



“十三五”普通高等教育本科规划教材

DIANJIXUE XUEXI ZHIDAO YU XITI JIEDA

电机学

学习指导与习题解答

赵君有 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科规划教材

电机学

学习指导与习题解答

主编 赵君有

编写 王秀平 王东瑞

主审 陈世元



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是赵君有主编的“十三五”普通高等教育本科规划教材《电机学》的配套学习指导书,全书按内容提要、基本要求、重点与难点分析及学习指导、典型例题、思考题与习题解答、自测题、补充题等方面加以论述。

本书可作为应用型本科院校电气工程、电力工程与智能控制、电气自动化技术等专业“电机学”课程教材的配套教材,也可以作为工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电机学学习指导与习题解答/赵君有主编. —北京:中国电力出版社,2016.3

“十三五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-5123-8800-0

I. ①电… II. ①赵… III. ①电机学—高等学校—教学参考资料 IV. ①TM3-44

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第012912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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016年3月第一版 2016年3月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 7.75印张 184千字

定价 16.00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

前 言

本书是赵君有主编的“十三五”普通高等教育本科规划教材《电机学》的配套学习指导书，全书按内容提要、基本要求、重点与难点分析及学习指导、典型例题、思考题与习题解答、自测题、补充题等方面加以论述。

本书主要对《电机学》的主要内容、重点和难点进行扼要的分析和总结，让读者把握教材的基本要求、各章的重点及难点，并介绍一些学习的方法。典型例题的分析和思考题与习题的解答，帮助读者加深理解电机的基本概念和基本理论，提高分析和解决电机理论及运行问题的能力。

本书第一章由王东瑞老师编写，第四章由王秀平老师编写，其余部分由赵君有老师编写，全书由赵君有老师统稿。

本书由华南理工大学陈世元教授主审，审阅过程中陈教授提出了许多宝贵的意见和建议，在此表示衷心的感谢。由于编者水平有限，书中不足之处在所难免，欢迎广大读者批评指正。

编者

2015年11月

目 录

前 言	
第一章 变压器的工作原理和运行特性	1
第二章 三相变压器不对称运行和变压器的瞬变过程*	27
第三章 交流绕组及其电动势和基波磁动势	40
第四章 三相异步电动机的工作原理和运行特性	49
第五章 三相同步发电机工作原理和运行特性	68
第六章 同步发电机的三相突然短路和异常运行	90
第七章 直流电机	101
附：期末考试试卷	112

第一章 变压器的工作原理和运行特性

一、内容提要

本章主要介绍变压器的基本工作原理、基本结构,电磁关系,参数的测定方法,标么值的概念及应用,变压器的运行特性,三相变压器的磁路系统、电路系统及电动势波形,变压器的并联运行及其他变压器等内容。

二、基本要求

1. 掌握变压器的基本工作原理(变压原理)、基本结构与额定值。
2. 掌握变压器的电动势、电压和磁通的关系,掌握励磁阻抗的物理意义。
3. 掌握空载变压器空载电流的性质、大小和波形。
4. 熟练掌握变压器的电动势和磁动势平衡方程、相量图和等效电路。
5. 掌握变压器参数的实验测定方法。
6. 掌握标么值的概念与应用。
7. 熟练掌握变压器的电压变化率(调整率)、效率的意义及其计算方法。
8. 掌握三相变压器磁路的特点、连接组标号的判定方法及电路和磁路对电动势波形的影响。
9. 掌握变压器并联运行的理想条件及条件不满足时对变压器的影响。
10. 了解其他变压器的工作原理和特点。

三、重点与难点分析及学习指导

(一) 变压器的基本工作原理和结构

1. 基本工作原理

变压器变压的条件是:① $N_1 \neq N_2$, ② $\frac{d\phi}{dt} \neq 0$, 只需改变一次、二次绕组的匝数,就能达到改变电动势(电压)的目的,匝数多的线圈电动势高于匝数少的线圈电动势。需要强调的是:变压器不能改变频率。

2. 额定值

变压器的额定值有:额定容量 S_N (kVA)、额定电压 U_{1N}/U_{2N} 、额定电流 I_{1N}/I_{2N} 等。需要强调的是:①二次额定电压 U_{2N} 定义为变压器一次加额定电压时,二次空载时的端电压(并非是二次加额定负载时的电压);②对于三相变压器,额定容量指的是三相容量,额定电压和额定电流指的是线电压和线电流。额定值之间的关系为

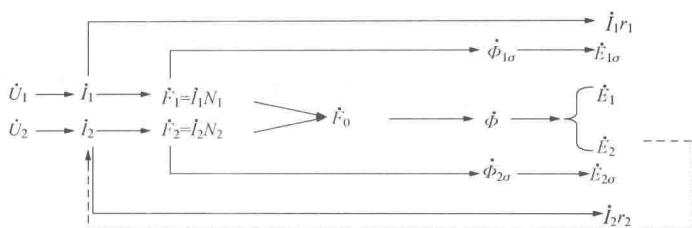
$$\text{单相变压器: } S_N = U_{1N} I_{1N} = U_{2N} I_{2N};$$

$$\text{三相变压器: } S_N = \sqrt{3} U_{1N} I_{1N} = \sqrt{3} U_{2N} I_{2N}$$

(二) 单相变压器的运行

1. 变压器运行时的电磁关系

可用下面图示形式说明变压器的电磁过程



空载时作用在磁路上的磁动势只有一个： $\dot{F}_0 = \dot{I}_0 N_1$ ，负载时磁路上有两个磁动势 $\dot{F}_1 = \dot{I}_1 N_1$ 和 $\dot{F}_2 = \dot{I}_2 N_2$ ，二者共同作用产生主磁通。

