

电机工人適用

电 工 学

第七分册 变 压 器

罗先植 章炎福著



电力工业出版社

內 容 提 要

电机工人适用“电工学”，是專为具有高小至初中文化程度的电机工人編写的，也可供初学电工的讀者学习。全書分十二个分册，第一至第十一分册的内容包括：电的基本概念、直流电路、磁和电磁、交流电路、直流电机、交流发电机、变压器、交流电动机、量电仪器、整流设备和內燃机电气設備等；第十二分册是“电工学习題詳解”。本書文字通俗，內容淺显，沒有特別高深的理論和繁雜的計算公式。

第七分册敘述了变压器的作用原理和內部構造，对于原、副繞圈电压、电流的关系，都分別举出实例作了計算。还講述了三相变压器、自耦变压器、恆流变压器和感应式电压調节器的構造和性能。最后簡述了变压器的并列运行。

电 工 学 第七分册 变 压 器

罗先植 章炎福著

*

38.8D143

电力工業出版社出版（北京西郊路學務二里樓）

北京市書刊出版登記證出字第 042 號

水利电力出版社印刷厂排印 新华書店发行

*

787×1092 $\frac{1}{4}$ 开本 * 2 $\frac{6}{16}$ 印張 * 38千字

1956年6月北京第1版

1958年4月北京第4次印刷（19,551—109,570册）

統一書号：T15036·32 定价（第9类）0.28元

目 錄

第十四章 变压器	2
一、变压器的一般知識	2
二、变压器的自感电动势和互感电动势	6
三、变压器原綫圈电流和副綫圈电流	12
四、变压器的輸入和輸出	15
五、变压器的損耗	19
六、变压器的容量	20
七、变压器的構造	21
八、三相变压器	39
九、自耦变压器	41
十、恒流变压器	45
十一、感应式电压調節器	48
十二、三相变压器的接綫法	52
十三、三相变六相的接綫法	60
十四、变压器运行中副电压的調節	66
十五、变压器的極性	71
十六、变压器的併列运行	72
十七、相序的測定	74

第十四章 变 压 器

一、变压器的一般知識

在各种电气设备中，常需要运用不同的电压。如果用很多不同电压的发电机来分别供给需要不同电压的负荷，不但不经济、不方便，而且实际上是不可能的。但是，我们可以利用变压器把同一交流电压变换成各种不同的电压。这种能够变换交流电压的设备，叫做变压器。

假定有一座发电机电压是 110 伏，要同时供电给三种不同的负荷：110 伏的电灯、380 伏的电动机和 6 伏的电铃。就可以用一只变压器把电压升高到 380 伏来供电给电动机，另用一只变压器把电压降低到 6 伏来供电给电铃。这样，比使用电压分别为 110 伏、380 伏和 6 伏的三座发电机，要经济和方便得多。

在远距离输电中，尤其要用变压器。我们知道，在远距离输电线路中，需要把电压升得很高（从几万伏到几十万伏）。但是，不可能设计这样高电压的发电机来直接供电，必须先用升压变压器把从发电机得到的电压升高，再接到输电线路的一端。同时，为了安全、方便，并减低设备费用，直接使用的电压又不可过高。因此，又必须用降压变压器把输电线路送来的电压降低，再接到用电线路。图 1 表示变压器在输电系统中的作用。

其他如在交流发电机的控制板上、仪表的线路上，以及廣播机、收音机、收发报机等电讯设备上，电压的种类很多，利用变压器就可以得到所需要的电压。所以，变压器是非常重要的电气设备。

在第三分册第八章第六节中，我們曾談到：变压器是一种互感电路，因此它必须具有一个铁心和二个电路。圖 2 表示一只简单的变压器，它的铁心形成一个闭合的磁路。这样，很小的电流就可以产生很多的磁力线。通过磁力线，电能就可以从一个电路转入到另一个电路中去。变压器的输入电路，也就是接通电源的线圈，叫做原线圈（又叫一次线圈或初级线圈）；它的输出电路，也就是接通负荷的线圈，叫做副线圈（又叫二次线圈或次级线圈）。

