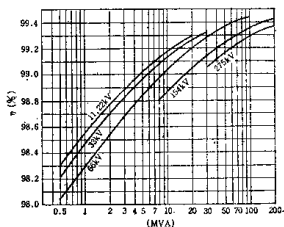
联运行时,也将影响三次负荷。

## 2.9 特性

图15表示各种电压、容量的单相和三相 50 Hz 油浸电力变压器的功率因数为 1、在满负荷时效率的概数。60Hz 专用的变压器的效率比 50Hz 的稍微高些, 50、60Hz 通用的变压器用于 60Hz 时, 负载损耗稍微增加, 但由于空载损耗约减小 20%, 效率通常要高些。分接范围广或将高、低压侧的分接头分别移至相对一侧的绕组而成等效分接的变压器的效率要下降。



(a) 单相油浸变压器 (50Hz)



(b) 三相油浸变压器 (50Hz)

图15 效率

中小型变压器的效率、电压变动率、空载电流和空载损耗等, 在 JIS C 4301(1969)、4304(1969)、4305(1969) 中有详细规定。

## 2.10 标准容量和重量表

表 2 列出了电力变压器的标准容量<sup>(31)</sup>。本标

表 2 额定容量的标准值<sup>(31)</sup>

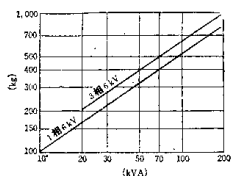
(a) 单相变压器的标准容量 (kVA)

|     |     |      |       |       |
|-----|-----|------|-------|-------|
| 1   | 15  | 150  | 1500  | 15000 |
| 2   | 20  | 200  | 2000  | 20000 |
| 3   | 30  | 300  | 3000  | 30000 |
| 5   | 50  | 500  | 5000  | 50000 |
| 7.5 | 75  | 750  | 7500  |       |
| 10  | 100 | 1000 | 10000 |       |

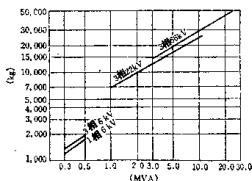
(b) 三相变压器的标准容量 (kVA)

|     |     |      |       |         |          |
|-----|-----|------|-------|---------|----------|
|     | 15  | 150  | 1500  | 15000   | (120000) |
|     |     |      |       |         | 150000   |
|     |     |      |       |         | (180000) |
|     | 20  | 200  | 2000  | 20000   | 200000   |
|     |     |      |       |         | 250000   |
| 3   | 30  | 300  | 3000  | 30000   | 300000   |
|     |     |      |       |         | (400000) |
| 5   | 50  | 500  | 4500  | 45000   | 450000   |
|     |     |      |       | (50000) | (500000) |
|     |     |      | 6000  | 60000   |          |
| 7.5 | 75  | 750  | 7500  |         | (90000)  |
| 10  | 100 | 1000 | 10000 | 100000  |          |

注: 括弧内为旧标准值。



(a)



(b)

图16 估算重量 (包括油重)

准容量没有表示与电压的关系,但要注意电压很高而容量小的,或相反,电压低而容量极大的变压器的经济性不好。多数制造厂制作的标准产品的高压侧电压和容量的关系如表3所示。

表3 高压侧电压和容量

| 高压侧电压(kV)    | 容量范围       |
|--------------|------------|
| 6            | 5~2000     |
| 11, 22 以及 33 | 750~5000   |
| 66 及 77      | 3000~30000 |

图16表示各种标准额定值的50Hz的油浸自冷变压器包括油量的重量概算值。60Hz专用变压器的重量比50Hz约小5%。油重约占总重的25~35%。60Hz77kV的和50Hz66kV的重量可以认为大致相等。

