

实用电工计算丛书

变压器计算



天津科学技术出版社

实用电工计算丛书

变 压 器 计 算

陈琴生 编译

天津科学技术出版社出版

天津市赤峰道130号

天津新华印刷四厂印刷

新华书店天津发行所发行

开本787×1092毫米 1/32 印张6.125 字数145 000

1988年7月第1版

1988年7月第1次印刷

印数：1—13 700

ISBN 7-5308-0238-0/TM·4 定价：1.95元

前 言

随着我国经济体制改革的逐步深入，社会主义现代化建设的不断发展，面临一个重要问题，就是人才不足，人员素质不高。笔者根据多年实践经验和从事电工业余教育的体会，深感当前各工厂企业的青年电工和初级技术人员计算能力明显不足。在掌握一定理论基础之后，计算能力是解决实际问题的关键。为此，笔者选译了日本有关电气技术刊物上的各类计算题，编成这套《实用电工计算》丛书，包括《电工基础计算》《电动机计算》《变压器计算》《电力应用计算》和《输配电计算》等五个分册。为了使具有中等文化程度的读者易于看懂，学了会用，书中尽量不涉及高等数学，着重概念分析和计算方法，通过例题说明理论应用。

《变压器计算》主要介绍变压器的各项参数，并联运行与负荷分配，日效率与电源频率对变压器特性的影响，变压器与电容器的容量配置，单线圈（自耦）与三线圈变压器，以及V形接线等计算方法。同时对小型变压器的设计计算也作了简要介绍。

由于笔者水平有限，错误和疏漏之处在所难免，请广大读者给予指正。

陈琴生

1987年4月

目 录

1. 变压器的阻抗电压及阻抗电压百分数·····	(1)
2. 变压器的并联运行和负荷分配的计算·····	(11)
3. 变压器并联运行时的输出限值的计算·····	(21)
4. 变压器的日效率计算·····	(29)
5. 由电源频率变化引起的变压器特性变化的 计算·····	(41)
6. 变压器容量和电容器容量的计算·····	(54)
7. 三线圈变压器的各种计算·····	(67)
8. 变压器的电压变动率计算·····	(81)
9. 变压器的实际效率和损耗计算·····	(89)
10. 按照损耗比计算变压器在不同负荷下的效率 变化·····	(99)
11. 变压器的接线和输出容量的计算·····	(109)
12. 单线圈变压器用作升压器的计算·····	(123)
13. 单线圈变压器的接线和容量计算·····	(133)
14. V形接线变压器的容量计算·····	(146)
15. 小型空气自冷式单相变压器的简单计算·····	(157)
16. 三相油浸电力变压器线圈重绕计算·····	(173)

1 变压器的阻抗电压及阻抗电压百分数

一、阻抗电压的重要性

变压器的阻抗电压数值乃是变压器特性中最重要的参数之一，它对诸如电压变动率，损耗比（空载损耗和短路损耗之比），系统的短路容量，短路时作用于线圈的机械力及并联运行等都有很大的影响，因此，对它应该有一个充分的认识。同时，要注意到一台变压器的阻抗电压的大小，与变压器的额定电压、线圈的形状等有直接的关系。

一般情况下，阻抗电压小的变压器，用铁量增加，铜损减少，总重量（铁重+铜重）有增加的趋向；而阻抗电压大的变压器，用铜量增加，铜损耗增加，总重量减少。

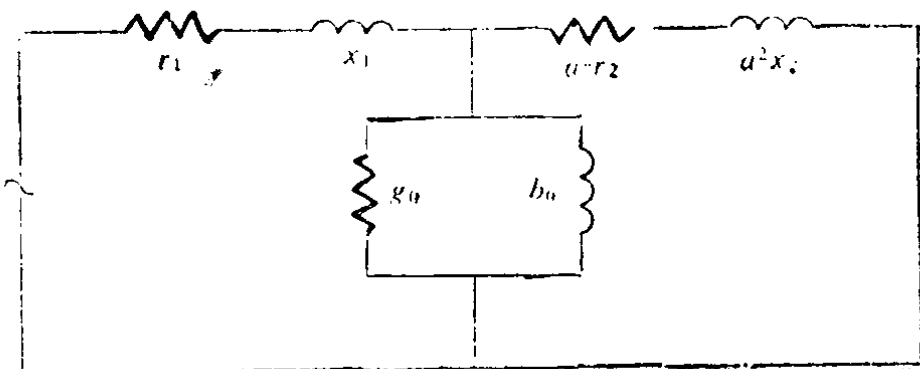


图1-1

二、阻抗电压及阻抗电压百分数 (u_K 及 $u_K\%$)