当原线圈接通交流电源，

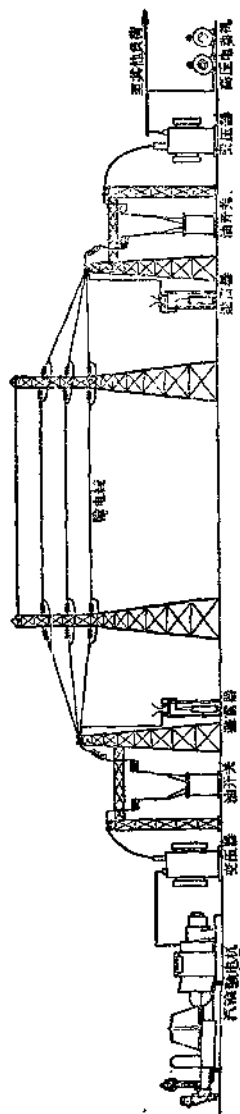


圖 1 变压器在送电系统中的作用

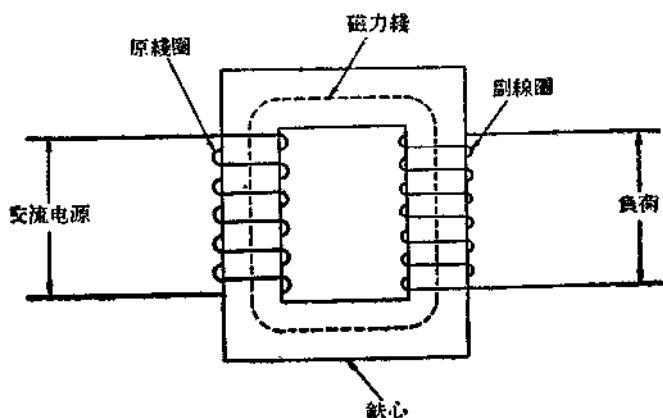


圖 2 变压器的磁路和电路

副線圈不接負荷时，在原線圈中就有电流和自感电动势產生；这时，原線圈中的电流(叫做激磁电流)在鉄心中產生了交变的磁力綫。因为原線圈和副線圈是繞置在同一磁路中，所以絕大部分的磁力綫不但穿过原線圈，同时也穿过副線圈。因此，在原線圈中產生自感电动势的时候，在副線圈中就產生了互感电动势。如果把副線圈接通副电路，副电路中就有电流通过；这样，就把原电路中的交流电能轉变成副电路中的交流电能了。

也許有人要問：利用变压器是不是可以無中生有地產生了一些电能呢？事实上並不是这样。因为在变压器中，並沒有任何能够產生电能的設備，它一方面改变了电压，另一方面也改变了电流；也就是說，它只能把电能轉变为“高电压、低电流”，或者“低电压、强电流”的形式。根据

“能量不滅”定律，變壓器有一定的能量輸出，也必須有相等的能量輸入；如果略去少量的損耗不計，變壓器輸出的功率和輸入的功率是必定相等的。

關於變壓器的一些理論，可列出下列三個重要的公式和二條主要規律：

$$1. \text{公式: } (1) \frac{E_p}{E_s} = \frac{N_p}{N_s},$$

$$(2) \frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p},$$

$$(3) E_p I_p = E_s I_s \text{ 或 } E_p I_p \cos \theta_p = E_s I_s \cos \theta_s.$$

式中 E_p ——原綫圈的電壓(和電源電壓接近相等)；

E_s ——副綫圈的電壓；

N_p ——原綫圈的匝數；

N_s ——副綫圈的匝數；

I_p ——原綫圈的電流；

I_s ——副綫圈的電流；

$\cos \theta_p$ ——電源的功率因數；

$\cos \theta_s$ ——負荷的功率因數。

2. 主要規律：

(1) 原綫圈自感電動勢和副綫圈互感電動勢的方向，總是和電源電壓相反，而且原綫圈自感電動勢的數值總是和電源電壓相接近。

(2) 原綫圈的電流是由副綫圈的電流所控制，它們的方向相反。

下面从第二節到第六節，我們將分別說明变压器的原理包括上述的主要公式和規律。

二、变压器的自感电动势和互感电动势

前面已經說過，当变压器的原綫圈接通交流电源时，原綫圈中產生了自感电动势。同时，在副綫圈中產生了互感电动势。根据楞次定律，这自感和互感电动势都是企图反对磁力綫的变动的，又因它們都是由同一交变磁通（即同一束的磁力綫）所感应出來的，所以它們的相位是一致的。