## 2.11 尺寸

图17是表示22、66kV变压器的主要尺寸。图17的尺寸代号: X为宽度、Y为长度、Z为高度。

这些是标准的尺寸,虽然按照规格的不同可以在相当大的范围内变化,但是采用制造厂的标准型式,在交货和价格上都有利。

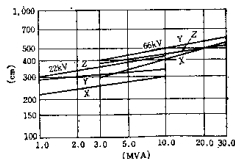
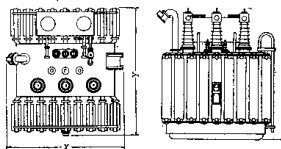


图17 概略尺寸

# 第3章 激磁现象

## 3.1 激磁电流<sup>(1)(2)(5)(10)(40)</sup>

激磁电流包括供给铁心损耗的有功分量和在铁心中产生磁通的无功分量。前者称损耗电流,后者称磁化电流。

由于铁心的磁化特性是非线性的,且有磁滞现象,所以变压器绕组加正弦波电压时的激磁电流,多半为含有奇次谐波的畸变波形。图18表示由磁滞回线对应于正弦波磁通描绘激磁电流波形的方

法。各次谐波的大小,根据铁心材质、磁通密度和结构等的不同而异,在一般情况下大致如表4所示。反之,如果限制某一高次谐波电流流入,则在绕组中产生该谐波的感应电势,如同一种高次谐波的电压发生器,电压波形成为尖顶波。图19表示从磁滞回线作出对应于正弦波形的激磁电流的磁通的波形,求得其与时间变化成比例的感应电势波形的作图方法。

一次为Y结线中性点接地的时候,3次谐波激

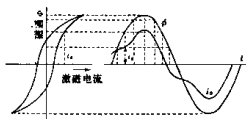


图18 激磁电流波形

表4 激磁电流的高次谐波

| 高次谐波  | 热轧硅钢片      | 冷轧硅钢片     |
|-------|------------|-----------|
| 基波    | 1          | 1         |
| 3次谐波  | 0.15~0.55  | 0.4~0.5   |
| 5次谐波  | 0.03~0.25  | 0.10~0.25 |
| 7次谐波  | 0.02~0.10  | 0.05~0.10 |
| 9次谐波  | 0.005~0.02 | 0.03~0.06 |
| 11次谐波 | 0.01以下     | 0.01~0.03 |

磁电流如同零序电流那样在△结线中环流,不出现在线路电流中。

一次为Y结线中性点不引出,且二次或三次若

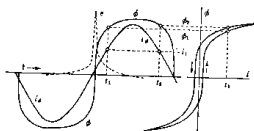


图19 对应于正弦波激磁电流的感应电势

为 $\Delta$ 结线,则一次激磁电流中的3次谐波电流由于中性点闭塞而不能流通,由此产生的3次谐波电势被 $\Delta$ 结线短路,3次谐波循环电流在 $\Delta$ 结线内流通,供给必要的磁势以形成正弦波磁通。 $Y-\Delta$ 绕组间漏阻抗相当高时,相当于它的3次谐波阻抗电压的电压在中性点和大地之间产生。另外,如把 $\Delta$ 结线的一个角打开,在该角上就得到3次谐波电压,这个原理也用在变频装置上。

一次为 $Y$ 结线中性点不引出,而又没有其它 $\Delta$ 结线时,由于激磁电流的3次谐波电流没有通路,因此感应电势中出现较大的3次谐波电势,中性点电位位移,各相的感应电势波形畸变。但是在线电压中3次谐波电势是互相抵消而不出现的。

一次或二次的 $Y$ 结线中性点接地,而不和电源中性点连接时,在二次侧连接输电线路等容性负荷并流入电流时,其3次谐波电压就会产生感应性故障,或者产生与3次谐波电压共振的过电压。一次中性点与电源中性点连接时,则3次谐波电流在两中性点间环流,有感应故障产生(见第24篇1.9节)。为了防止发生这样的故障,一般变压器至少有一侧设置一个 $\Delta$ 结线的绕组。作为例外的是,三相三柱式铁心的变压器,没有 $\Delta$ 结线而3次谐波电流也流不通时,因为该铁心对3次谐波磁通不是闭合磁路,难于产生3次谐波磁通,电压波形畸变少。因此,这种型式的变压器没有 $\Delta$ 结线也可以使用。但此时,变压器零序阻抗较大,系统事故时零序电流所产生的零序磁通对变压器有影响,变压器内部事故时的事故检测灵敏度下降,要作充分的研究。

