

第2篇

变压器、互感器、 调压器、 电抗器

第2篇

变压器、互感器、 调压器、 电抗器

主编单位 沈阳变压器研究所

编写单位 保定变压器厂
西安变压器厂
沈阳变压器厂
上海互感器厂
上海电压调整器厂

主 编 朱英浩

副 主 编 郑时伊

编 写 人 王振武 徐基泰 肖耀荣 刘在勤
张景洲 何明光

主 审 于海年

第 1 章 电力变压器

1 概述

随着发电机组单台容量的增大和输电电压等级的升高,变压器单台容量和电压等级也随之相应增大和升高,同时对变压器的可靠性也提出了更高的要求。目前国内变压器最大单台容量为 400MVA (三相),最高电压等级为 500kV。国外则分别已达到 1300MVA (三相)和 1150kV。某些变压器制造厂已具备制造 1000~1150kV 电压等级变压器的能力,如日本已制造出 1000kV 电压等级变压器样机,预计将于 2001 年在东京投入运行。俄罗斯制造的 1150kV 电压等级变压器已经试运行多年,并正在探讨 2000kV 电压等级输电技术的可能性。与此同时,变压器制造技术近年来也取得了巨大发展,如开发在线监测技术监视变压器潜在故障;采用优质导磁材料制造变压器铁心,并采用阶梯式铁心片接缝型式,使变压器空载损耗和空载电流有较大幅度的降低;在变压器绕组中采用无氧铜扁导线制成的组合导线或换位导线,并在器身结构和油箱结构中采用磁屏蔽或电屏蔽结构,使变压器负载损耗有

较明显降低;采用低噪声技术使变压器噪声水平下降;研制出能与气体绝缘组合电器配套的油浸式变压器;已研制出高电压大容量 SF₆ 气体绝缘变压器,并已投入试运行,现正着手研制超导变压器。

1.1 用途和分类

发电机输出的电能经由发电机变压器升压后输送到负荷中心,或经由联络变压器将电能输送到其他电力系统;然后,再经降压变压器降压后输送到工业区或生活区;最后,还要经由配电变压器将电压降低到应用电压水平。这一系列变压器,包括发电机变压器、联络变压器、降压变压器和配电变压器,统称为电力变压器。为满足特殊用途所需的变压器,如发电厂自用变压器、干式变压器、电炉变压器、变流变压器、试验变压器、船用变压器、中频变压器和接地变压器等,统称为特种变压器。电压互感器、电流互感器、调压器和电抗器的工作原理及结构型式类似于变压器。以上所有产品它们统称为变压器类产品。变压器类产品在电力系统中的应用概况见图 2-1-1。

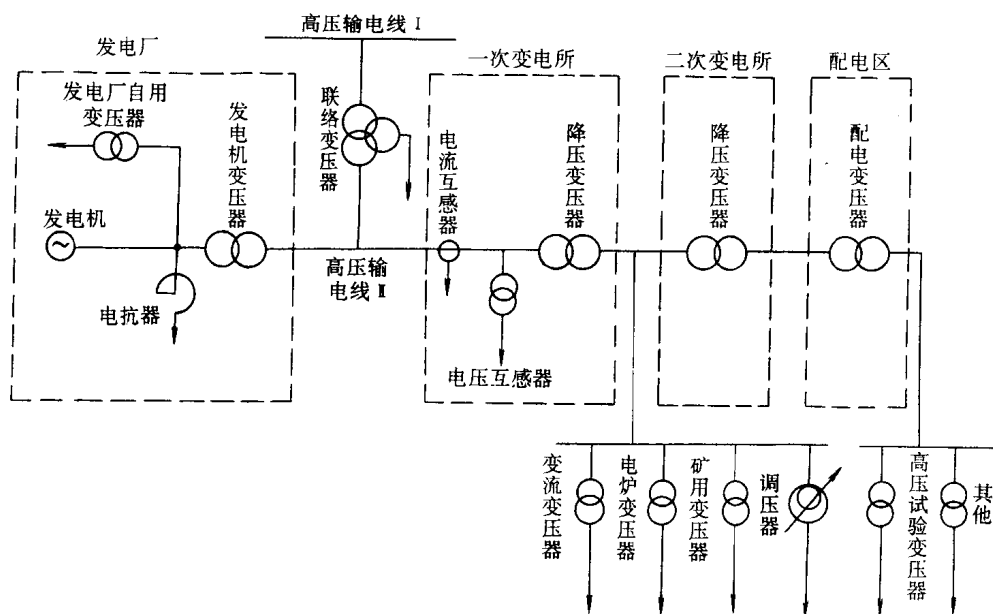


图 2-1-1 变压器类产品应用示意图

1.2 技术条件

在变压器订货、设计、制造、试验和验收过程中,有关技术条件应符合国家标准 GB6451.1~5—86《三相油浸式电力变压器技术参数和要求》中规定的额定容量等级、电压组合、分接电压、联结组标号、空载损耗、空载电流、负载损耗和短路阻抗、技术要求和测试项目等规定;还应符合国家标准 GB1094.1~1094.5—85 中规定的变压器使用条件、额定值、允许偏差、试验项目、温升标准和温升试验方法、绝缘水平和绝缘试验方法、分接和联结方法以及变压器承受短路能力等要求。在国际上变压器投标时,应符合标书中指定的要求,如 IEC76-1~5《电力变压器》中的规定,但 IEC 标准中不规定变压器的损耗标准值,标书中一般有损耗评价价值要求。损耗评价值的计算方法参见参考文献 [1]。

2 运行原理

2.1 空载特性

变压器的空载特性以空载电流和空载损耗表示。空载电流由有功分量和无功分量组成,见式 (2.1-1)。有功分量对应于空载损耗,在工程上认为空载损耗全部是铁心损耗。无功分量对应于铁心励磁容量。

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_{0a} + \dot{I}_{0r} \quad (2.1-1)$$

式中 $\dot{I}_0$ ——空载电流,以额定电流百分数表示;

$\dot{I}_{0a}$ ——有功分量,以额定电流百分数表示;

$\dot{I}_{0r}$ ——无功分量,以额定电流百分数表示。

变压器空载运行时(二次绕组开路),向变压器一次绕组上(分接开关位于主分接位置)施加额定频率正弦波形的额定电压,此时测出的损耗为空载损耗,测出的电流为空载电流,测出的电压比为额定电压比。此电压比正比于绕组的匝数比。三相变压器的电压比指空载时额定线电压比。变压器空载运行时的相量图见图 2.1-2。

2.1.1 空载电流中的谐波分量

变压器铁心具有磁饱和特性(非线性)和磁滞现象,因而空载电流的波形中含有各次谐波分量,见图 2.1-3。其中,以奇次谐波且尤以三次谐波为主,但也含有一定偶次谐波分量。