对于主、漏磁通要在路径、作用、大小和性质四个方面分析二者的不同点：

(1) 路径：主磁通以铁心为闭合回路，交链两侧绕组；漏磁通以非磁性材料（空气或变压器油等）形成闭合回路，只与一次绕组交链。

(2) 作用：主磁通起传递能量的作用；漏磁通只与各自侧绕组交链，仅起漏抗压降的作用。

(3) 大小：由于铁心的磁阻很小，非磁性材料的磁阻很大，所以主磁通远大于漏磁通。

(4) 性质：由于铁磁材料存在饱和特性，所以 $\phi = f(i_0)$ 是非线性关系；而漏磁通的路径主要由非铁磁材料构成，所以 $\phi_{1\sigma} = f(i_0)$ 呈线性关系。

磁通和其感应电动势之间关系

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} = \sqrt{2} E \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (1-1)$$

有效值：

$$E = 4.44 f N \Phi_m \quad (1-2)$$

相量：

$$\dot{E} = -j 4.44 f N \dot{\Phi}_m \quad (1-3)$$

$e(E)$ 、 N 、 $\dot{\Phi}_m(\Phi_m)$ 相互之间要对应。

①感应电动势与磁通的最大值、磁通频率、线圈匝数有关；②磁通为正弦波形时，电动势也为正弦波形；③在相位上电动势滞后于磁通 90° 。

变压器负载运行时可将漏电动势用漏电抗压降来表示

$$\begin{cases} \dot{E}_{1\sigma} = -j \dot{I}_1 x_1 \\ \dot{E}_{2\sigma} = -j \dot{I}_2 x_2 \end{cases} \quad (1-4)$$

变压器的漏电抗，

$$\begin{cases} x_1 = \omega L_1 = 2\pi f \frac{N_1^2}{R_{m\sigma}} \\ x_2 = \omega L_2 = 2\pi f \frac{N_2^2}{R_{m\sigma}} \end{cases} \quad (1-5)$$

变压器的变比指的是线圈匝数比，即 $k = \frac{N_1}{N_2}$ ，可以近似为额定（相）电压比。

2. 空载电流和空载损耗

变压器的空载电流 \dot{I}_0 包含一个是励磁分量（无功分量） \dot{I}_{0r} ，建立主磁通 $\dot{\Phi}$ ；另一个是

铁损耗分量（有功分量） \dot{I}_{0a} ，用来满足空载损耗。由于通常 $I_{0a} < 10\% I_0$ ，即 $I_0 \approx I_{0r}$ ，因此空载电流也称为励磁电流，基本为感性无功性质。

空载电流大小常用百分值 $I_0\% = \frac{I_0}{I_N} \times 100\%$ ，空载电流的大小主要与电源电压 U_1 、电源频率 f 、一次绕组匝数 N_1 、铁心材质 μ_{Fe} 和磁路的几何尺寸有关。

对单相变压器而言，当磁路不饱和时，主磁通为正弦波，空载电流也是正弦波；当磁路饱和时，主磁通若为正弦波形，空载电流就为尖顶波，反之，当空载电流为正弦波时，主磁通为平顶波。

空载时，由于空载电流很小，一次绕组电阻也小，所以铜损耗很小，空载损耗可近似等于铁损耗，即

$$P_0 \approx p_{Fe}$$

3. 电动势平衡方程

一、二次侧电动势平衡方程

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(r_1 + jx_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \\ \dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2(r_2 + jx_2) = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 \end{cases} \quad (1-6)$$

由于阻抗压降 $\dot{I}_1 Z_1$ ($\dot{I}_2 Z_2$) (一般小于 $5\% U_{1N}$)，忽略可近似认为

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$$

则

$$\Phi_m = \frac{E_1}{4.44 f N_1} \approx \frac{U_1}{4.44 f N_1} \quad (1-7)$$

这是一个非常重要的公式，它表明，变压器主磁通大小主要取决于电源电压 U_1 、电源频率 f 和一次线圈的匝数 N_1 ，与变压器铁心的材质及几何尺寸无关。对于已制成的变压器，当 U_1 、 f 一定时，其主磁通幅值基本不变。

对于电动势 \dot{E}_1 可以看作是空载电流 \dot{I}_0 流过励磁阻抗 $Z_m = r_m + jx_m$ 时所产生的电压降，即

$$\dot{E}_1 = -\dot{I}_0 Z_m = -\dot{I}_0 (r_m + jx_m) \quad (1-8)$$

应特别强调： r_m 既不是铁心的电阻，也不是线圈的电阻，是反映铁损耗的等效电阻，即 $I_0^2 r_m$ 等于铁损耗； Z_m (r_m 、 x_m) 与磁路饱和程度有关，当磁路不饱和时， Z_m (r_m 、 x_m) 是常数，当磁路饱和时，若饱和程度增加，则 Z_m (r_m 、 x_m) 减小。