在线路中出现激磁电流中的5、7次谐波时,系统的电压波形可能紊乱。对此的措施是,在三相心式铁心的铁轭中开以槽缝并增设辅助绕组。以这样的抵消5、7次谐波的办法做成的变压器称无高次谐波变压器,在德国曾制造过这样的变压器。

激磁电流通常在施加额定正弦波电压时用有效值表示,并用额定电流的百分数表示。与它有相同有效值的正弦波电流称等值正弦波激磁电流,在决定矢量图、等值电路的激磁导纳等用之。激磁电流百分数在容量越大,而且电压越低时它越小,在容量从数千到数十MVA时为0.5~2%。

### 3.2 激磁涌流<sup>(1)(2)(3)(4)(5)(6)(7)(8)(9)(10)(11)(12)(13)(14)</sup>

当变压器投入线路,激磁电流立即处于不正常状态而产生过渡现象,其峰值可超过额定负荷电流的5倍。该电流称激磁涌流,由于对保护变压器的差动继电器有和变压器内部故障电流类似的作用,电流值太小时将引起继电器的误动作,发生变压器不能投入线路那样的事。这个涌流的大小,因投入变压器时线路电压的相位以及铁心剩磁通的状态等而有所变化。

最大涌流产生在图20中的P点,也就是在电压过零的瞬间投入的情况。这时,稳定状态的磁通最大值为 $\phi_m$ ,投入 $\frac{1}{2}$ 周波后磁通变化到 $2\phi_m$ 。然而在磁通的起点,由于变压器投入前铁心中有剩磁通 $\phi_r$ ,投入 $\frac{1}{2}$ 周波后磁通为 $2\phi_m + \phi_r$ , $\phi_r$ 和磁通变化方向同方向时,远远超过铁心的饱和磁通,其结果产生极大的激磁涌流。图20也表示这样的关系,由于暂态磁通超过了铁心饱和磁通而表示出涌流峰值增大的状态。图21表示磁通和涌流随时间变化的关系,由于磁通中包含的直流分量随时间衰减,涌流峰值也随之减小。涌流的持续时间由回路电阻和阻抗决定,大容量变压器较长。实测结果表明,小容量的在10个周波以上,大容量的为5~10秒,或者还要长些。采用取向硅钢片的变压器和采用非取向硅钢片的相比饱和磁通和稳态磁通之比较小,剩磁通也