各次谐波分量以基波的百分数表示,谐波分量的

大小取决于铁心工作磁通密度和硅钢片的磁饱和特性。正常工作磁通密度时的三次谐波分量约可达基波的 40%~60%,其他各次谐波分量相对较小。

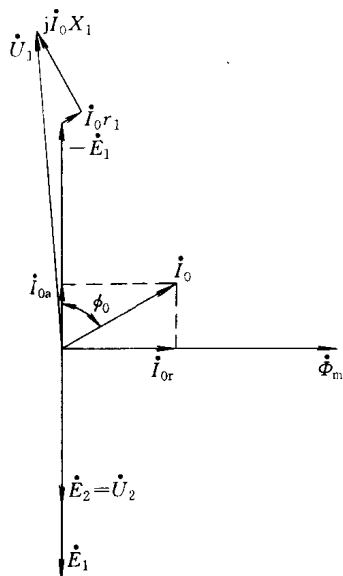


图 2.1-2 变压器空载运行时的相量图

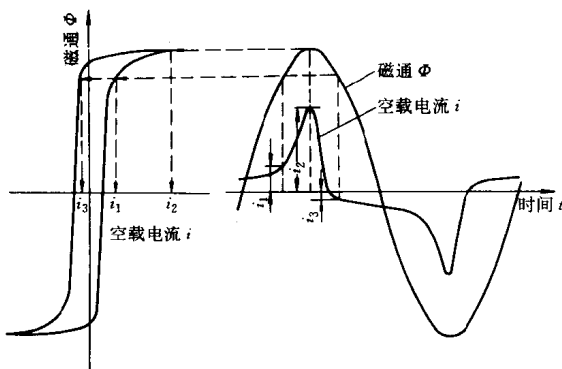


图 2.1-3 空载电流波形

变压器绕组为 Y 联结而不引出中性点,即中性点绝缘时,三次谐波分量电流在三相中的相位彼此相同,没有三次谐波分量电流的通路,所以空载电流中不含有三次谐波分量。由于铁心的非线性磁特性,磁通就含有三次谐波分量,从而使三相的相电压中也含有三次谐波分量电压而呈尖顶波,因而增大了相电压峰值,不利于绝缘强度。但三次谐波分量电压在线电压中彼此互相抵消。变压器绕组为 Y 联结并引出中性点或中性点接地时,空载电流中将含有三次谐波分量,因而相电压中不含有三次谐波分量电压。但空载电流中三次谐波分量将在输电线路产生干扰现象,有时可能与输电线的静电电容发生谐振而产生过电压。因此,变压器应具有一个 d 联结绕组,以便为三次谐波分量电流提

供循环通路。但是,小型三相变压器采用三柱式铁心结构时,仍然可采用Y, yn联结绕组(即无d联结绕组),虽然由于没有三次谐波分量电流而有三次谐波磁通,但三次谐波磁通通过油隙、铁心夹件、铁心和油箱而形成闭合回路,它的磁阻很大,因此三次谐波磁通不大。所以心式铁心的小型三相变压器具有Y, yn联结绕组无d联结绕组时,仍可正常运行。但这个结论不适用于由单相变压器组成的三相变压器组、壳式铁心三相变压器和五柱式铁心三相变压器。

2.1.2 空载合闸励磁涌流

变压器在空载状态下接入电源瞬间,铁心中磁通将开始按电源电压波形积分关系变化,但此时磁通将以空载合闸前铁心中已存在的剩余磁通作为磁通变化的起点。如合闸瞬间的电源电压波形正好过零时,并且铁心中已存在的剩余磁通 Φ_r 正好与合闸后的工作磁通方向一致而形成两者叠加关系。当电源电压波形经过半个周期后再次过零时,铁心中磁通的峰值达到 $2\Phi_m + \Phi_r$ (见图2.1-4)。此时磁通的峰值远超过铁心磁通饱和值,因而励磁电流达到极高数值,同时电流波形产生严重畸变,这便是励磁涌流。有时,此励磁涌流将达到额定电流的几倍以上。变压器铁心中的磁通瞬变过程见图2.1-5。有关空载合闸励磁涌流的分析见参考文献[2]。

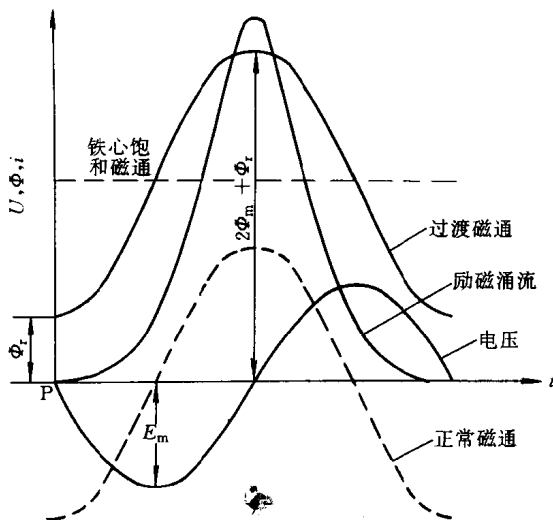


图 2.1-4 空载合闸励磁涌流

P—合闸瞬间(正值电源电压波形过零时)

Φ_r —合闸前铁心中已经存在的剩余磁通

值 E_m —电源电压峰值 Φ_m —对应于

电源电压为 E_m 的铁心磁通峰值

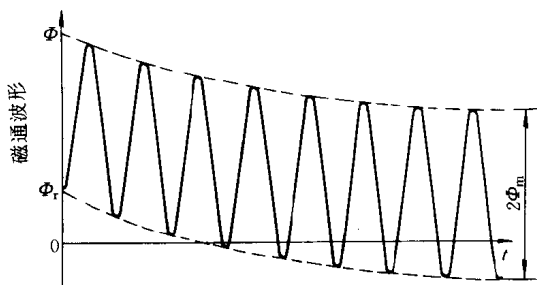


图 2.1-5 空载合闸后磁通瞬变过程

励磁涌流瞬变过程的持续时间取决于时间常数,即与电源相联使变压器励磁的合闸绕组的电感和电阻的比值。变压器容量愈大,此时间常数也愈大。励磁涌流的瞬变过程见图2.1-6。

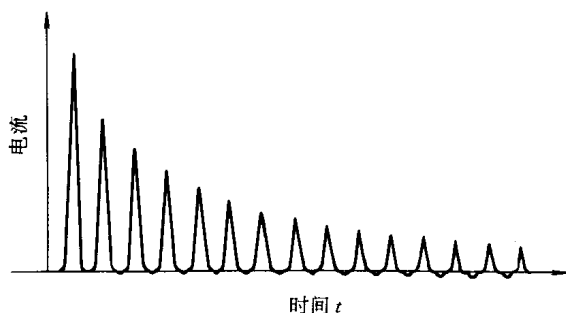


图 2.1-6 励磁涌流瞬变过程

2.2 阻抗特性

变压器的负载特性以阻抗压降和负载损耗表示。变压器负载运行时的负载电流和阻抗压降的相量图见图2.1-7。负载运行时的等效电路见图2.1-8。负载电流产生的有功损耗(即负载损耗)包括绕组中电阻损耗和漏磁在金属结构件中产生的附加损耗。

变压器负载运行时空载电流相对很小,当略去空载电流时,变压器负载运行的简化等效电路见图2.1-9。

进行变压器负载试验时,先将二次绕组短路,再向一次绕组(分接开关位于主分接位置)施加额定频率正弦波形的阻抗电压,这个阻抗电压能使一次与二次绕组内电流达到50%及以上额定电流。此时测出或折算到额定电流下的负载损耗称为额定负载损耗,此值还应按式(2.1-22)换算成参考温度时的额定负载损耗。此时测出的阻抗电压以额定电压的百分数表示如下:

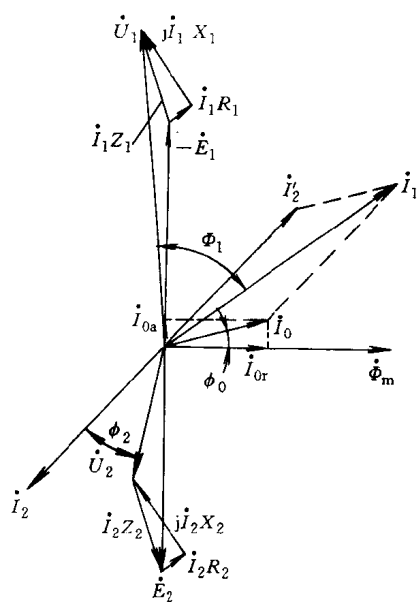


图 2-1-7 变压器负载运行相量图

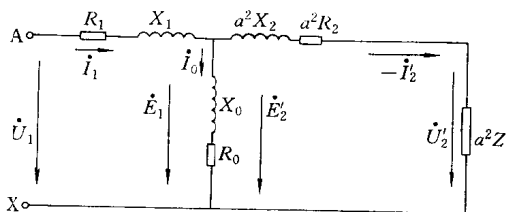


图 2-1-8 变压器负载运行等效电路

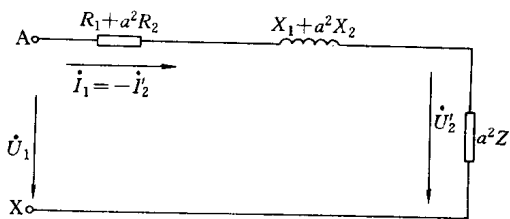


图 2-1-9 变压器负载运行简化等效电路

$$u_z = \frac{U_z}{U_r} \times 100 (\%) \quad (2-1-2)$$

式中 u_z ——阻抗电压百分数 (%)；

U_z ——实测阻抗电压 (V)；

U_r ——绕组额定电压 (V)。

实测阻抗电压 U_z 除以额定电流得出短路阻抗值 (Ω)。在工程上,认为这个短路阻抗值就是变压器实际运行时的阻抗值。变压器的一些负载运行特性如电压调整率、并联运行的必要条件、短路电流达到额定电流的倍数等都取决于短路阻抗值。此外,短路阻抗值还是

决定变压器技术和经济指标的重要因素之一。

2.3 短路电流

变压器外部发生短路事故(如三相对称短路、相间短路、两相接地或单相接地)时的电流称为短路电流。变压器应能够承受住短路电流产生的电磁力和热效应作用而无损伤。短路电流指从瞬变短路电流过渡到稳态短路电流过程。

2.3.1 稳态短路电流

GB1094.5—85 规定用计算方法验证变压器承受三相对称稳态短路电流作用下的耐热能力。还规定如下三相对称短路电流 I_{sc} 的计算式:

$$I_{sc} = I_n \times \frac{100}{u_z + \frac{S_n}{S} \times 100} \quad (\text{A, 有效值}) \quad (2-1-3)$$

式中 I_n ——变压器额定电流 (A, 有效值);

S_n ——变压器额定容量 (MVA);

S ——系统短路表观容量 (MVA), 参见 GB 1094.5—85 中表 2 数值。

2.3.2 瞬变短路电流

GB1094.5—85 规定用试验方法验证变压器承受瞬变短路电流作用下电磁力的能力。不考虑系统阻抗时,瞬变短路电流 i_{sc} (瞬时值) 的计算式如下:

$$i_{sc} = \sqrt{2} I_{sc} [\cos \phi_0 e^{-\frac{R_{12}}{X_{12}} t} - \cos (\omega t + \phi_0)] \quad (\text{A, 瞬时值}) \quad (2-1-4)$$

式中 I_{sc} ——稳态短路电流 (A, 有效值), 见式 (2-1-3);

ϕ_0 ——发生短路瞬间一次电压 u_1 的初相角;

R_{12} 、 X_{12} ——变压器的等效电阻和等效电抗 (Ω);

ω ——角频率;

t ——时间 (s)。

当一次电压 u_1 波形过零时,即 $\phi_0 = 0$ 发生短路,则瞬变短路电流计算式 (2-1-4) 变成下式:

$$i_{sc} = \sqrt{2} I_{sc} (e^{-\frac{R_{12}}{X_{12}} t} - \cos \omega t) = \sqrt{2} I_{sc} (e^{-\frac{T}{t}} - \cos \omega t) \quad (2-1-5)$$

$$T = L_{12}/R_{12}$$

式中 T ——时间常数,从瞬变短路电流过渡到稳态短路电流过程的持续时间 (s);

L_{12} ——变压器等效电感 (H)。

式(2·1-5)中当 $\omega t = \pi$ 时,瞬变短路电流达到第1个峰值,即图2·1-10中所示的瞬变短路电流的最大峰值,此峰值电流 i_{SCM} 为

$$i_{SCM} = \sqrt{2} I_{SC} (1 + e^{-\frac{R_{12}}{X_{12}}})$$

$$= \sqrt{2} I_{SC} K (\text{瞬时值}) \quad (2·1-6)$$

$$K = 1 + e^{-\frac{R_{12}}{X_{12}}}$$

中小型变压器时 $K = 1.2 \sim 1.4$

大型变压器时 $K = 1.7 \sim 1.8$

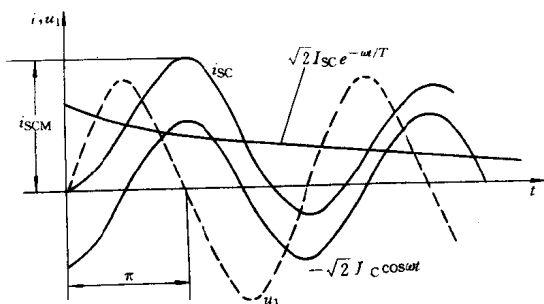


图2·1-10 变压器瞬变短路电流最大峰值

2·4 电压调整率

双绕组变压器负载运行时,二次绕组输出电压将随负载电流和负载功率因数的变化而变化,变压器的电压调整率 $\varepsilon\%$ 为

$$\varepsilon\% = \frac{u_{2n} - u_2}{u_{2n}} \times 100 \quad (2·1-7)$$

式中 u_{2n} ——空载时的额定二次电压(V);

u_2 ——负载时的二次电压(V)。

当已知变压器的电阻电压百分数 $IR\%$ 及电抗电压百分数 $IX\%$ 时,可按不同的负载系数 K_{Lz} 和负载功率因数 λ_2 (即 $\cos\phi_2$),用下式计算电压调整率 $\varepsilon\%$:

$$\varepsilon\% = K_{Lz} (IR\% \cos\phi_2 + IX\% \sin\phi_2) + \frac{K_{Lz} (IX\% \cos\phi_2 - IR\% \sin\phi_2)^2}{200} \quad (2·1-8)$$

如不需要特别准确时,则可按下式计算:

$$\varepsilon\% = K_{Lz} (IR\% \cos\phi_2 + IX\% \sin\phi_2) \quad (2·1-9)$$

式中 K_{Lz} ——负载系数, $K_{Lz} = \text{输出容量} / \text{额定容量}$;

$\sin\phi_2 = \pm \sqrt{1 - \cos^2\phi_2}$ 滞后电流取正值,超前电流取负值。

电压调整率是衡量变压器供电质量好坏的指标之一,当变压器的阻抗电压百分数一定时,电压调整率主要与负载功率因数有关。当 $\cos\phi_2 = 1$ 时, $\varepsilon\%$ 为最小。 $\cos\phi_2$ 较小时, $\varepsilon\%$ 主要取决于 $IX\%$,大型变压器的

$IX\%$ 较大, $\varepsilon\%$ 也就较大。

2·5 运行效率

变压器运行效率为输出有功功率 P_2 与输入有功功率 P_1 之比,以 η 表示

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100 (\%)$$

负载运行时, P_2 与负载系数 K_{Lz} 和负载功率因数有关,当略去变压器短路阻抗不计时,变压器运行效率的计算式如下:

$$\eta = \left(1 - \frac{P_0 + K_{Lz}^2 P_k}{K_{Lz} S_n \cos\phi_2 + P_0 + K_{Lz}^2 P_k} \right) \times 100 (\%) \quad (2·1-10)$$

式中 P_0 ——空载损耗(kW);