变压器的阻抗电压是指在二次侧短路（通常是指低压

侧)，在一次侧施加额定频率的低电压，当二次侧流过额定电流时，一次侧的加压值。试验时的等值电路可画成图1-1所示形式。在图1-1中，励磁回路阻抗很大，可略而不计。一次电压、电流以 U_1, I_1 表示，二次电压、电流以 U_2, I_2 表示，匝数比为 a ，则换算至一次侧的阻抗可 $\dot{Z}$ 写成

$$\dot{Z} = (r_1 + a^2 r_2) + j(x_1 + a^2 x_2) \quad (1-1)$$

式中，由于流过 r 及 x 的电流相同，所以实数项是指电阻电压降 IR ，虚数项是指电抗电压降 IX 。将二次侧折合到一次侧，相对于一次电流的上述二部分的电压降可分别写成

$$IR = I_1 (r_1 + a^2 r_2) \quad (1-2)$$

$$IX = I_1 (x_1 + a^2 x_2) \quad (1-3)$$

上列二项电压降若分别用一次额定电压的百分数来表示时，则将前者称为电阻电压百分数($u_R\%$)，而后者称为电抗电压百分数($u_X\%$)。它们分别写成

$$u_R\% = \frac{IR}{U_1} \times 100 = \frac{I_1 (r_1 + a^2 r_2)}{U_1} \times 100 \quad (1-4)$$

$$u_X\% = \frac{IX}{U_1} \times 100 = \frac{I_1 (x_1 + a^2 x_2)}{U_1} \times 100 \quad (1-5)$$

此外，阻抗电压的百分数 $u_i\%$ 是等于电阻电压百分数 $u_R\%$ 和电抗电压百分数 $u_X\%$ 的向量和，所以

$$u_i\% = Iz\% = \sqrt{(IR\%)^2 + (IX\%)^2} \quad (1-6)$$

【例题 1】 有一台容量为 5 千伏安，一，二次侧电压为 3150 伏及 210 伏的变压器。一次阻抗为 $\dot{Z}_1 = 34 + j20$ 欧，二次阻抗 $\dot{Z}_2 = 0.12 + j0.1$ 欧。求 $IR\%$ ， $IX\%$ 及 $Iz\%$ 。

解 为了将二次阻抗换算到一次侧, 所以要先求出一次电流及一、二次匝数比。据题意

$$I_1 = \frac{5 \times 10^3}{3150} = 1.587 \text{ [A]}$$

$$a = \frac{3150}{210} = 15$$

因此, 由式 (1-4) 及式 (1-5) 可求出 $IR\%$ 及 $IX\%$, 即

$$IR\% = \frac{1.587 (34 + 15^2 \times 0.12)}{3150} \times 100$$

$$= 3.07\%$$

$$IX\% = \frac{1.587 (20 + 15^2 \times 0.1^2)}{3150} \times 100$$

$$= 2.14\%$$

所以 $IZ\% = \sqrt{(IR\%)^2 + (IX\%)^2}$

$$= \sqrt{3.07^2 + 2.14^2}$$

$$= 3.74\%$$

上列计算是将二次侧阻抗换算到一次侧, 然后求出变压器的 $IZ\%$, $IX\%$, $IR\%$, 现若将一侧换算到二次侧来计算时, 可得到相同的结果。

$$I_2 = \frac{5 \times 10^3}{210} = 23.8 \text{ [A]}$$

$$IR\% = \frac{I_2 (r_1 \times \frac{1}{a^2} + r_2)}{U_2} \times 100$$

$$= \frac{23.8 \left(34 \times \frac{1}{15^2} + 0.12 \right)}{210} \times 100$$

$$= 3.07\%$$

同理 $IX\% = \frac{23.8 \left(20 \times \frac{1}{15^2} + 0.1 \right)}{210} \times 100$