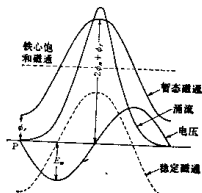


图20 激磁涌流的说明图

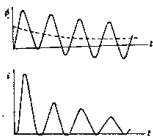


图21 暂态激磁电流和磁通波形

有增大的趋势，所以一般来说激磁涌流较大。

图22表示按变压器的容量所得到的最大涌流计算值。实际上，由于下述的理由，产生这么大的涌流的可能性很小。

(i) 断路器在电压过零点时投入的可能性很小。

(ii) 涌流流通时，外部线路的电压本身要下降。

(iii) 剩磁通也不限定与电压变化方向同向，且根据外部线路的状态，有可能减少。

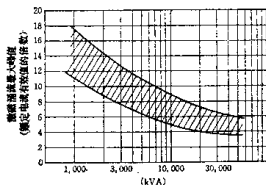


图22 激磁涌流

三相变压器组的三相总有一相要产生过流现象，因此无论什么瞬间投入都不可避免地要出现涌流。通常心式变压器内侧绕组空心电抗小，所以由内侧绕组激磁时涌流大。

如前所述，涌流大时差动继电器会误动作。为防止误动作，在变压器投入后一定的时间内，采用闭锁继电器的方法，或用能辨别涌流和事故电流波形的高次谐波抑制型差动继电器。

## 第4章 漏磁通现象

### 4.1 绕组布置与漏电抗<sup>(16)~(21)</sup>

变压器通常采用的绕组布置，有图23(a)那样的一、二次绕组在铁心柱周围的同心布置，和图23(b)那样的在轴向交错重叠布置的两种。前者称同心布置，后者称交叠布置。心式变压器除特殊情况外，通常采用同心布置，壳式变压器一般采用交叠布置。同心布置时漏磁通主要沿轴向流通，交叠布置时则沿径向流通。

这些布置中的一、二次绕组间的漏电感，可把铁的磁导率看作无限大，通过将一、二次合成磁势在空间形成的磁场能量积分求得。漏磁通的分布实际上是相当复杂的，最近由于电子计算机技术的进步，能求得相当准确的磁场，从而能求得漏电感值。但是，概略值可用如下的方法求得。

如 $N$ 为一侧绕组的总匝数， $q$ 是把整个绕组进行一、二次组合而分成的组数〔等于一、二次绕组间的空隙数，图23(c)为1，图23(d)为4〕， $\delta$ 为两绕组间的空隙宽 (cm)； $A_1$ 、 $A_2$  分别为一、

二次绕组与漏磁通垂直方向的一组的尺寸 (cm)； $M$  为线圈一匝的平均长 (cm)； $h$  为与漏磁通同方向的线圈高 (同心布置时) 或宽 (交叠布置时) (cm)； $k$  为罗果夫斯基系数，则折算到 $N$ 匝绕组侧的总漏电感 $L$  (H)，由式 (8) 求得。

$$L = 4\pi k \frac{N^2 M}{qh} \left( \delta + \frac{A_1 + A_2}{3} \right) \times 10^{-9} \text{ (H)} \quad (8)$$

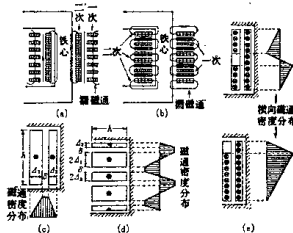


图23 变压器绕组的布置和漏磁

$$k \approx 1 - (\delta + \delta_1 + \delta_2) / \pi h$$

从而,设频率为  $f$  (Hz), 漏电阻  $X$  ( $\Omega$ ) 可由式 (9) 计算。

$$X = 2\pi fL = 7.9 \frac{fN^2M}{qh} k \left( \delta + \frac{\delta_1 + \delta_2}{3} \right) \times 10^{-8} \quad (\Omega) \quad (9)$$

由额定电流在漏阻抗中产生的电压降,以额定电压的百分数表示时,称阻抗电压百分数。其标准值参见表 1。另外,阻抗电压百分数中还包括电阻分量的电压降,通常电力变压器的电阻分量很小,所以电抗电压百分数照样可以称为阻抗电压百分数。

为了减小漏电抗,例如在心式变压器中,可加粗铁心减少匝数,也可以加长铁心柱增大绕组高度。于是,漏电抗小的变压器通常趋向为用铁多的机器,铁心重量和空载损耗增加,铜的重量和负载损耗减小。反之,漏电抗大的变压器趋向为用铜多的机器。通常,铁心比铜重,而负载损耗比空载损耗大,因此漏电抗越小总重大,总损耗则有减小的趋势。细分绕组以增加组数  $q$ , 随着线圈宽度  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  的减小,漏电抗急剧减小。对于大容量的心式变压器和壳式变压器,随着容量的增大而要避免阻抗的增大,选择  $q$  大于 1 是适宜的。