P_k ——额定电流时的负载损耗(kW);

K_{Lz} ——负载电流系数。

变压器运行中实际负载电流不是额定电流时的负载损耗而为 $K_{Lz}^2 P_k$,变压器运行中的空载损耗保持不变为一常数 P_0 。当变压器的负载损耗 $K_{Lz}^2 P_k$ 等于空载损耗 P_0 ,即 $K_{Lz}^2 P_k = P_0$ 时,变压器的运行效率达到最高值。通常中小型变压器最高效率在95%~98%范围内,大型变压器一般在99%以上。三绕组变压器运行效率的计算方法参见参考文献[3]。

2·6 三绕组变压器

三绕组变压器的结构型式和运行性能分析方法类似于双绕组变压器,但有关技术参数的定义如下:

1. 电压比 在额定电压下空载运行时,三绕组变压器有三个双绕组电压比,即

$$\left. \begin{aligned} K_{12} &= \frac{N_1}{N_2} = \frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} \approx \frac{\dot{U}_{1n}}{\dot{U}_{2n}} \\ K_{13} &= \frac{N_1}{N_3} = \frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_3} \approx \frac{\dot{U}_{1n}}{\dot{U}_{3n}} \\ K_{23} &= \frac{N_2}{N_3} = \frac{\dot{E}_2}{\dot{E}_3} \approx \frac{\dot{U}_{2n}}{\dot{U}_{3n}} \end{aligned} \right\} \quad (2·1-11)$$

式中 K_{12} 、 K_{13} 、 K_{23} ——一次与二次绕组电压比、一次与三次绕组电压比、二次与三次绕组电压比;

N_1 、 N_2 、 N_3 ——一次、二次、三次绕组匝数;

$\dot{E}_1$ 、 $\dot{E}_2$ 、 $\dot{E}_3$ ——一次、二次、三次绕组感应电动势(V);

$\dot{U}_{1n}$ 、 $\dot{U}_{2n}$ 、 $\dot{U}_{3n}$ ——一次、二次、三次绕组额定

电压 (V)。

2. 电流 根据磁动势平衡关系,三绕组变压器负载运行时的电流分配如下式:

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 + \dot{I}_3 N_3 = \dot{I}_0 N_1 \quad (2\cdot1-12)$$

式中 $\dot{I}_1$ 、 $\dot{I}_2$ 、 $\dot{I}_3$ ——一次、二次、三次绕组负载电流 (A);

$\dot{I}_0$ ——空载电流 (A)。

如空载电流忽略不计,即 $\dot{I}_0=0$,并将二次和三次绕组负载电流换算到一次绕组侧的数值时:

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2' + \dot{I}_3' = 0 \quad (2\cdot1-13)$$

$$\text{式中 } \dot{I}_2' = \frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2$$

$$\dot{I}_3' = \frac{N_3}{N_1} \dot{I}_3$$

三绕组变压器的等效电路见图 2-1-11。

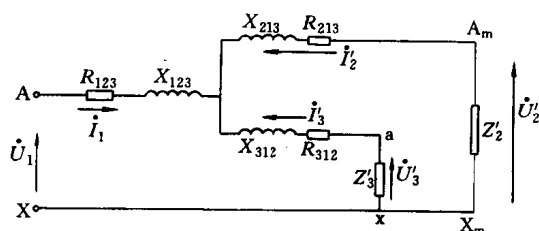


图 2-1-11 三绕组变压器等效电路

3. 电压 根据图 2-1-11 等效电路得出电压方程式如下:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 - \dot{U}_2 &= \dot{I}_1 (R_{123} + jX_{123}) - \dot{I}_2' (R_{213} + jX_{213}) \\ &= \dot{I}_1 Z_{123} - \dot{I}_2' Z_{213} \end{aligned} \quad (2\cdot1-14)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 - \dot{U}_3 &= \dot{I}_1 (R_{123} + jX_{123}) - \dot{I}_3' (R_{312} + jX_{312}) \\ &= \dot{I}_1 Z_{123} - \dot{I}_3' Z_{312} \end{aligned} \quad (2\cdot1-15)$$

$$\dot{U}_1 - \dot{I}_1 Z_{123} = \dot{U}_2 - \dot{I}_2' Z_{213} = \dot{U}_3 - \dot{I}_3' Z_{312} \quad (2\cdot1-16)$$

$$R_{123} = \frac{1}{2} (R_{12} + R_{13} - R_{23})$$

$$R_{213} = \frac{1}{2} (R_{12} + R_{23} - R_{13})$$

$$R_{312} = \frac{1}{2} (R_{13} + R_{23} - R_{12})$$

$$X_{123} = \frac{1}{2} (X_{12} + X_{13} - X_{23})$$

$$X_{213} = \frac{1}{2} (X_{12} + X_{23} - X_{13})$$

$$X_{312} = \frac{1}{2} (X_{13} + X_{23} - X_{12})$$

$$Z_{123} = \frac{1}{2} (Z_{12} + Z_{13} - Z_{23})$$

$$Z_{213} = \frac{1}{2} (Z_{12} + Z_{23} - Z_{13})$$

$$Z_{321} = \frac{1}{2} (Z_{13} + Z_{23} - Z_{12})$$

式中 R_{12} 、 X_{12} 、 Z_{12} ——一次绕组和二次绕组的双绕组短路电阻、短路电抗和短路阻抗;

R_{13} 、 X_{13} 、 Z_{13} ——一次绕组和三次绕组的双绕组短路电阻、短路电抗和短路阻抗;

R_{23} 、 X_{23} 、 Z_{23} ——二次绕组和三次绕组的双绕组短路电阻、短路电抗和短路阻抗。

2.7 自耦变压器

自耦变压器的结构特点是一次绕组与二次绕组在电路上相连,并有一部分绕组是公共绕组。自耦变压器与双绕组变压器的不同点在于前者绕组的结构容量小于额定容量。所以在额定容量相同时,自耦变压器具有重量轻、损耗小、成本低和效率高等优点,但要求能够耐受更高绝缘强度和更大短路电流能力。此外,由于一次绕组和二次绕组在电路上相连,为了过电压保护,自耦变压器的中性点必须直接接地。自耦变压器的结构和联结方式见图 2-1-12。

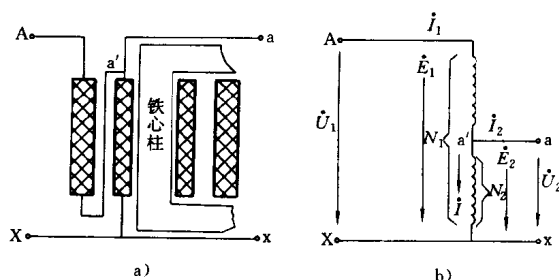


图 2-1-12 自耦变压器结构和接线图

a) 结构示意图 b) 接线原理图

AX——一次绕组 N_1 ——一次绕组匝数 ax——二次(公共)绕组

N_2 ——二次(公共)绕组匝数 Aa——串联绕组 $\dot{I}$ ——公共绕

组中电流 $\dot{I}_1$ ——串联绕组中电流 $\dot{I}_2$ ——二次绕组电流

$\dot{U}_1$ ——一次绕组电压 $\dot{U}_2$ ——二次绕组电压 $\dot{E}_1$ ——一次

绕组电势 $\dot{E}_2$ ——二次绕组电势

自耦变压器空载运行时的电压比,当忽略阻抗电压时与普通变压器一样,即

$$K_{12} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} \approx \frac{\dot{U}_{1n}}{\dot{U}_{2n}} \quad (2\cdot1-17)$$

式中 K_{12} ——自耦变压器电压比;