4. 磁动势平衡方程

负载时，变压器的电压降 $I_1 Z_1$ 还是很小（仅为 $5\% U_{1N}$ 左右），所以仍可略去不计，因此变压器负载运行时仍可认为 $\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1 = \text{常量}$ ，就是说变压器在负载运行时，只要外加电压和频率不变， E_1 就基本保持不变。而 $E_1 \propto \Phi_m$ ，所以 Φ_m 也基本不变，即主磁通的大小基本上不随负载而变动，空载和负载时磁路的主磁通基本相同，则产生主磁通的磁动势就应当相等，可以得到变压器的磁动势平衡方程

$$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_0 \quad (1-9)$$

即

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_0 N_1 \quad (1-10)$$

为了保持主磁通基本不变。 \dot{I}_2 的改变必然同时引起 \dot{I}_1 的改变, 这说明二次侧对一次侧的影响是通过 \dot{F}_2 来完成的。

将 \dot{I}_0 忽略不计, 则式 (1-10) 为 $\dot{I}_1 \approx -\frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2 = -\frac{\dot{I}_2}{k}$, 表明, \dot{I}_1 、 \dot{I}_2 相位上相差接近 180° , 大小关系为

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{N_2}{N_1} \quad (1-11)$$

即, 一、二次侧电流的大小, 近似与它们的匝数成反比, 高压绕组匝数多, 通过的电流小, 而低压绕组匝数少, 通过的电流大。

5. 折算

折算就是一种数学变换。通常是将二次绕组折算到一次绕组, 具体说: 就是用另一个绕组 (匝数为 $N'_2 = N_1$) 等效二次绕组。对于一次绕组来说, 折算后的二次绕组与实际的二次绕组是等效的。

折算的原则: ①折算前后二次磁动势 \dot{F}_2 不变; ②折算前、后功率、损耗保持不变。

折算的方法。折算值与原值 (二次折算到一次) 的关系: ①电动势、电压都乘以变比 k ; ②电流除以变比 k ; ③电阻、电抗、阻抗都乘以变比 k 的平方; ④磁动势、功率、损耗等的值不变。

同理, 也可以将一次各量折算到二次侧。

6. 等效电路和相量图

根据折算后的电动势平衡方程, 可以分别画出变压器的“T”型等效电路如教材图 1-13 所示、近似等效电路如教材图 1-15 所示、简化等效电路如教材图 1-16 所示、对应“T”型等效电路的相量图如教材图 1-14 所示、对应简化等效电路的相量图如教材 1-17 所示。

要求能熟练画出变压器带各种性质 ($\varphi_2 > 0^\circ$ 、 $\varphi_2 = 0^\circ$ 、 $\varphi_2 < 0^\circ$ 、 $\varphi_2 = 90^\circ$ 、 $\varphi_2 = -90^\circ$) 负载时的简化相量图, 并且根据等效电路要能判断出变压器带各种负载和空载时从电网吸收功率的性质。

(三) 参数测定和标么值

1. 参数测定

通过空载和短路实验可以求取变压器参数。

空载实验: 通常在低压侧进行, 高压侧开路, 测量出空载电流 I_0 , 一、二次电压 U_1 、 U_{20} 及空载损耗 P_0 , 求取变比 k 、空载电流百分数 $I_0\%$ 及励磁阻抗 $Z_m = r_m + jx_m$ 。

忽略漏电抗 x_1 和铜损耗 $p_{Cu} = I_0^2 r_1$, 则 $P_0 \approx p_{Fe} = I_0^2 r_m$ 。根据所测数据, 可求参数

$$\begin{cases} Z_m = \frac{U_{1N}}{I_0} \\ r_m = \frac{P_0}{I_0^2} \\ x_m = \sqrt{Z_m^2 - r_m^2} \end{cases} \quad (1-12)$$

①对于三相变压器, U_1 、 I_0 、 P_0 均为每相值; ②由于空载实验是在低压侧进行的, 所以测得的励磁参数是对应低压侧的数值。如果需要折算到高压侧, 应将求取的参数

乘以 k^2 。

短路实验：一般在高压测加电压，将低压测短路。测定出短路电压 U_k 、短路电流 I_k 、短路损耗 P_k ，求出短路参数 r_k 、 x_k 、 Z_k 及短路电压百分数 $U_k\%$ 。

由于短路时所加电压很小，主磁通很小，铁损耗很小，可以忽略，则 $P_k \approx p_{cu} = I_k^2 r_k$ 。根据所测数据，可求参数

$$\begin{cases} Z_k = \frac{U_k}{I_k} = \frac{U_{kN}}{I_{1N}} \\ r_k = \frac{P_k}{I_k^2} = \frac{P_{kN}}{I_{1N}^2} \\ x_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \end{cases} \quad (1-13)$$

强调需要：① P_{kN} 为额定短路损耗，即短路电流 $I_k = I_N$ 时的短路损耗 P_k ；② U_{kN} 为额定短路电压，即短路实验时，短路电流为额定电流时一次侧所加的电压， $U_{kN} = Z_k I_{1N}$ ；③对于三相变压器， U_k (U_{kN})、 I_k 、 P_k (P_{kN}) 均为每相值；④由于短路实验是在高压侧进行的，所以测得的短路参数是对应高压侧的数值。如果需要折算到低压侧，应将求取的参数乘以 $1/k^2$ 。