两绕组高度不同时,或由于工作上的误差而使磁性中心偏移时,或一侧绕组分接头被切除时,产生如图 23(e) 表示的垂直于主漏磁通的横向漏磁通,从而增加了漏电感。

横向漏磁通使绕组内涡流增大,而在外部短路时将产生绕组支路上成问题的电磁机械力。为了减小横向漏磁通, (i) 同心布置时分接头不放置在两端,而放置在中部,或将其分开放置在线圈长度的 1/4 和 3/4 处; (ii) 低压线圈高度在绝缘上可比高压线圈高,把它们大致凑成相同的高度; (iii) 交叠布置时,分接头尽可能远离一、二次的对立面,尽可能在各组中平均分配等是有效的。

绕组分为多个串联或并联分区,复杂他组合成为不对称组的时候,先求每个分区的漏电抗,然后组合起来算出一、二次间的综合漏电抗。例如,一次绕组分为 A、B 两部分,各自的感应电势为  $E_A$ 、 $E_B$ , 且它们是串联连接时,则和二次绕组 C 之间的电抗电压百分数  $(\%IX_{AB/C})$  由式 (10) 表示。

$$(\%IX_{AB/C}) = k_A(\%IX_{AC}) + k_B(\%IX_{BC}) - k_A k_B(\%IX_{AB}) \quad (10)$$

式中,各电抗电压百分数均以同一 kV·A 为基准表示的,且  $k_A = E_A / (E_A + E_B)$ ,  $k_B = E_B / (E_A + E_B)$ 。

另外 Y/ $\Delta$ 、Y/Y/ $\Delta$  结线的变压器中性点接地的時候, Y 绕组的零序阻抗一般等于它与  $\Delta$  绕组间的正序漏阻抗,但心式三相三柱铁心的变压器将减小 90% 左右。

## 4.2 绕组的涡流损耗和杂散损耗

耗 (20)~(30) (35) (36)

在变压器绕组导线中,由于交变漏磁通感应而产生涡流,因此对交流的等值电阻比用直流测量的电阻大 5~20%。交流电阻和直流电阻的比值  $k$  的精密计算,必须由电子计算机求得,但粗略数值则可由式 (11) 求得。

$$k = 1 + [(m^2 - 0.2)\lambda^4] / 9 \\ \lambda = 2\pi f \sqrt{nb / \rho} \times 10^{-3} \quad (11)$$

式中  $n$ 、 $m$  分别为在漏磁通平行和垂直方向的导线数;  $b$ 、 $t$  分别为在漏磁通平行和垂直方向的导线尺寸 (cm);  $l$ : 漏磁通的磁路长度 (cm);  $f$ : 频率 (Hz);  $\rho$ : 电阻率 ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )。

交流电阻增加的程度受垂直于磁通方向的导线尺寸  $t$  的影响最大,因此需要减小  $t$  的尺寸。绕组涡流损耗是构成前述杂散损耗的主要部分,但如由漏磁通在涡流回路中感应的电势为  $e$ , 其回路电阻为  $r$ , 电流回路电抗  $X$  比电阻  $r$  小时,则涡流损耗以  $e^2/r$  的形式表示,因此温度上升,电阻增加,它成反比例地减小。由此,通常总的杂散损耗也可考虑和温度以相同比例变化,并要进行温度修正。

大电流绕组为了绕制线圈方便又能达到减少绕组涡流损耗的目的,把多根导线并列使用。并列导线重叠方向与漏磁通垂直时,为了防止各导线间的循环电流,导线的相互位置要在绕制过程中进行转换,使在全长范围内漏磁通交链量均匀。这种转换称为换位。

图 24 表示 3 根导线并列的同心式布置的螺旋式线圈或圆筒式线圈的换位方式。饼式线圈段间过渡部分也进行同样的换位。图 25 表示 4 根导线并列的螺旋线圈的换位方法,在绕组中部把整个导线的排列顺序内外倒换进行标准换位,在全长的 1/4 和 3/4 处把里面 2 根和外面 2 根导线交换进行特种换位。图 26 表示 10 根并列导线分上下二列绕制的大电流