$N_1, \dot{E}_1, \dot{U}_{1n}$ ——一次绕组匝数、电势、额定电压；
 $N_2, \dot{E}_2, \dot{U}_{2n}$ ——二次绕组匝数、电势、额定电压。

自耦变压器负载运行时，磁势平衡式如下：

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_0 N_1 \quad (2\cdot1-18)$$

式中 $\dot{I}_0$ ——空载电流。

当空载电流 $\dot{I}_0$ 忽略不计，即 $\dot{I}_0 \approx 0$ 时，则磁势平衡式如下：

$$\dot{I}_1 + \frac{\dot{I}_2}{K_{12}} = 0 \quad (2\cdot1-19)$$

在图 2·1-12b 中，由 a' 点的电流关系求得公共绕组中的电流 $\dot{I}$

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \dot{I}_2 \left(1 - \frac{1}{K_{12}} \right) \quad (2\cdot1-20)$$

式中 $1 - \frac{1}{K_{12}}$ ——自耦变压器的效益系数。

自耦变压器的额定容量（通过容量）由两部分组成，一部分是传导容量，直接通过图 2·1-12b 中 A—a'—a 电路传导到负载侧；另一部分是结构容量，经由

串联绕组和公共绕组之间的电磁感应传输到负载侧。结构容量占自耦变压器额定容量的 $\left(1 - \frac{1}{K_{12}} \right)$ 。

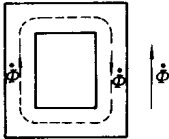
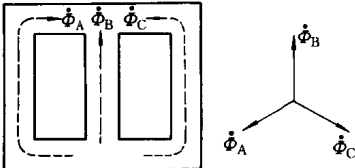
3 结构

电力变压器结构型式有各种不同分类方法，如按铁心结构可分为心式变压器和壳式变压器；按相数可分为单相变压器和三相变压器；按绕组数量可分为双绕组变压器和三绕组变压器；按绝缘介质可分为油浸式变压器和干式（空气绝缘、SF₆ 气体绝缘或浇注绝缘）变压器；按冷却方式可分为空气冷却变压器、油自然循环冷却变压器、强迫油循环冷却变压器、强迫油循环导向冷却变压器和水冷却变压器。

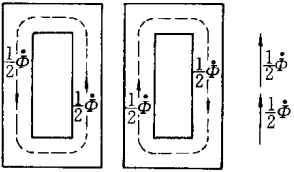
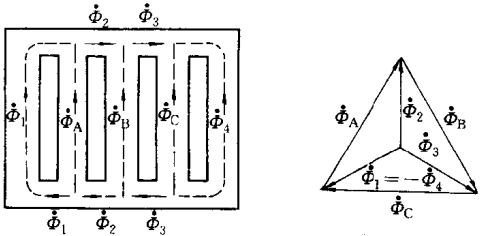
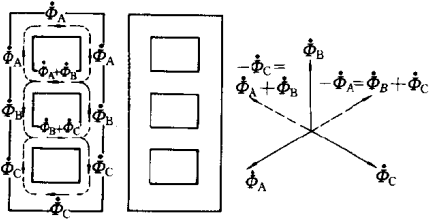
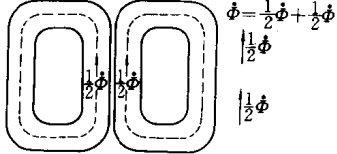
3.1 铁心

国内绝大多数变压器制造厂采用心式铁心结构，变压器铁心结构特征、铁心中磁通分布、磁通矢量图和适用范围见表 2·1-1。

表 2·1-1 各种铁心结构特性矢量图、磁通分布和适用范围

结构型式	磁通分布和矢量图	结构特征	适用范围
单相双柱式	 铁心柱和铁轭截面相同，两者磁通量和磁通矢量相同	两个铁心柱上均可套装绕组，两个铁心柱上的绕组既可互相串联也可并联	中小型单相变压器
三相三柱式	 铁心柱和铁轭的截面相同，三个铁心柱中的磁通量近似相同，相互间的相位差为 120°。由于中间 B 相铁心柱磁路相对较短，三相磁路不完全对称，在三相三柱式铁心中不能供给三次谐波磁通的闭合回路	分别在三个铁心柱上套装绕组	中小型三相变压器

(续)

结构型式	磁通分布和矢量图	结构特征	适用范围
单相单柱旁轭式	 左右两个磁路对称相等, 每个框的铁心柱和铁轭的截面相同, 两者的磁通量和磁通矢量相同。铁心柱总截面为旁轭截面的两倍	与单相双柱式铁心结构相比, 可减小铁心片宽度的一半, 故可降低变压器运输高度。在中间铁心柱上套装绕组, 但在旁轭上也可套装调压绕组和励磁绕组	大型单相变压器
三相五柱式	 铁轭截面为铁心柱截面积的 $\frac{1}{\sqrt{3}} \sim \frac{1}{2}$。铁轭中磁通含有高次谐波分量, 并可供给三次谐波磁通的闭合回路	与三相三柱式铁心结构相比, 可满足大型变压器降低铁轭高度的要求。只在中间三个铁心柱上套装绕组	大型三相变压器
三相壳式	 铁心柱和铁轭的截面相同, 两者的磁通分布相同	铁心柱和铁轭的截面都是矩形, 这种铁心结构可降低变压器的运输高度。在中间三个铁心柱上套装绕组, 但要求 B 相铁心柱上的励磁方向与 A 相和 C 相铁心柱上的励磁方向相反	大型三相变压器、电炉变压器和整流变压器
单相卷铁心	 左右两个磁路对称相等, 铁心柱和铁轭的截面相等, 两者的磁通量和磁通矢量相同	铁心柱和铁轭的截面都是矩形, 可采用一种宽度铁心片连续绕制铁心片的接缝可以均匀分布, 能够明显降低空载损耗、空载电流和噪声水平	小型单相变压器

3.1.1 铁心片接缝和铁心片叠积图

变压器铁心采用的冷轧晶粒取向硅钢片具有各向异性特点,即铁心片中磁通方向与硅钢片轧制方向不一致时,铁心损耗明显增大,增大铁心损耗的分析见参考文献[4]。为此铁心片的接缝应采用斜接缝结构以降低铁心损耗。斜接缝铁心片叠积图见图 2·1-13。

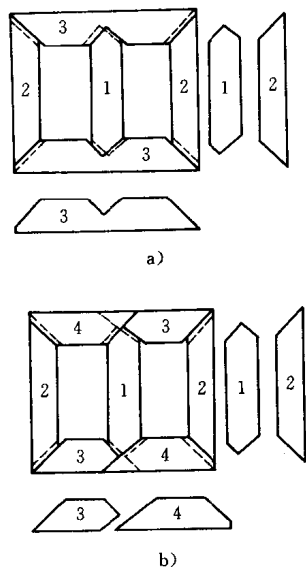


图 2·1-13 斜接缝铁心片叠积图

- a) 三相三柱式不断铁轭片全斜接缝铁心片叠积图
b) 三相三柱式断开铁轭片全斜接缝铁心片叠积图

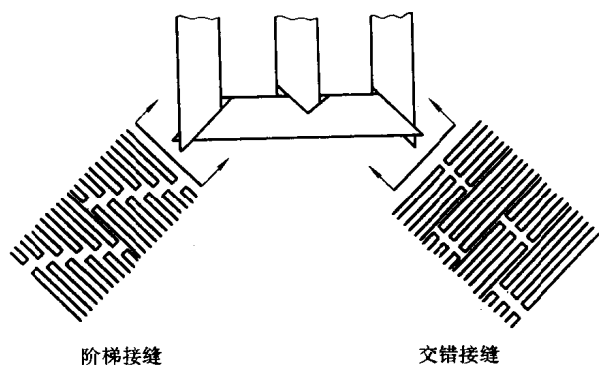


图 2·1-14 交错接缝和阶梯接缝示意图

铁心片接缝处的间隙尺寸极小,但间隙的磁阻极大,迫使铁心片中大部分磁通在接缝间隙处改变方向进入相邻铁心片中去而越过间隙,如此穿越相邻铁心片的磁通称为横向磁通。横向磁通将