短路电流为额定值时的短路损耗称为额定短路损耗，即

$$P_{kN} = I_{1N}^2 r_k$$

短路电压百分数

$$U_k\% = \frac{U_{kN}}{U_{1N}} \times 100\% = \frac{I_{1N} Z_k}{U_{1N}} \times 100\% \quad (1-14)$$

短路电压是额定电流在短路阻抗上的压降，所以也称作阻抗电压。它的大小直接反映了短路阻抗的大小，而短路阻抗又直接影响变压器的运行性能。从运行的角度上看，希望 $U_k\%$ 值小一些，可使负载变化时，变压器输出电压的波动小些；但从短路故障的角度来看，则希望 $U_k\%$ 值大些，在变压器发生短路故障时，使短路电流小一些。

2. 标么值

标么值就是相对值，即

$$\text{标么值} = \frac{\text{实际值}}{\text{基准值}}$$

在电机中，通常取实际值的额定值作为基准值。

利用标么值计算时应注意下面几点：①额定值的标么值等于1；②百分值=标么值 \times 100%；③标么值无单位；④折算前、后的标么值相等，例： $r_2^* = r_2'^*$ ；⑤标么值的计算法则与实际值的计算法则相同；⑥线值的标么值等于相值的标么值，三相功率的标么值等于单相功率的标么值。

常用的一些公式

$$\begin{cases} Z_m^* = \frac{U_{1N}^*}{I_0^*} = \frac{1}{I_0^*} \\ r_m^* = \frac{P_0^*}{I_0^{*2}} = \frac{P_0/S_N}{I_0^{*2}} \end{cases} \quad (1-15)$$

$$\begin{cases} Z_k^* = U_{kN}^* \\ r_k^* = P_{kN}^* = \frac{P_{kN}}{S_N} \end{cases} \quad (1-16)$$

(四) 变压器的运行特性

1. 电压变化率 (调整率)

定义式

$$\Delta U = \frac{U_{2N} - U_2}{U_{2N}} \quad (1-17)$$

表达式

$$\Delta U = \beta(r_k^* \cos\varphi_2 + x_k^* \sin\varphi_2) \quad (1-18)$$

β 为负载系数, 反映负载大小, $\beta = \frac{I_1}{I_{1N}} = \frac{I_2}{I_{2N}} \approx \frac{S_2}{S_N}$; φ_2 为负载的功率因数角, 阻性负载时, $\varphi_2 = 0$; 感性负载时 φ_2 取正值; 容性负载时 φ_2 取负值。

电压变化率表达式说明, 变压器的电压变化率的大小与负载的大小 (β)、负载的性质 (φ_2) 及短路阻抗 (r_k^* 、 x_k^*) 有关。

当变压器带阻性 ($\varphi_2 = 0$)、感性 ($\varphi_2 > 0$) 和电感 ($\varphi_2 = 90^\circ$) 负载时, 电压变化率 ΔU 为正值, 随着负载电流 I_2 大小的增加, 端电压 U_2 下降。当变压器带容性 ($\varphi_2 < 0$) 负载时, ①若 $r_k^* \cos\varphi_2 = |x_k^* \sin\varphi_2|$, 则 $\Delta U = 0$, $U_2 = U_{2N}$; ②一般情况下, $r_k^* \cos\varphi_2 < |x_k^* \sin\varphi_2|$, 则 $\Delta U < 0$, 端电压 U_2 随负载电流 I_2 增加而上升。特别注意的是: 只有变压器带容性负载时才会出现 $U_2 = U_{2N}$ 。

电压变化率 ΔU 是变压器的主要性能指标, 它反映了输出电压的稳定性, 一定程度上反映了电能的质量。计算出电压变化率, 可得到输出电压

$$U_2 = (1 - \Delta U)U_{2N}$$

2. 效率

变压器的效率

$$\eta = \left(1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_{kN}}{\beta S_N \cos\varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{kN}}\right) \times 100\% \quad (1-19)$$

对于给定的变压器, P_0 和 P_{kN} 是一定的, 当负载功率因数 $\cos\varphi_2$ 一定时, 效率只与负载系数 β 有关。

变压器的最大效率出现在不变损耗 (铁损耗) 等于可变损耗 (铜损耗) 时, 此时

$$P_0 = \beta^2 P_{kN} \quad (1-20)$$

获得最大效率时的负载系数 β_m

$$\beta_m = \sqrt{\frac{P_0}{P_{kN}}} \quad (1-21)$$

最大效率

$$\eta_m = \left(1 - \frac{2P_0}{\beta_m S_N \cos\varphi_2 + 2P_0}\right) \times 100\% \quad (1-22)$$

一般电力变压器通常设计成 $\frac{P_0}{P_{kN}} = \frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$, 即最大效率发生在 $\beta_m = 0.6 \sim 0.7$, 而不是在额定运行时。

(五) 三相变压器

1. 三相变压器的磁路系统

根据磁路形式不同,三相变压器分成组式和心式两大类。组式变压器三相磁路各自独立,彼此互不相关。当一次绕组施以对称三相电压时,各相主磁通必然对称,各相空载电流也是对称的;而三相心式变压器三相磁路互相关联。由于三相磁路长度不相等,中间B相最短,两边的A、C相比较长,所以三相磁阻不相等。当外施对称三相电压时,三相空载电流不相等,B相最小,但由于变压器的空载电流很小,因而三相心式变压器空载电流的不对称对变压器负载运行的影响很小,可不予考虑。两种变压器的磁路形式见教材图1-25和图1-26所示