$$= 2.14\%$$

因此 $IZ\% = 3.74\%$

由上列计算可知，二种算法结果相同。

【例题2】 在例题中，若将二次短路，一次侧施加额定电压时，求在一次侧流过的电流。

这个例题相当于变压器实际使用时的一个具体例子。当二次短路，一次被施加额定电压时，一次电流为

$$I_s = \frac{I_1}{IZ\%} \times 100 = \frac{1.587}{3.74} \times 100$$

$$= 42.4 \text{ [A]}$$

和一次额定电流相比，其增加倍数 n 为

$$n = \frac{42.4}{1.587} = 26.7$$

可见，电流增加的倍数很大，这样，会使变压器线圈产生很大的应力，造成线圈变形和破坏，这一点必须引起注意。

三、阻抗电压百分数的基准容量

变压器的阻抗电压通常是采用额定容量作为它的基准容量，但是，在分析并联运行和短路容量时，若换算到某一个

另外的基准容量，有时就会显得方便得多。现在，如果假定在 P 千伏安容量时的阻抗电压百分数为 $(IZ\%)_p$ ，换算到 S 千伏安容量时的阻抗电压百分数为 $(IZ\%)_s$ ，则它们之间有下列关系。

$$(IZ\%)_s = (IZ\%)_p \times \frac{S}{P} \quad [\%] \quad (1.7)$$

【例题3】 有一台三线圈变压器，一次侧容量为100兆伏安，二次侧容量为80兆伏安，三次侧容量为40兆伏安。阻抗电压百分数在一、二次线圈间是10%（80兆伏安为基准容量），二、三次线圈间是1.8%（40兆伏安为基准容量），一、三次线圈间是9%（40兆伏安为基准容量），试计算各侧线圈单独的阻抗电压百分数。设基准容量都按100兆伏安考虑。

先将一、二次之间，二、三次之间，一、三次之间的阻抗电压百分数均换算成以100兆伏安为基准的阻抗电压百分数，即

$$(IZ\%)_{1-2} = 10 \times \frac{100}{80} = 12.5\%$$

$$(IZ\%)_{2-3} = 1.8 \times \frac{100}{40} = 4.5\%$$

$$(IZ\%)_{1-3} = 9 \times \frac{100}{40} = 22.5\%$$

其次，设二、三次侧各线圈独立的阻抗电压百分数分别为 $P\%$ ， $S\%$ ， $T\%$ ，根据上列关系可得到下列方程组。即

$$\begin{cases} P + S = 12.5\% \\ S + T = 4.5\% \\ P + T = 22.5\% \end{cases}$$

解方程组 $2P + 2S + 2T = 39.5\%$

$$P + S + T = 19.75\%$$

由此得 $P + 4.5\% = 19.75\%$

所以 $P = 15.25\%$

$$S + 22.5\% = 19.75\%$$

$$S = -2.75\%$$

$$T + 12.5\% = 19.75\%$$

$$T = 7.25\%$$

上列 P, S, T 均是以100兆伏安为基准容量的各侧线圈阻抗电压百分数。

四、单线圈变压器的阻抗电压百分数

单线圈变压器的接线图如图1-2所示。在串联线圈和公

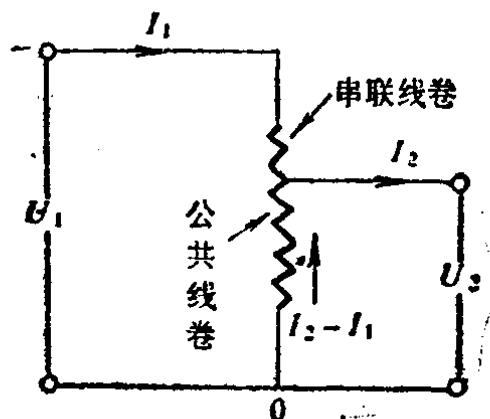


图1-2

共线圈之间，磁势（安匝数）是平衡的，而且，若将串联线圈看作是一次侧，公共线圈看作是二次侧，作为和双线圈变

压器等效来对待时，就比较容易理解了。设串联线圈的阻抗为 $\dot{Z}_1 = r_1 + jx_1$ 欧，公共线圈的阻抗为 $\dot{Z}_2 = r_2 + jx_2$ 欧，则单线圈变压器的阻抗电压百分数有以下三种情况。