使铁心片中局部磁通饱和因而增大局部损耗,这种现象的分析见参考文献[5]。如采用阶梯接缝取代传统交错接缝时,即可消除铁心片中局部损耗增大现象。两种接缝型式见图 2·1-14。

3.1.2 铁心噪声

铁心硅钢片在励磁下的磁致伸缩将使铁心片产生纵向和横向振动,从而构成变压器铁心的噪声源,不论变压器是否有负载电流,只要铁心中有交变磁通,就有铁心噪声,故此噪声也称为空载噪声,是变压器的主要噪声源之一。铁心噪声的基波频率是电源频率的 2 倍。由于铁心中磁通含有谐波分量,所以铁心中噪声含有双倍电源频率的谐波分量,其频率范围约在 100~1000Hz 以内。铁心噪声水平随着变压器容量和铁心中磁通密度的增大而增大。在铁心结构上要保证铁心片不得有任何松动,这是控制铁心噪声水平的必要措施之一。如有特殊需要降低铁心噪声时,降低铁心中的工作磁通密度也是一种措施,但会增加铁心重量。目前已有许多降低铁心噪声的技术措施。

3.1.3 铁心接地

变压器铁心位于变压器内部电场之中,必将具有一定电位。铁心必须接地以防止铁心与接地油箱之间发生击穿或局部放电现象。铁心叠片只允许有一点接地。小型变压器铁心在油箱内部接到油箱上并经油箱接地点接地。大型变压器铁心连接到油箱顶部接地小套管上,通过此接地小套管在油箱壁外侧接地。

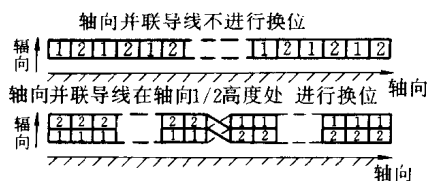
铁心片的绝缘膜能使铁心片彼此互相绝缘以降低涡流损耗。由于绝缘膜极薄,彼此互相绝缘的铁心片通过铁心片之间的电容关系接地。但是当采用绝缘件将铁心叠片隔开以构成铁心冷却油隙时,必须用导体将被绝缘件隔开的铁心叠片连接起来,再经过一点接地。当铁心接地点多于一个以上时,可能因漏磁通链接铁心结构件形成闭合回路而产生循环电流,并造成局部过热。

3.2 绕组

变压器绕组结构型式随着变压器容量和电压等级的不同而有所不同,但无论哪种结构型式都必须保证能够承受住国家标准规定的绝缘耐压水平,并能经受住短路电流试验,还要保证绕组温升控制在国家标准规定的温升限值之内。绕组的各种结构型式、结构特征和实用范围见表 2·1-2。

表 2-1-2 绕组结构型式、特征和适用范围

双层圆筒式

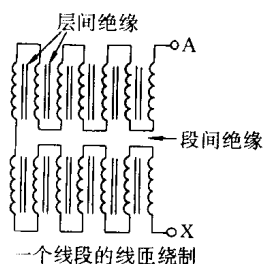


采用扁导线按螺旋线绕制成双层圆筒式线匝，在两层线匝之间放置冷却油隙或层间绝缘。也可以绕成四层圆筒式线匝。并联导线沿轴向排列时不进行换位，沿轴向排列时，要在轴向高度一半处进行换位。绕制工艺较好，但要保证绕组上、下端部支撑结构稳定可靠

适用范围

容量 630kVA 及以下，电压 1kV 及以下的低压绕组

分段圆筒式

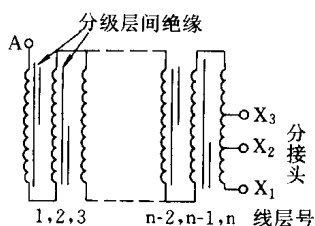


由若干对线饼构成，每一对线饼为两个多层圆筒式结构。采用圆导线绕制，各线饼之间放置纸圈或垫块，每个线饼中的层数总是奇数，以便于各对线饼之间的出头联结。主要特点是层间电压较低，结构复杂，绕制工作量大，散热困难

适用范围

高电压试验变压器或电压互感器

多层圆筒式

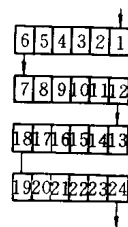


采用圆导线或扁导线绕制，可以绕成若干个线层。在线层之间放置分级层间绝缘或冷却油隙。在绕组内侧的第1线层对地之间的电容较大，使雷电冲击电压的起始分布不均匀，为此当绕组的工作电压为 35kV 及以上时，应在第1线层内侧放置电容屏，以改善冲击电压起始分布

适用范围

容量 630kVA 及以下，电压 15kV 及以下的高压绕组

连续式



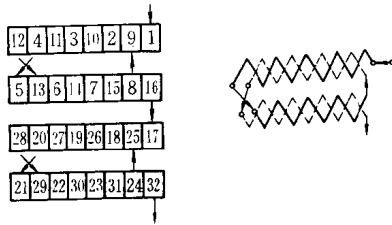
用扁导线绕制，从绕组的第1个线饼开始依次顺序编号。奇数线饼的导线从外侧依次绕至内侧，称为反饼。偶数线饼的导线从内侧依次绕至外侧，称为正饼。一个反饼和一个正饼组成一个单元，所以连续式绕组的线饼数必须是偶数。当线饼的线匝由两根及以上导线并联组成时，并联导线要在反饼内侧和正饼外侧的线饼之间联线处进行换位。两个线饼之间的垫块构成绕组的冷却油隙。连续式绕组的纵向电容较小，雷电冲击电压的电压起始分布不均匀，耐受雷电冲击电压的绝缘强度较低

适用范围

容量 630kVA 及以上，电压 63kV 及以下的高压绕组

(续)

纠结式

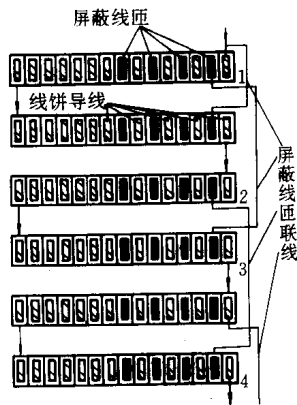


绕制方法与连续式相同,但电气上的单根导线必须用双数根导线并绕。在线饼之间的联线处采用特殊的纠结换位方法,使得线饼内任何相邻线匝之间的电压等于一个线饼的电压,由此提高线饼的纵向电容,从而改善绕组内雷电冲击电压的起始分布。这一特点能满足绕组具有较高绝缘强度的要求。可分别采用各种不同的纠结方式,如纠结连续式(纠结式和连续式混合结构)、插花纠结式、四段纠结式、2根并绕单根纠结式。由于纠结式线饼的匝间电压为一个线饼的电压,所以要加厚匝绝缘