2. 三相变压器的电路系统

在三相变压器中,绕组的联结主要采用星形和三角形两种方法。为表明联结方法,对绕组的首端和末端标志规定如教材表1-2所示。

变压器的高、低压侧绕组的联结方法不同、端头标志不同,高、低压侧绕组中对应的(线)电动势具有不同的相位差。因此按高、低压侧绕组(线)电动势的相位关系,把绕组的联结法分成各种不同的组合,称为绕组的联结组标号。

(1) 对于单相变压器,当同名端同标志时,高、低压侧电动势同相位,用 $Ii0$ 表示;当同名端异标志时,高、低压侧电动势反相位,用 $Ii6$ 表示。

(2) 对于三相变压器,确定联结组标号的方法有:线电压法和线电压重心重合法。

利用线电压法确定联结组标号的步骤如下:①按规定绕组的出线端标志联结成所规定的联结法。②画出高压侧电压或电动势的相量图,确定某一线电压(如 \dot{U}_{AB} 相量)或线电动势的方向。③确定高、低压侧绕组对应的相电压或相电动势的相位关系(同相位或反相位),画出低压侧的电压或电动势相量图,确定对应的线电压(如 \dot{U}_{ab} 相量)或线电动势相量的方向。为方便比较,将高、低压侧的电压或电动势相量图画在一起,取A与a点重合。④根据高、低压侧对应线电压或线电动势的相位关系确定联结组标号——以高压侧线电压(如 \dot{U}_{AB} 相量)或线电动势相量作为钟表上的分针,始终指向“12”,以低压侧线电压(如 \dot{U}_{ab} 相量)或电动势相量作为时针,它所指的数字即表示高、低压侧线电压或电动势相量间的相位差,这个数字称为三相变压器联结组标号。

应特别注意的是:画相量图时,三三相的相序关系不能错误,时刻保持A相超前B相 120° ,B相超前C相 120° ,即A、B、C相量的位置为顺时针方向。

利用线电压重心重合法确定联结组标号的步骤如下:

画出高、低压绕组的三相电压相量图,将高、低压绕组线电压三角形的重心重合在一起,由该重心分别向高低压同一相的对应线端连线,即由重心联到A和a,XA表示时钟的分针,xa表示时钟的时针,这时时针所显示的小时数即为联接组标号。

3. 三相变压器的磁路和电路系统对电动势波形的影响

对于YNy和Dy接线的变压器,由于一次侧能提供三次谐波电流通路, $i_{03} \neq 0$,励磁电流 i_0 为尖顶波,它产生的主磁通和电动势均为正弦波。

对于Yd接线的变压器,二次侧可以提供三次谐波电流通路,所以主磁通和电动势也为正弦波。

对于 Yy 或 Yyn 接线的变压器, 由于不能提供三次谐波电流通路, 因此励磁电流为正弦波。若是三相组式变压器, 主磁通是平顶波, 电动势为尖顶波, 所以不被采用; 若是心式变压器, 由于磁路的原因, 三次谐波磁通不能在铁心中通过, 使三次谐波磁通很小, 感应的三次谐波电动势也很小, 所以电动势波形基本为正弦波, 但由于谐波磁通会在其他部件上产生附加损耗, 引起局部过热, 降低变压器的效率, 所以大于 1800kVA 的变压器也不采用 Yy 或 Yyn 接线。

三相变压器中只要有一侧是三角形接线就能改善电动势的波形。

(六) 变压器的并联运行

1. 并联条件

为了保证并联运行的变压器在空载时不产生环流, 负载时负载大小按变压器容量进行分配, 使设备得以充分利用, 变压器并联运行时应满足以下条件: ①变化相同, 即一、二次侧额定电压分别相等; ②变压器的联结组标号相同; ③阻抗电压相等或短路阻抗标么值相等, 且短路阻抗角也相同。

2. 条件不满足时对变压器的影响

(1) 变比不同。空载状态时, 两台变压器之间产生环流; 负载时, 负载分配不合理: 若变比取 $k = N_1/N_2 > 1$, 则变比小的变压器分担的负载多, 变比大的变压器分担的负载少。环流不是负载电流, 但它却占据了变压器的容量, 增加了变压器的损耗和温升。

(2) 联结组标号不同。由于变压器短路阻抗很小, 所以联结组标号不同的变压器并联运行时, 将产生很大的环流, 其数值会超过额定电流很多倍, 这是绝对不允许的, 所以联结组标号不同的变压器严禁并联运行。

(3) 短路阻抗标么值不相等。两台变压器的短路阻抗标么值不相等时并联运行, 各台变压器所分配的负载与短路阻抗的标么值成反比。短路阻抗标么值大的变压器分担的负载小, 短路阻抗标么值小的变压器分担的负载大。

当短路阻抗角相等时, 两台变压器的负载电流可以同相位, 当短路阻抗角不相等时, 两台变压器的负载电流不同相位, 在负载电流一定的条件下, 后一情况时, 两台变压器的电流大, 造成变压器的损耗大。