(1) 绕组容量（即串联线圈容量）为基准的阻抗电压百分数。其试验回路如图1-3所示。此时，阻抗电压 $(IZ)_s$ 为

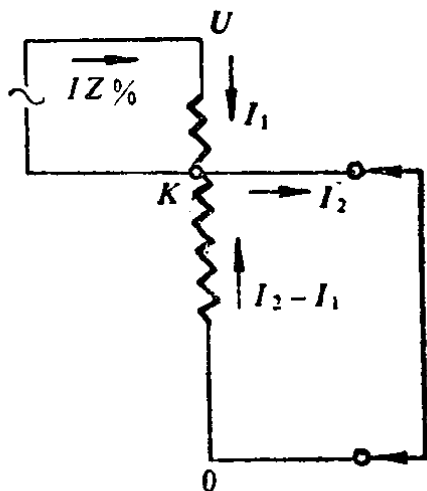


图1-3

$$(IZ)_s = I_1 \left\{ r_1 + \left(\frac{U_1 - U_2}{U_2} \right) r_2 + j \left[x_1 + \left(\frac{U_1 - U_2}{U_2} \right)^2 X_2 \right] \right\} \quad (1-8)$$

式中， $\frac{U_1 - U_2}{U_2}$ 是串联线圈和公共线圈之间的电压比（匝数

比），若将它用 $a = \frac{U_1 - U_2}{U_2}$ 来表示，就和双线圈变压器一

样。这时，换算成阻抗电压百分数时，就变成下列形式：

$$(IZ\%)_s = \frac{(IZ)_s}{U_1 - U_2} \times 100\%$$

$$= \frac{I_1}{U_1 - U_2} \left\{ r_1 + \left(\frac{U_1 - U_2}{U_2} \right)^2 r_2 + j \left[X_1 + \left(\frac{U_1 - U_2}{U_2} \right)^2 X_2 \right] \right\} \times 100 \% \quad (1-9)$$

(2) 以输入容量为基准容量的阻抗电压百分数。其试验电路如图1-4所示。在图1-3和图1-4二个电路中,K点和O点短路形成闭合回路。在这样的闭合回路中,取单线图变压

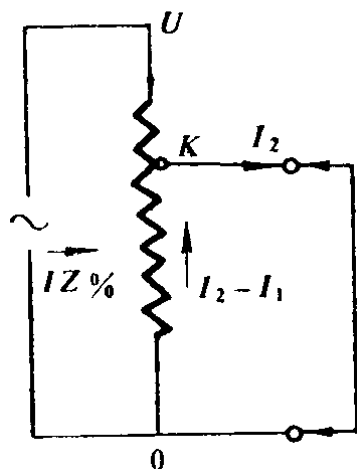


图1-4

器绕组容量为基准容量,还是取输入容量为基准容量,其结果是不同的。故此,以输入容量为基准容量的阻抗电压百分数可写成如下形式:

$$(IZ\%)_L = \frac{(IZ)_s}{U_1} \times 100 \% \quad (1-10)$$

这样,以输入容量为基准容量和以绕组容量为基准容量的阻抗电压百分数之比为

$$\frac{(IZ\%)_L}{(IZ\%)_S} = \frac{\frac{(IZ)_L}{U_1} \times 100}{\frac{(IZ)_S}{U_1 - U_2} \times 100} = \frac{U_1 - U_2}{U_1} = r$$

所以, $(IZ\%)_L = r \times (IZ\%)_S$ (1-11)

系数 r 称为单线圈变压器的匝数比。

【例题4】有一台单线圈变压器。其绕组容量为75兆伏安, 输入容量为200兆伏安。以绕组容量为基准容量时, 其阻抗电压百分数为12%, 若以输入容量为基准容量时, 其阻抗电压百分数为多少。