根据欧姆定律，我們知道电源电压和自感电动势的向量差是在原綫圈中推动激磁电流的原动力。因为变压器的鉄心是一个閉合的磁路，所以激磁电流很小，在原綫圈中所產生的电压降也很小，因而电源电压和自感电动势的向量差很小；也就是說，如果略去这一小部分的电压降不計，电源电压和自感电动势的数值應該相等。

如果电源电压是正弦波形，因为原綫圈的自感电动势和电源电压相等，所以自感电动势、鉄心中的磁力綫以及副綫圈中的互感电动势，也都是正弦波形，並且具有和电源电压相同的頻率。

为了便於在下面計算原綫圈中的自感电动势和副綫圈中的互感电动势，这里重新提一下計算綫圈中感应电动势的公式（見第三分册第八章第三節）：

$$E = \frac{N\Phi}{t \times 10^8} \text{伏。}$$

每一匝綫圈的感应电动势是：

$$\frac{E}{N} = \frac{\Phi}{t \times 10^8} \text{ 伏.}$$

1. 原綫圈的自感电动势

先假定电源的电压是正弦波形，鉄心中磁力綫的最大值是 Φ_m 。那么，当原綫圈接通频率为 f 赫的交流电源时，磁力綫在 $1/4$ 週期的時間內由零增加到 Φ_m （見第四分册第九章第十四節）；也就是說時間是：

$$t = 1/4 \text{ 週期} = \frac{1}{4} \times \frac{1}{f} = \frac{1}{4f} \text{ 秒.} \quad (\text{公式 1})$$

在这時間內每匝綫圈的自感电动势的平均值应当是：

$$E_a = \frac{\Phi}{t \times 10^8} = \frac{\Phi_m}{\frac{1}{4f} \times 10^8} = \frac{4f\Phi_m}{10^8} \text{ 伏.} \quad (\text{公式 2})$$

因为自感电动势也是正弦波形，根据第四分册第九章第八節，感应电动势的最大值是平均值的 $\frac{\pi}{2}$ 倍。因此：

$$\begin{aligned} \text{自感电动势的最大值 } E_m &= \frac{\pi}{2} E_a \\ &= \frac{\pi}{2} \times \frac{4f\Phi_m}{10^8} \text{ 伏} = \frac{2\pi f\Phi_m}{10^8} \text{ 伏.} \quad (\text{公式 3}) \end{aligned}$$

在实用上，我們常用有效值來作为电压或电流的計算标准。正弦波的有效值是最大值的 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ （見第四分册第九章第八節），所以：

$$\begin{aligned} \text{自感电动势的有效值 } E &= \frac{1}{\sqrt{2}} E_m \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{2\pi f \Phi_m}{10^8} \text{ 伏} = \frac{1}{\sqrt{2}} \pi f \Phi_m \times 10^{-8} \text{ 伏} = 4.44 f \Phi_m \\ &\quad \times 10^{-8} \text{ 伏.} \end{aligned} \quad (\text{公式 4})$$

假使原綫圈有 N_p 匝，那末

$$\begin{aligned} \text{原綫圈中的总自感电动势 } E_p &= N_p \times E \\ &= 4.44 f N_p \Phi_m \times 10^{-8} \text{ 伏.} \end{aligned} \quad (\text{公式 5})$$

磁力綫的最大值 Φ_m 等於鉄心截面積 A 和 磁 通 密 度 (單位面積內的磁力綫数) 最大值 B_m 的乘積，即：

$$\Phi_m = B_m \times A.$$

代入公式 5，得

$$E_p = 4.44 f N_p B_m A \times 10^{-8} \text{ 伏.} \quad (\text{公式 5 甲})$$

在設計時，鉄心磁通密度的最大值 B_m ，應根據所用鉄心材料的性質而定。一方面，我們必須盡量提高磁通密度的數值，使鉄心得到充分利用；但另一方面，也不能使它大於某一定的數值，以免產生太大的激磁電流和過多的損耗。實用上，大型電力變壓器磁通密度的最大值常取每平方公分 14 000 根磁力綫左右。