(七) 其他变压器简介

1. 三绕组变压器

三绕组变压器主要应用于发电厂或变电站中, 用来把三个不同电压等级的电网联系起来。

高压、中压、低压绕组额定容量的分配比例 (容量配合) 有三种: 100/100/100、100/100/50、100/50/100, 以其中最大的绕组容量作为变压器的额定容量。

通常将同时交链高、中、低三个绕组的磁通称为主磁通, 只交链一个绕组的磁通称为自漏磁通, 同时交链两个绕组的磁通称为互漏磁通。等效电路中的电抗 x_1 、 x'_2 、 x'_3 所对应的磁通既包含自漏磁通, 又包含互漏磁通, 它们不是漏电抗, 称为等效电抗。

2. 自耦变压器

自耦变压器的特点是一、二次绕组之间不仅有磁的耦合, 还有电的联系。因此自耦变压器中, 有一部分功率并非通过电磁感应作用传递, 而是直接由一次绕组传导到二次绕组中去的, 这是一般双绕组变压器所没有的。

3. 分裂变压器

分裂变压器特点是将其中一个绕组分裂成在电路上彼此不相连而在磁路上只有松散耦合的几个绕组的变压器。分裂绕组之间具有较大的阻抗,在现代大型电厂中,有的采用两台发电机共用一台分裂变压器来输出电能,有的高压厂用变压器采用分裂变压器向双母线供电,当一段母线发行故障时,另一段母线仍有较高的电压,提高了供电的可靠性。

分裂变压器的运行方式有分裂运行、穿越运行和半穿越运行。

4. 仪用互感器

电压互感器实质上是二次开路的降压变压器,使用时并联在电路中,二次侧不能短路。

电流互感器实质上是二次短路的升压变压器,使用时串联在电路中,二次侧不能开路。

四、典型例题

一台三相变压器, $S_N = 5600 \text{ kVA}$, $U_{1N}/U_{2N} = 10/6.3 \text{ kV}$, Yd 联结,在低压侧加额定电压 U_{2N} 做空载实验,测得 $P_0 = 6.72 \text{ kW}$;在高压侧做短路实验,短路电流 $I_k = I_{1N}$, $P_{kN} = 17.92 \text{ kW}$, $U_k = 550 \text{ V}$,试求:

(1) 短路电阻和短路电抗的标么值;

(2) 带额定负载运行,负载功率因数 $\cos\varphi_2 = 0.8$ (滞后) 时的电压调整率和二次端电压;

(3) 带额定负载运行,负载功率因数 $\cos\varphi_2 = 0.9$ (滞后) 时的效率和最大效率;

(4) 最大效率时的负载大小。

解: (1) 短路参数标么值

$$Z_k^* = \frac{U_k}{U_{1N}} = \frac{550}{10 \times 10^3} = 0.055$$

$$r_k^* = \frac{P_{kN}}{S_N} = \frac{17.92 \times 10^3}{5600 \times 10^3} = 0.0032$$

$$x_k^* = \sqrt{Z_k^{*2} - r_k^{*2}} = \sqrt{0.055^2 - 0.0032^2} = 0.0549$$

(2) 电压调整率和二次端电压

$$\Delta U = \beta(r_k^* \cos\varphi_2 + x_k^* \sin\varphi_2) = 1 \times (0.0032 \times 0.8 + 0.0549 \times 0.6) = 0.0355$$

$$U_2 = (1 - \Delta U)U_{2N} = (1 - 0.0355) \times 6.3 \times 10^3 = 6076.35 \text{ (V)}$$

(3) 额定效率

$$\begin{aligned} \eta_N &= \frac{\beta S_N \cos\varphi_2}{\beta S_N \cos\varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{kN}} \times 100\% \\ &= \frac{1 \times 5600 \times 0.9}{1 \times 5600 \times 0.9 + 6.72 + 1^2 \times 17.92} \times 100\% \\ &= 99.513\% \end{aligned}$$

最大效率时的负载系数

$$\beta_m = \sqrt{\frac{P_0}{P_{kN}}} = \sqrt{\frac{6.72}{17.92}} = 0.61237$$

最大效率

$$\eta_m = \frac{\beta_m S_N \cos\varphi_2}{\beta_m S_N \cos\varphi_2 + 2P_0} \times 100\%$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{0.612\ 37 \times 5600 \times 0.9}{0.612\ 37 \times 5600 \times 0.9 + 2 \times 6.72} \times 100\% \\
 &= 99.57\%
 \end{aligned}$$

(4) 最大效率时的负载大小

$$I_2 = \beta_m I_{2N} = \beta \times \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = 0.612\ 37 \times \frac{5600}{\sqrt{3} \times 6.3} = 314.268(\text{A})$$

五、思考题与习题解答

1-1 变压器是根据什么原理进行变压的？它的主要用途有哪些？

答：变压器是基于电磁感应原理进行变压的，主要用作能量传递和信号传递。

1-2 变压器铁心的作用是什么？为什么铁心要用硅钢片叠成？用铸铁做铁心行不行？不用铁心行不行？

答：变压器铁心的作用是构成磁路，用来导磁。用硅用钢片叠成是为了降低铁心损耗。不能用铸铁做铁心，否则铁心损耗很大，变压器的效率很低。如果不用铁心，变压器的电流就非常大，会烧毁变压器。