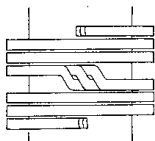


图24 换位的一例

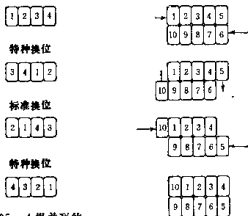


图25 4根并列的螺旋式线圈的换位

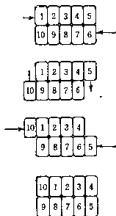
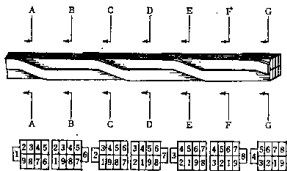


图26 交叉换位

螺旋线圈的换位方法。每隔(总匝数)/(导线根数)匝把上列里面的1根导线换至下列,而下列外面的1根导线换至上列,如此重复(并列导线数-1)次。这称为交叉换位,又称霍巴特(Hobart)换位。换位间的匝数可以不是整数。

如采用并列纸包扁铜线,由于在高压时纸包绝缘厚度厚的时候的填充系数低,因此有时也采用各导线本身绝缘仅是满足防止循环电流的薄绝缘,而在全体导线外面集中包上匝间或线圈间绝缘所需要厚度的组合绝缘层的组合导线。图27是用特殊绞线机把漆包扁铜线同上述的霍巴特换位一样,边换位边绞合的组合导线的例子。它称为换位导线,其上包以纸绝缘。



A、B、C等部分的截面

图27 换位导线

漏磁通的一部分在进入铁心的途中,或经铁心外的绕组外面空间而闭合的途中,流经油箱壁、夹件和紧固螺栓等,因此产生涡流损耗和磁滞损耗。此外,大电流引线和大电流套管在油箱及其他结构中产生的磁通也产生同样的现象。这些结构材料中产生的损耗与绕组内的涡流损耗合在一起称为杂散损耗。

杂散损耗达到直流电阻损耗的5~50%,磁通密度大时或绕组布置不对称而横向漏磁大时,增加特别多。为了降低油箱中产生的损耗以避免局部过热,横向磁通特别大时或是大容量变压器时,采用在油箱内侧设置硅钢片叠积的磁屏蔽以吸收漏磁通的方法,或在油箱上镶置铜、铝等良导体的短路屏蔽板以产生涡流来排斥漏磁通,防止漏磁通到达油箱壁的方法,或以非磁性金属制造油箱的一部分的方法。

### 4.3 绕组短路时的电磁机械力<sup>(31)(37)~(41)</sup>

电流流过变压器绕组时该电流产生的磁通,亦即漏磁通,和电流相互作用,产生与电流平方成正比的电磁机械力。系统短路时,电流将达到额定值的几倍到几十倍,该力达到极大的值。绕组强度不够或支撑不完善时,有引起机械损伤的危险。因此在绕组的设计中,对这一点必须给予充分注意。

短路电流由下式决定。

$$I_s = 100k \cdot I_R / (Z_r + Z_s)$$

式中  $I_s$ : 包含直流分量的短路电流峰值(A);  $I_R$ : 该分接下的额定电流有效值(A);  $Z_r$ : 该分接下变压器的漏阻抗百分数(对应于  $I_R$  以kVA为基值的%);  $Z_s$ : 系统的或永久性连接设备的阻抗百分数(根据订货者的要求的值以同一kVA为基值的%);  $k$ : 包含直流分量的峰值的折算系数(见表5,表中  $R$ 、 $X$  是变压器和系统的电阻及电抗之和)。

表5  $k$  的值

| $X/R$ | 1    | 1.5  | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 8    | 10   | 14   |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $k$   | 1.51 | 1.64 | 1.76 | 1.95 | 2.09 | 2.19 | 2.27 | 2.38 | 2.46 | 2.55 |

短路时的电磁机械力是根据流过同向电流导线相吸,流过反向电流导线相斥的定律而作用的,对于变压器绕组通常起使漏阻抗增大的作用。电磁机