從公式 5 甲算出的自感電動勢，應該和電源電壓幾乎相等，這也就是原綫圈的額定電壓（即原綫圈所應承受的電壓）。

2. 副綫圈的互感電動勢

從圖 2 中，我們知道鉄心中的磁力綫同時穿過原綫圈

和副綫圈，所以它們的感應電動勢是由同一束的交變磁力綫所產生。因為：

每一匝綫圈的感應電動勢 = 磁力綫的變動率 $\times 10^{-8}$ 伏，

所以，原綫圈和副綫圈的每一匝中所產生的感應電動勢一定相等。從公式 4，知道副綫圈每一匝中的互感電動勢的有效值是：

$$E = 4.44 f \Phi_m \times 10^{-8} \text{ 伏。}$$

假使副綫圈有 N_s 匝，那麼

$$\begin{aligned} \text{副綫圈中的總互感電動勢 } E_s &= 4.44 f N_s \Phi_m \times 10^{-8} \text{ 伏} \\ &= 4.44 f N_s B_m A \times 10^{-8} \text{ 伏。} \quad (\text{公式 6}) \end{aligned}$$

和公式 5 甲比較，可知原綫圈和副綫圈電壓之比等於綫圈匝數之比，即

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{4.44 f N_p B_m A \times 10^{-8}}{4.44 f N_s B_m A \times 10^{-8}} = \frac{N_p}{N_s}, \quad (\text{公式 7})$$

例題 1：假定變壓器的原綫圈有 400 匝，額定電壓是 100 伏，副綫圈有 2400 匝。試求副綫圈的電壓。

解： 從公式 7 $\frac{E_p}{E_s} = \frac{N_p}{N_s}$

已知 $N_p = 400$ 匝， $N_s = 2400$ 匝， $E_p = 100$ 伏，

所以 $E_s = E_p \times \frac{N_s}{N_p} = 100 \times \frac{2400}{400} = 600 \text{ 伏。}$

計算時我們也可以先求出每匝綫圈所產生的感應電動勢如下：

原綫圈每匝的電壓 $= \frac{100}{400} = \frac{1}{4}$ 伏/匝。

因為原綫圈和副綫圈每匝所產生的感應電動勢相等，所以副綫

圈的电压 = $\frac{1}{4}$ 伏/匝 $\times 2400$ 匝 = 600 伏。

例題 2: 已知变压器鉄心的截面积是 150 平方公分, 磁通密度的最大值是每平方公分 12 000 磁力綫, 电源的頻率是 50 赫。試求: (1) 每一匝綫圈的感应电动势, (2) 6000 伏原綫圈所需要的匝数和 220 伏副綫圈所需要的匝数。

解: (1) 已知 $A = 150$, $B_m = 12\ 000$, $f = 50$ 。

从公式 4, 每一匝綫圈的感应电动势的有效值是:

$$E = 4.44 f \Phi_m \times 10^{-8} \text{ 伏.}$$

因为 $\Phi_m = B_m A$,

所以 $E = 4.44 f B_m A \times 10^{-8}$

$$= 4.44 \times 50 \times 12\ 000 \times 150 \times 10^{-8} = 4 \text{ 伏,}$$

(2) $6000 = N_p \times 4$,

$$N_p = \frac{6000}{4} = 1500 \text{ 匝;}$$

$$220 = N_s \times 4,$$

$$N_s = \frac{220}{4} = 55 \text{ 匝.}$$

在这例題中, 原綫圈和副綫圈的匝数也可由下法計算:

用公式 5 甲, $E_p = 4.44 f N_p B_m A \times 10^{-8}$ 伏,

把已知的数值代入; $6000 = 4.44 \times 50 \times N_p \times 12\ 000 \times 150 \times 10^{-8}$

$$N_p = \frac{6000 \times 10^{-8}}{4.44 \times 50 \times 12000 \times 150} = 1500 \text{ 匝,}$$