1-3 变压器一次绕组若接在直流电源上，二次侧会有稳定的直流电压吗？为什么？

答：不能。根据变压器变压的条件：① $N_1 \neq N_2$ ；② $\frac{d\phi}{dt} \neq 0$ ，在加电源瞬间由于磁通存在变化量，能在线圈中感应电动势，此瞬间有电压输出。当电源稳定后，由于 $\frac{d\phi}{dt} = 0$ ，线圈中不会感应电动势，所以不能改变直流电压。

另外，如加上和额定交流电压相同的直流电压，由于电感对直流相当于短路，故此时只有绕组电阻限制电流，电流将很大，并将烧毁变压器。

1-4 变压器有哪些主要额定值？二次额定电压的含义是什么？

答：变压器的额定值有：

(1) 额定容量 S_N ：是指额定工作状态下变压器所输出的视在功率。

(2) 额定电压 U_{1N} 、 U_{2N} ：是指变压器长时间运行时所能承受的工作电压。 U_{1N} 是指规定加到变压器一次侧的电源电压值。 U_{2N} 是指当一次侧加额定电压，二次侧空载时的端电压值。

(3) 额定电流 I_{1N} 、 I_{2N} ：是指变压器在额定容量下，允许长期通过的电流。

1-5 变压器中主磁通和一、二次绕组漏磁通的性质和作用有什么不同？它们各由什么磁动势产生的？在等效电路中如何反映它们的作用？

答：性质：由于主磁通的闭合路径是铁心，磁路的磁阻不是常数，所以 $\phi = f(i_0)$ 为非线性，而漏磁通的闭合路径是空气或变压器油，磁路的磁阻是常数，所以 $\phi_{1\sigma} = f(i_0)$ 为线性。

作用：主磁通起传递能量的作用，漏磁通只能在线圈中感应电动势，起电抗压降作用。

在分析变压器时，用主电势 E_1 来反映主磁通的作用， $\dot{E}_1 = \dot{I}_0 (r_m + jx_m)$ ， r_m 是反映主磁通在铁心中产生的铁损耗的等效电阻，即 $I_0^2 r_m = P_{Fe}$ ， x_m 反映主磁通在一次绕组中感应电动势的大小；用电抗压降来反映漏磁通的作用，即漏磁通在绕组中感应的漏电动势 $\dot{E}_{1\sigma} = -j\dot{I}_0 x_1$ (空载时) 或 $\dot{E}_{1\sigma} = -j\dot{I}_1 x_1$ (负载时)。

1-6 为了在单相变压器一、二次侧得到正弦波感应电动势，当铁心不饱和时励磁电流

应呈什么波形？当铁心饱和时励磁电流应呈什么波形？

答：当磁路不饱和时，空载电流与主磁通之间为线性关系，为了得到正弦波感应电动势，主磁通应为正弦波，所以需要空载电流为正弦波。

当磁路饱和后，空载电流与主磁通之间为非线性关系，为了得到正弦波感应电动势，主磁通应为正弦波，所以需要空载电流为尖顶波。

1-7 变压器运行时电源电压降低，试分析对铁心饱和程度、励磁电流、励磁阻抗、铁损耗及漏抗和变比的影响？

答：根据 $\Phi_m = \frac{U_1}{4.44fN_1}$ 可知，电源电压降低，主磁通 Φ_m 将减小，磁密 $B_m = \frac{\Phi_m}{S}$ ，因 S 不变， B_m 将随 Φ_m 的减小而减小，铁心饱和程度降低，磁导率 μ 增大。因为磁阻 $R_m = \frac{l}{\mu S}$ ，所以磁阻减小。根据磁路欧姆定律 $I_0 N_1 = \Phi_m R_m$ ，磁动势 F_0 将减小，当线圈匝数不变时，励磁电流减小。

又由于铁心损耗 $p_{Fe} \propto B_m^2 f^{1.3}$ ，所以铁心损耗减小。

由于主磁通 Φ_m 减小，空载电流 I_0 减小， $Z_m = \frac{E_1}{I_0} \propto \frac{\Phi_m}{I_0}$ ，由于磁路饱和后，电流减小得比磁通减小的多，所以励磁阻抗 Z_m 增加。

增加漏抗 $x_1 = 2\pi f \frac{N_1^2}{R_{m\sigma}}$ 与 U_1 无关，所以不变化。

变比 $k = \frac{N_1}{N_2}$ 不变。

1-8 变压器的外加电压不变，若减少一次绕组的匝数，则变压器铁心的饱和程度、空载电流、励磁阻抗、铁心损耗、变比、漏抗和一、二次侧的电动势各有何变化？

答：当变压器的外加电压不变，若减少一次绕组的匝数，根据 $\Phi_m = \frac{U_1}{4.44fN_1}$ ，则主磁通 Φ_m 增加，磁密 $B_m = \frac{\Phi_m}{S}$ ，因 S 不变， B_m 将随 Φ_m 的增加而增加，所以铁心饱和程度增加。

主磁通 Φ_m 增加，磁导率 μ 下降，磁阻 $R_m = \frac{l}{\mu S}$ 增大。根据磁路欧姆定律 $I_0 N_1 = \Phi_m R_m$ ，所以当线圈匝数减少时，空载电流 I_0 增加。

由于主磁通 Φ_m 增加，空载电流 I_0 增加， $Z_m = \frac{E_1}{I_0} \propto \frac{\Phi_m}{I_0}$ ，由于磁路饱和后，电流增加得比磁通增加的多，所以励磁阻抗 Z_m 减小。