适用范围

容量 6300kVA 及以上,电压 63kV 及以上的高压绕组

内屏蔽式

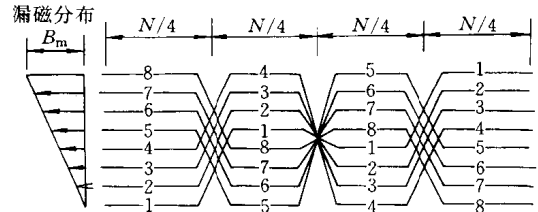


又称电容耦合式绕组,大容量变压器绕组采用的换位导线或组合导线无法绕制成纠结式绕组时采用之。能增大线饼纵向电容的原理同纠结式绕组。在线饼中的屏蔽线匝只起电容耦合作用而没有工作电流通过但有涡流损耗。屏蔽线匝可以跨越两个线饼进行电容耦合,也可以跨越4个或6个线饼进行电容耦合。每个线饼内放置的屏蔽匝数可以任意调节,以适应必要的纵向电容量的要求。但屏蔽线匝末端有一定电位,应妥善加工并处理末端的绝缘

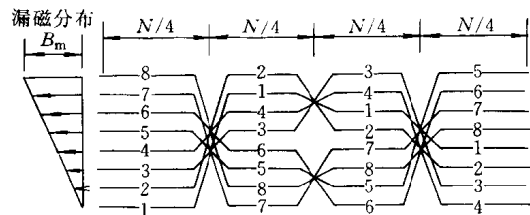
适用范围

电压 110kV 及以上的高压绕组

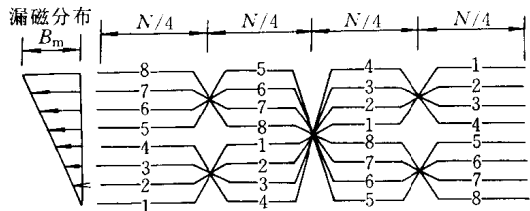
单螺旋式



a)



b)



c)

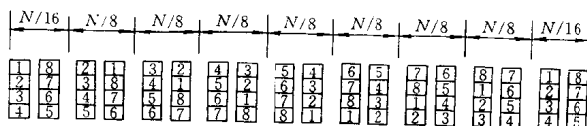
采用多根扁导线并联绕制,每一匝即构成一个线饼,按螺旋线绕制线匝。线匝(即线饼)之间放置垫块构成辐向油隙。并联导线之间的换位方法有三种,即“212”换位(图 a)、“424”换位(图 b)和“242”换位(图 c)。三种换位方法都是在绕组总匝数 N 的近似 $1/4$ 、 $2/4$ 和 $3/4$ 处进行换位,当并联导线的根数为 8 时,能达到完全换位。要求并联导线的根数应为 4 的倍数

适用范围

容量 800kVA 及以上,电压 35kV 及以下的大电流低压绕组

(续)

双螺旋式或四螺旋式

匝数为 $N/8$ 根导线并联双螺旋绕组一次均匀交叉换位

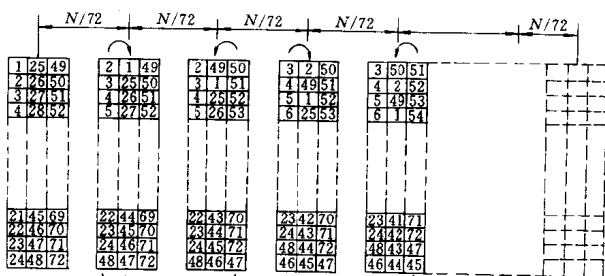
采用多根扁导线并联绕制,每一匝构成两个线饼,按螺旋线绕制线匝。各线饼之间放置垫块构成冷却油隙。采用一次均匀交叉换位方法进行并联导线之间的换位。导线换位次数等于双螺旋绕组并联导线的根数。有时也可以采用2次或3次均匀交叉换位

四螺旋绕组的每一匝构成四个线饼,绕制方法与双螺旋绕组相同,只是按照两个双螺旋并列分别各自进行均匀交叉换位

适用范围

电压 35kV 及以下特大电流的低压绕组

三螺旋式

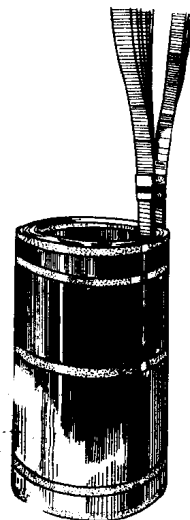
绕组匝数为 N 时, 72根并联导线分成三个单螺旋,每一单螺旋有24根并联导线组成三螺旋式绕组

采用多根扁导线并联绕制,由三个单螺旋并绕而成称之为三螺旋式。每一匝构成三个线饼,各线饼之间放置垫块构成绕组冷却油隙。换位方法相同于双螺旋式换位方法。第一次换位由中间单螺旋与左侧相邻单螺旋之间进行交叉换位。第二次换位由中间单螺旋与右侧相邻单螺旋之间进行交叉换位。按此顺序交替换位,直至完成全部换位为止。为便于换位,应保证每个单螺旋内并联导线的根数为偶数

适用范围

电压 35kV 及以下特大电流的低压绕组

箔式

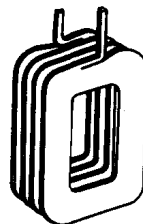


采用铝(铜)箔连续绕制构成箔式绕组。铝(铜)箔的宽度就是绕组的轴向高度。每绕一层铝(铜)箔即构成绕组的一匝。铝(铜)箔的匝绝缘就是绕组的层间绝缘,因此绕组的空间利用系数很高,并且承受短路电流产生轴向电磁力的能力较强,这是箔式绕组的优点。箔式绕组的缺点是引出线焊接工艺复杂

适用范围

容量 2000kVA 及以下, 电压 1kV 及以下的低压绕组

交错式



高压绕组和低压绕组沿轴向互相交错排列称为交错式绕组。交错排列组合可以是1组也可以是多组。交错式绕组能够减小漏磁,因而可以减小电磁力和附加损耗。图 m 为壳式变压器采用的交错式矩形绕组

适用范围

心式铁心的电炉变压器和整流变压器或壳式铁心变压器

3.3 绝缘结构

变压器绝缘结构应能够保证承受住表 2.1-3 和表 2.1-4 中的试验电压水平,还应具有足够的绝缘裕度。变压器在运行中所能承受到的电压有长期运行工频工作电压、瞬态过电压、操作冲击过电压、雷电冲击过电压以及在某些情况下可能承受到的特快瞬变过电压。按照国家标准 GB311.3—83《高电压试验技术第二部分试验程序》的规定,并根据上述变压器所能承受到的各种过电压特性、避雷器保护水平以及变压器绝缘结构本身的特性制订出变压器绝缘应承受住的电压水平。

变压器绝缘结构由外绝缘和内绝缘两部分组成。变压器油箱外部以空气为绝缘介质的绝缘称为外绝缘,如各个绝缘套管带电部分彼此之间和对地之间的绝缘、沿绝缘套管瓷件表面上对地的沿面绝缘等。空气绝缘介质的绝缘强度取决于海拔高度、空气湿度和空气污染程度等大气条件。外绝缘发生击穿以后能够自然恢复绝缘强度,所以外绝缘属于自恢复性绝缘。变压器油箱内部以变压器油(或绝缘气体)和绝缘纸板、绝缘纸为绝缘介质的绝缘结构部分称为内绝缘,这些绝缘介质中的水、气体和杂质的含量决定内绝缘强度。内绝缘发生击穿后一般不能自然恢复绝缘强度。

变压器内绝缘结构又分为全绝缘结构和分级绝缘结构两类:变压器绕组中性点和绕组出线端具有相同绝缘水平时为全绝缘结构,全绝缘结构变压器适用于中性点绝缘的电力系统中;变压器绕组中性点的绝缘水平低于绕组出线端的绝缘水平时为分级绝缘结构,分级绝缘结构变压器适用于中性点有效接地的电力系统中。