从公式 7, $\frac{E_p}{E_s} = \frac{N_p}{N_s}$

$$N_s \approx N_p \frac{E}{E_p} = 1500 \times \frac{220}{6000} = 55 \text{ 匝},$$

上面通过計算自感电动势和互感电动势，說明了原、副綫圈电压的关系。这里，还簡單介紹一下漏磁阻抗。

在原、副綫圈中，除了絕大部分磁力綫同时穿过原、副綫圈以外，还有一小部分磁力綫只穿过原綫圈而不穿过副綫圈；同样，也有一小部分磁力綫，只穿过副綫圈而不穿过原綫圈；如图30所示，这种磁力綫叫做漏磁。漏磁不能產生互感电动势，但是它能產生感抗；原、副綫圈中的感抗，分別和原、副綫圈的电阻合成为阻抗，產生了电压降。因此，

电源电压 = 原綫圈的感应电动势 + 原綫圈的
阻抗所產生的电压降。

副綫圈的感应电动势 = 端电压 + 副綫圈的
阻抗所產生的电压降。

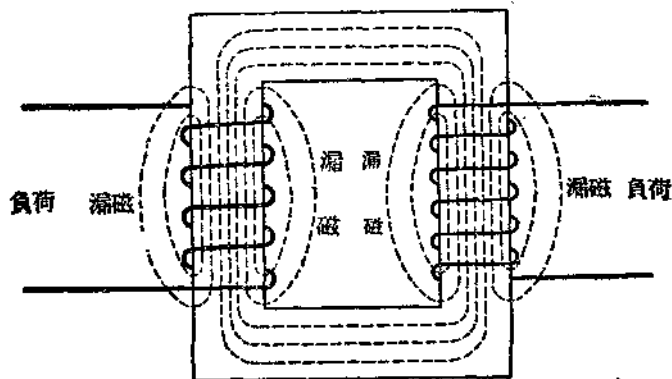


圖 3 变压器的漏磁

我們常把原、副綫圈的阻抗合併为一个总的阻抗。同时，求出在滿負荷时总的阻抗所產生的电压降，並計算它在电源电压中所佔的百分数，來表示阻抗的大小。例如在一只原电压6000伏、副电压380伏的变压器中，如果滿負荷的原电流是190安培，阻抗是0.24欧姆，那么在滿負荷时的电压降是： $190 \times 0.24 = 45.6$ 伏。这部分电压降佔电源电压的百分数是： $\frac{45.6 \times 100}{6000} \% = 0.76\%$ 。也就是說，这台变压器的阻抗的百分电压降是0.76%。

在电力工業上用的变压器中，漏抗很小；所以我們常可用电源电压來代替原綫圈的感应电动势，用副綫圈的端电压來代替副綫圈的感应电动势。

三、变压器原綫圈电流和副綫圈电流

我們已經知道感应电动势 E_p 和 E_s 是由同一束的交变磁通所產生，它們的方向和电源电压的方向相反。如果在副綫圈上接 R_s 欧的負荷电阻，如圖4所示，那么根据欧姆定律，副綫圈中的电流(以下简称副电流)应为：

$$I_s = \frac{E_s}{R_s} \quad (\text{公式8})$$

根据楞次定律，副綫圈电压 E_s 所推动的副电流 I_s 企图反对鉄心中磁力綫的增加或減少。副电流 I_s 愈大，这种影响鉄心中磁力綫的作用也愈大。这样会使原綫圈的自感电动势不再和电源电压相等。但在实际上，即使变压器在

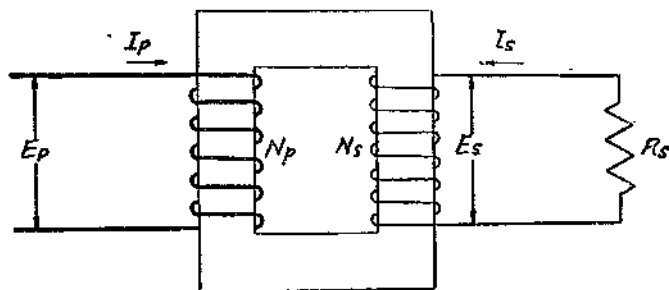


圖 4 接有电阻負荷的变压器

滿負荷時，原綫圈中的電流（以下簡稱原電流）所產生的電壓降也僅是電源電壓的 5 % 左右。所以如果略去這一小部分的電壓降不計，那麼原綫圈的自感電動勢和電源電壓仍舊應該相等。