由于 $B_m = \frac{\Phi_m}{S}$ 增加，铁损耗 $P_{Fe} \propto B_m^2$ ，所以铁损耗 P_{Fe} 增加。

变比 $k = \frac{N_1}{N_2}$ 减小。

$x_1 = 2\pi f \frac{N_1^2}{R_{m\sigma}}$ ，由于漏磁通的路径是空气或油，磁路的磁阻 $R_{m\sigma}$ 是常数，所以漏抗 x_1 减小。

忽略漏阻抗压降的影响，一次电动势 $E_1 \approx U_1$ 基本不变。

$E_2 = 4.44fN_2\Phi_m$ ， E_2 随着 Φ_m 的增加而增加。

1-9 一台单相变压器一次侧加额定电压，比较下列三种情况下主磁通的大小（考虑漏

阻抗压降影响):

(1) 空载; (2) 带额定的感性负载; (3) 二次绕组短路。

答: 空载、负载、短路时各物理量为下标 0、1、k 表示

主磁通的大小 (考虑漏阻抗压降影响) 为

$$\Phi_m = \frac{E_1}{4.44fN_1}$$

由于 $I_0 < I_1 < I_k$, 有 $I_0 Z_1 < I_1 Z_1 < I_k Z_1$, 因此 $E_{10} > E_{11} > E_{1k}$, 所以 $\Phi_{m0} > \Phi_{m1} > \Phi_{mk}$ 。

1-10 变压器其他条件不变, 在下列情况下, 漏抗 x_1 、励磁电抗 x_m 各有何变化?

(1) 一次绕组匝数增加 10%; (2) 一次侧电压下降 10%; (3) 频率减小 5%。

答: 由于 $x_1 = 2\pi f \frac{N_1^2}{R_m}$, 所以一次绕组匝数增加 10% 时, x_1 增加; 一次侧电压下降 10%; x_1 不变; 频率减小 5%, x_1 减小。

一次绕组匝数增加 10%, 主磁通增大, 磁路饱和程度增加, x_m 减小; 一次侧电压下降 10%, 主磁通减小, 磁路饱和程度下降, x_m 增大; 频率减小 5%, 主磁通增大, 磁路饱和程度增加, x_m 减小。

1-11 一台额定频率为 50Hz、一次侧额定电压为 U_{1N} 的单相变压器, 若在一次侧加上频率为 60Hz、大小为 $1.2U_{1N}$ 的电源, 请问此时与变压器额定运行时相比空载电流 I_0 、励磁电抗 x_m 、漏抗 x_1 和 x_2 及铁损耗 p_{Fe} 如何变化? 若将一次侧接在频率为 60Hz、大小为 U_{1N} 的电源上, 与额定运行时相比上述各量又如何变化?

答: 变压器接频率为 50Hz、一次侧额定电压为 U_{1N} 时, 主磁通 $\Phi_m = \frac{U_{1N}}{4.44fN_1} = \frac{U_{1N}}{4.44 \times 50N_1}$, 一次侧加上频率为 60Hz、大小为 $1.2U_{1N}$ 的电源时, 主磁通 $\Phi'_m = \frac{1.2U_{1N}}{4.44fN_1} = \frac{1.2U_{1N}}{4.44 \times 60N_1} = \Phi_m$, 即主磁通不变, 所以空载电流 I_0 不变, 但由于频率 f 增加, 所以励磁电抗 x_m 、漏抗 x_1 和 x_2 及铁损耗 p_{Fe} 都增加。

若将一次侧接在频率为 60Hz、大小为 U_{1N} 的电源上, $\Phi'_m = \frac{U_{1N}}{4.44fN_1} = \frac{U_{1N}}{4.44 \times 60N_1} < \Phi_m$, 则主磁通减少, 磁路饱和程度下降, 所以空载电流 I_0 和磁感应强度 B_m 减小, x_m 增大; 由于频率增大, 所以漏抗 x_1 和 x_2 增加; 由于频率增大, 所以 $p_{Fe} \propto B_m^2 f^{1.3}$ 减小。

1-12 一台 220/110V 的单相变压器, 变比 $k=2$, 能否一次绕组用 2 匝, 二次绕组用 1 匝, 为什么?

答: 不能。由 $U_1 \approx E_1 = 4.44fN_1\Phi_m$ 可知, 由于匝数太少, 主磁通 Φ_m 将剧增, 磁密 B_m 过大, 磁路过于饱和, 磁导率 μ 降低, 磁阻 R_m 增大。于是, 根据磁路欧姆定律 $I_0 N_1 = R_m \Phi_m$ 可知, 产生该磁通的励磁电流 I_0 必将大增。再由 $p_{Fe} \propto B_m^2 f^{1.3}$ 可知, 磁密 B_m 过大, 导致铁耗 p_{Fe} 大增, 铜损耗 $I_0^2 r_1$ 也显著增大, 变压器发热严重, 可能损坏变压器。

1-13 一台额定电压为 220/110V 的变压器, 若误将低压侧接到 220V 的交流电源上, 将会产生什么样的后果?

答: 当低压侧加 110V 电压时, 主磁通为 $\Phi_m = \frac{110}{4.44fN_1}$; 若误将低压侧接到 220V 的交