我国电压等级为 63kV 及以下(个别地区也有 110kV)采用全绝缘结构,电压等级为 110kV 及以上采用分级绝缘结构。

3.3.1 内绝缘的耐受试验电压水平

变压器内绝缘结构设计应能承受住表 2.1-3 和表 2.1-4 中耐受试验电压水平(不同于 IEC76—3 标准规定水平)。表中数值见国家标准 GB1094.3—85《电力变压器第三部分绝缘水平和绝缘试验》。

系统最高电压 $U_m < 363\text{kV}$ 和 $U_m \geq 363\text{kV}$ 时,变压器绝缘耐压试验方法不相同,不同之处见表 2.1-12 中说明。设计变压器内绝缘结构时应考虑绝缘耐压试验方法中的有关要求。

变压器的 $U_m \geq 252\text{kV}$ 时还应进行局部放电测量,并保证局部放电量低于国家标准 GB1094.3—85 的规定值。

表 2.1-3 变压器内绝缘耐受试验电压水平

电压等级 (kV)	系统最高电压 U_m (kV,有效值)	额定短时工频耐受电压① (kV,有效值)	额定雷电冲击耐受电压 (kV,峰值)		额定操作冲击耐受电压 (相对中性点) (kV,峰值)
			全波	截波	
3	3.5	18	40	45	—
6	6.9	25	60	65	—
10	11.5	35	75	85	—
15	17.5	45	105	115	—
20	23.0	55	125	140	—
35	40.5	85	200	220	—
63	69.0	140	325	360	—
110	126	200	480	530	—
220	252	360	850	935	—
		395	950	1050	—
330	363	460	1050	1175	850
		510	1175	1300	950
500	550	630	1425	1550	1050
		680	1550	1675	1175

① 指相对地的额定短时工频耐受电压,当 $U_m \leq 252\text{kV}$ 时,相间耐受电压等于相对地耐受电压;当 $U_m \geq 363\text{kV}$ 时,相间耐受电压高于此值。可参见国家标准 GB10237—88《电力变压器绝缘水平和绝缘试验——外绝缘的空气间隙》。

表 2.1-4 分级绝缘变压器中性点耐受试验电压水平

电压等级 (kV)	系统最高电压 U_m (kV,有效值)	中性点接地方式	额定短时工频耐受电压 (kV,有效值)	雷电全波冲击耐受电压 (kV,峰值)
110	126	—	95	250
220	252	死接地	85	185
		不死接地	200	400
330	363	死接地	85	180
		不死接地	230	550
500	550	死接地	85	180
		经小电阻接地	140	325

100

新到图书

3.3.2 雷电冲击电压在绕组内的电压分布

雷电冲击电压侵入变压器线端后,沿着全部绕组发生电压瞬变过程,在此瞬变过程中的电压分布关系取决于绕组电容和电感分布参数等效电路(图2·1-15)。

当雷电冲击电压进入绕组起始瞬间即 $t=0$ 时,由图2·1-16中电容分布参数决定起始电压分布。此时绕组内部电位分布关系见图2·1-17,并可用下式表示:

$$u_x = \frac{\sinh \alpha x}{\sinh \alpha} \quad (2 \cdot 1 - 21)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_0}{K_0}}$$

式中 u_x ——绕组长度上任一点 x 的电压,以入波电压峰值的比值表示;

C_0 ——绕组对地总电容;

K_0 ——绕组纵向总电容。

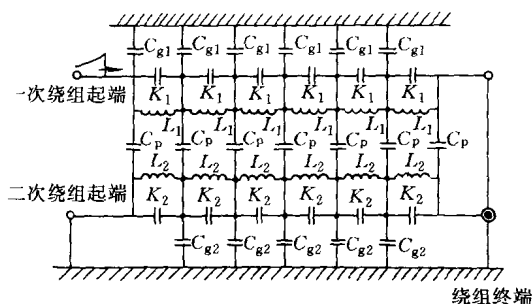


图 2·1-15 绕组电容电感分布参数等效电路

C_{g1} 、 C_{g2} ——一次绕组、二次绕组对地电容 K_1 、 K_2 ——一次绕组、二次绕组纵向电容 L_1 、 L_2 ——一次绕组、二次绕组电感 C_p ——一次绕组与二次绕组之间电容

图2·1-16中示出 α 值与雷电冲击电压在绕组内起始电压分布关系, α 值愈小,起始电压分布愈接近于线性分布,当 $\alpha=0$ 时则成为线性分布。变压器采用纠结式绕组或屏蔽式绕组的目的是为了增大绕组的纵向电容 K_0 ,因而能降低 α 值,使起始电压分布接近于线性分布。雷电冲击电压的瞬变过程就是由电容分布决定起始电压分布(见图2·1-17中曲线a)开始,逐步过渡到由电感分布决定似稳态分布(见图2·1-17中曲线b)的瞬变过程。绕组中任一点P的电位从起始电压分布曲线a上的 E_1 值逐步过渡到似稳态分布曲线b上的 E_2 值。但在过渡过程中由于电容和电感的共同作用而产生振荡,在振荡过程中的某个时间 t 时,P点

电位振荡达到最高电位包络线(图2·1-17中曲线c)上的 E_3 值。 E_3 值有时可能高于入波雷电冲击电压的幅值。图2·1-18中曲线作为一例说明绕组内部电位分布随时间变化($1\mu s$ 至 $11\mu s$)而变化的曲线关系。

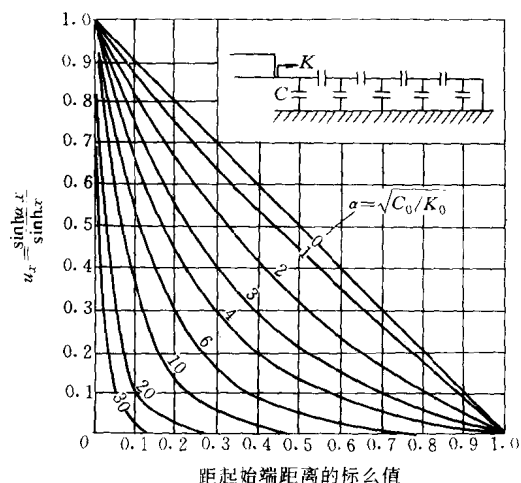


图 2·1-16 起始电压分布 (中性点接地系统)

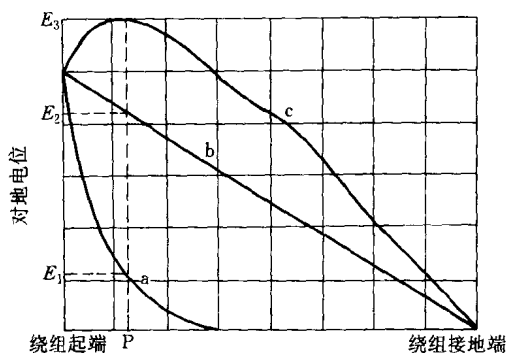


图 2·1-17 绕组内部电位分布关系

a—起始分布 b—似稳态分布 c—最高电位包络线

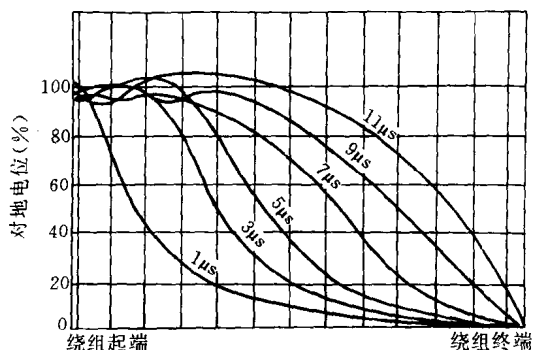


图 2·1-18 绕组内部电位分布随时间变化的示例