解 根据前述公式,

$$\begin{aligned} (IZ\%)_L &= \frac{\text{绕组容量}}{\text{输入容量}} \times (IZ\%)_S \\ &= \frac{75}{200} \times 12 \\ &= 4.5\% \end{aligned}$$

【例题5】有一名单线圈变压器。一次电压为60千伏, 二次电压为30千伏, 绕组容量为12兆伏安, 输入容量为24兆伏安。串联线圈的阻抗 $\dot{Z}_1 = j6$ 欧, 公共线圈的阻抗 $\dot{Z}_2 = j4$ 欧。求分别以单线圈变压器的绕组容量和输入容量为基准容量的阻抗电压百分数。

解 图1-5所示为变压器的电压和电流的关系

$$I_1 = \frac{24 \times 10^3}{60} = 400 \text{ [A]}$$

$$\frac{U_1 - U_2}{U_2} = 1 \text{ (以绕组容量计算时的匝数比)}$$

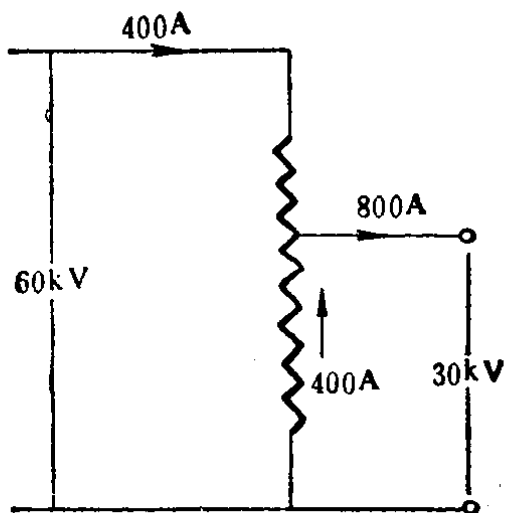


图1-5

由式 (1-8)，将上述题给数据及求出的数值代入，则以绕组容量为基准容量的阻抗电压百分数为

$$(IZ)_s = 400 \times (6 + 4) = 4000 \text{ [V]}$$

所以 $(IZ\%)_s = \frac{4000}{30 \times 10^3} \times 100\%$

$$= 13.33\%$$

$$r = \frac{60 - 30}{60} = 0.5 \text{ (以输入容量计算时的匝数比)}$$

按式 (1-11)，以输入容量为基准容量的阻抗电压百分数

$(IZ)_L$ 为

$$(IZ\%)_L = 0.5 \times 13.33 = 6.67\%$$

2 变压器的并联运行和 负荷分配的计算

一、并联运行的条件

当二台以上变压器的一、二次侧并联连接，而且带上同一负荷时，这种运行方式称为并联运行。在并联运行的条件下，变压器线圈中不能有环流产生，否则就会造成变压器的故障，而使线圈发热，温度升高。最后，导致线圈烧毁。另外为了使变压器正常、顺利地运行，并且使各台变压器的分担负荷合理地与容量成比例，需要具备下列条件。

(1) 单相变压器必须是极性相同，三相变压器则还要接线，组别相同；

(2) 匝数比相等；

(3) 阻抗电压相等；

(4) 并联运行的变压器，其容量之比应尽量在 3:1 的范围内。

在上述条件中，若极性相反，从等效的角度来看，就相当于变压器被短接，如果相位及匝数比不同时，就会在线圈中产生环流，当阻抗电压不相同，各台变压器分担的负荷电流，就会和容量不成比例。而且，对于容量不同的变压器并联运行时，往往会使小容量的变压器过负荷。因此，变压器之间容量差别过大的，是不宜进行并联运行的。

但是，在实际运行中，各台变压器的阻抗是不可能完全

相等的，通常并联运行的变压器中，多少总会使其中一台变压器过负荷，这样的运行一般是允许的，因此，变压比（匝数比）及容量等即使稍微不符合上述条件，只要其负荷分担及温升等仍旧处于允许范围之内，对并联运行是不会有影响的。