因此，不管副綫圈是否接有負荷，原綫圈的自感電動勢是不變的（和電源電壓相等）。在鐵心中的磁力綫數也一定和原來的相等。所以，副電流 I_s 對磁力綫的影響，就使電源在原綫圈中推動一電流 I_p 來抵銷 I_s 的作用。這樣，在鐵心中又可保持和原來一樣的磁力綫數，同時原綫圈又可產生和電源電壓相等的自感電動勢。

雖然不論負荷大小，原電流 I_p 總包含着激磁電流的成分，但因激磁電流在設計良好的變壓器中總是很小，所以往往可以略去不計。當副綫圈接有負荷時，原電流 I_p 全部抵銷副電流 I_s 的作用，也就是說原、副兩側的安匝數相等，即：

$$N_p I_p = N_s I_s, \quad (\text{公式 9})$$

或
$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p}. \quad (\text{公式 9 甲})$$

可知原、副兩綫圈中的电流是和匝数成反比的。

又根据公式 7，原、副兩綫圈的匝数和电压成正比，
即：

$$\frac{N_s}{N_p} = \frac{E_s}{E_p},$$

所以原、副綫圈中的电流和电压是成反比的，即：

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p} = \frac{E_s}{E_p} \quad (\text{公式 10})$$

根据以上所述，可知在变压器中，原綫圈的电流是由副綫圈的电流所控制。控制的桥梁就是鉄心中的磁力綫。任何企圖使磁力綫產生变化的副电流，会立刻影响到原綫圈的电流。当副綫圈不接負荷时，原綫圈的电流接近於零（只有很小的激磁电流）；当副綫圈对負荷輸出电流时，原綫圈的电流也跟着增加。

例題 1： 变压器原綫圈的电压是 6000 伏，副綫圈的电压是 220 伏，副綫圈的負荷电阻是 2.2 欧。試求原綫圈的电流。

解： 根据公式 8，副綫圈的电流是：

$$I_s = \frac{E_s}{R_s} = \frac{220}{2.2} = 100 \text{ 安},$$

再应用公式 10, $\frac{I_p}{I_s} = \frac{E_s}{E_p}$

所以
$$I_p = \frac{E_s}{E_p} \times I_s = \frac{220 \times 100}{6000} = 3.67 \text{ 安.}$$

例題 2: 已知變壓器的原繞圈有 4500 匝，副繞圈有 600 匝，副繞圈側的負荷電流是 30 安。試求原繞圈的電流。

解: 已知 $I_s = 30 \text{ 安}$, $N_s = 600 \text{ 匝}$, $N_p = 4500 \text{ 匝}$,

從公式 9 甲,
$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p},$$

得
$$I_p = \frac{N_s}{N_p} \times I_s = \frac{600}{4500} \times 30 = 4 \text{ 安.}$$

四、變壓器的輸入和輸出

根據公式 10,
$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{E_s}{E_p},$$

可知
$$E_p I_p = E_s I_s \quad (\text{公式 10 甲})$$

由於原繞圈的自感電動勢、電源電壓幾乎相等。因此，

$E_p I_p$ = 變壓器從電源輸入的視在功率，

同時， $E_s I_s$ = 變壓器對負荷輸出的視在功率，

所以在變壓器中，輸入的視在功率和輸出的視在功率相等。

在圖 3 中，接在副繞圈上的負荷是一個純電阻，所以 I_s 和 E_s 是同相，而 I_p 和 E_p 也是同相。

如果接在副繞圈上的負荷含有感抗或容抗，如圖 5 所示，那麼副電壓和副電流不同相。根據第四分冊第九章第十七節中所載公式 8 甲，副電流應該是：