下面就变压器在并联运行时的负荷分担进行分析。

二、单相变压器的负荷分担

如图2-1所示，有二台匝数比及阻抗不等的单相变压器

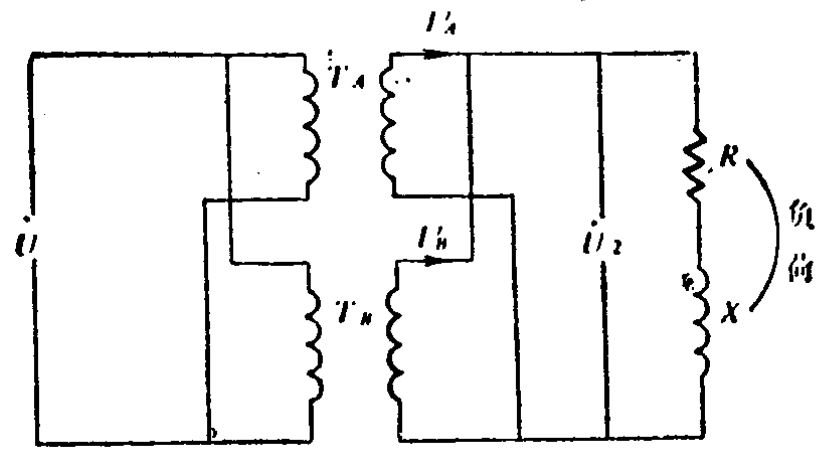


图2-1

I_A 及 I_B 。如果略去励磁阻抗，令它们的匝数比分别为 a 及 b ，阻抗分别为 $\dot{Z}_A$ 及 $\dot{Z}_B$ ，二次感应电势为 $\dot{U}_A$ 及 $\dot{U}_B$ ，二次侧分担的负荷电流为 $\dot{I}_A$ 及 $\dot{I}_B$ ，则它们在并联运行时，换算到二次侧的等值电路如图2-2所示。

此外，设电源加于一次侧的电压为 $\dot{U}_1$ ，二次侧负荷端电压为 $\dot{U}_2$ ，并且令二次侧电压之差为 ΔU ($= \dot{U}_A - \dot{U}_B$)，负荷电流为 $\dot{I}$ ，则各参数之间存在下列关系：

$$\dot{I} = \dot{I}'_A + \dot{I}'_B; \quad U_A = -\frac{\dot{U}_1}{a}; \quad U_B = -\frac{\dot{U}_1}{b}$$

$$\dot{U}_A - \dot{I}'_A Z_A = \dot{U}_B - \dot{I}'_B Z_B$$

故，二台变压器分担的负荷电流 $\dot{I}'_A$ 及 $\dot{I}'_B$ 为

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}'_A &= \frac{\dot{Z}_B}{\dot{Z}_A + \dot{Z}_B} I + \frac{\Delta U}{\dot{Z}_A + \dot{Z}_B} \\ \dot{I}'_B &= \frac{\dot{Z}_A}{\dot{Z}_A + \dot{Z}_B} I - \frac{\Delta U}{\dot{Z}_A + \dot{Z}_B} \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

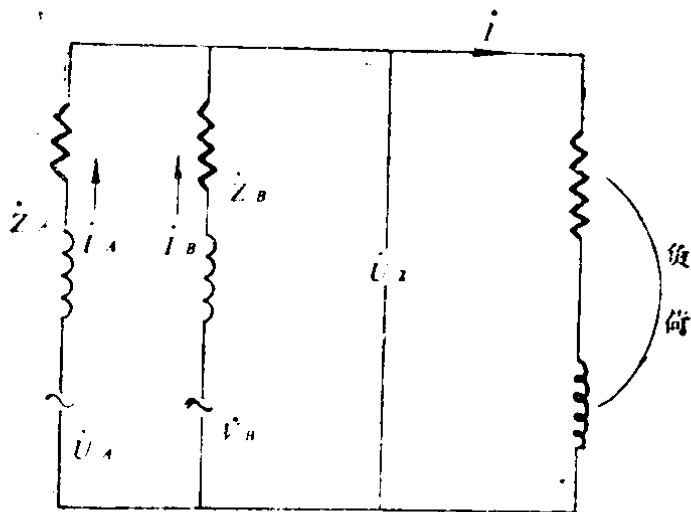


图2-2

若令