# 81．如何认识理想变压器与实际变压器？

一般来说，实际变压器要满足以下条件才可以看作理想变压器：①线圈通电时产生的磁场的磁感线都集中在铁芯中，没有漏磁；②初级线圈的电感足够大；③由于线圈的电阻而造成的铜损和由于铁芯造成的铁损都小到可以忽略。

实际的变压器在设计和制造中已采取措施使其尽量满足上述条件，但一个实际的变压器是否可以看作理想变压器，仍然由所研究讨论的问题决定。

理想变压器，它是实际变压器忽略次要因素，突出主要因素而建立的一种理想模型。

## 一、理想变压器忽略的次要因素有哪些？

变压器主要由闭合铁芯以及绕在它上面的初级线圈和次级线圈组成，在此基础上建立理想模型，需要忽略的次要因素有：

①漏磁。线圈是绕在闭合的铁芯上的，真正密绕的通电线圈，其产生的磁场的磁感线都集中在铁芯内部，但如果相邻各匝导线间有缝隙，则会有磁感线从缝隙中漏出，称为漏磁。绕制线圈的导线都采取一匝接一匝紧密绕制的方式，但相邻导线间必须是绝缘的，因此使用的是涂了绝缘漆的导线，相邻两匝导线之间隔着绝缘漆的涂层，完全没有漏磁发生是难以做到的，但绝缘漆涂层的厚度很小，漏磁并不严重，因此漏磁可以作为次要因素被忽略。

②线圈的电阻。绕在闭合铁芯上的线圈都是有电阻的，初级线圈在通有交变电流时可以看成一个电感与电阻串联，如果线圈的电阻相对于感抗而言可以忽略，那么当次级线圈处于断路时，初级线圈就可以看作一个纯电感电路，而纯电感电路通有交流电时，电流与电压的相位差是 90°，这时的电流称为无功电流，不消耗电能。

当次级线圈接有负载时，次级线圈的电阻也要消耗电能，因此次级线圈的电阻相比负载也必须很小，从而线圈本身消耗的电能都可以忽略。

③铁芯造成的能量损耗。线圈中通有交变电流时，铁芯被反复磁化，其内部会产生涡流，同时铁芯反复磁化也会产生磁滞损耗，涡流和磁滞造成的损耗统称为铁损，如果铁损消耗的电能相比于转化为有用的能量而言，所占比例很小，则可以作为次要因素而被忽略掉。

## 二、理想变压器的几个结论

如果理想变压器真的存在，会有如下结果。

### （1）空载情况

次级线圈不接负载时的变压器，称为空载变压器。真正的理想变压器，空载时会有以下结论：

①初级线圈两端加电压为 *U* 的交变电压，初级线圈的感抗设为 *X*L，则通过线圈的电流大小 *I* = ，*I* 与 *U* 间的相位差 *φ* 为 90°，消耗的电功率 *P* = *UI*cos*φ* = 0，它不消耗电能。

②次级线圈虽然没有连接负载，但仍然要产生感应电动势，由于次级线圈与初级线圈都绕在闭合铁芯上，并且没有漏磁，因此每匝线圈产生的感应电动势都相等，设为 *ε*0，初级线圈有 *n*1 匝，次级线圈有 *n*2 匝，则初级线圈产生的感应电动势为 *E*1 = *n*1*ε*0，次级线圈产生的感应电动势为 *E*2 = *n*2*ε*0，有 = 。对于初级线圈，*E*1 是反电动势，有 *U*1 = *E*1，对于次级线圈，*E*2 是电源电动势，由于没有电流，因此 *U*2 = *E*2，得出 = ，即电压与匝数成正比，一般称此为电压变比公式。

### （2）有负载情况

变压器实际上是一个互感装置，当次级线圈接有负载时，次级线圈中有电流 *I*2 通过，它产生的磁场的磁感线同样集中在铁芯内部，并且产生的磁通抵消初级线圈电流产生的磁通，使得初级线圈产生的感应电动势（反电动势）减小，初级线圈电流 *I*1 将增大，直到达到新的平衡（铁芯内部的磁通量恢复到原来空载时的水平）。如果次级线圈所接的负载是纯电阻，对于理想变压器来说，初级与次级的电流间（以及电压间）的相位相反，而初级线圈、次级线圈各自的电流与电压间的相位相同，则初级线圈、次级线圈消耗的电功率分别为 *P*1 = *U*1*I*1、*P*2 = *U*2*I*2，由于理想变压器没有任何损耗，因此 *P*1 = *P*2，从而得到 = ，即两边电流与匝数成反比，一般称此为电流变比公式。

## 三、真实的变压器与理想变压器的差别

理想变压器在实际中并不存在，真实的变压器与理想变压器有哪些差别呢？

### （1）空载情况

①初级线圈两端加电压为 *U* 的交变电压，初级线圈可视为电阻和电感串联，设感抗为 *X*L，电阻为 *r*，则通过线圈的电流 *I* = ，*I* 与 *U* 间的相位差 *φ* = arctan，消耗的电功率 *P* = *UI*cos*φ* ≠ 0。要注意，这里的 *r* 并不单纯表示初级线圈的导线的电阻，还包括因为铁芯产生涡流及磁滞而造成损耗的等效电阻。

变压器在设计与制造环节都采取了很多措施，以减少这些损耗，虽然损耗不可完全避免，但已将其降至很小，这是理想变压器这个理想模型有实际意义的重要原因。很多电子设备或仪器，都有“待机”功能，不少设备处于“待机”状态时，其中的变压器就处于这种空载状态，它虽然消耗能量不多，但仍然是有消耗的，因此长时间不使用的情况下，最好还是关掉电源，避免能量的浪费。

②次级线圈仍然要产生感应电动势，但由于存在着漏磁，每匝线圈产生的感应电动势不能保证真正相等，这是其一。初级电路是电感与电阻的串联，因此外加电压不与初级线圈产生的感应电动势相等，即 *U*1 ≠ *E*1，而是 *U*1 稍大于 *E*1，而次级线圈中没有电流，因此次级电压与次级的感应电动势相等，即 *U*2 = *E*2，这是其二。由于这两点原因，电压变比公式 = 并不严格成立，但实际变压器的漏磁现象及能量损耗都不严重，因此误差很小，一般可以忽咯。但中学实验室的可拆变压器，由于铁芯的闭合不好，漏磁比较严重，损耗也大，因此误差较大。

### （2）有负载时的输出电压

当次级线圈接有负载时，初级线圈产生的感应电动势 *E*1 是反电动势，而次级线圈产生的感应电动势是电源的电动势，先不考虑相位问题，则有 *U*1 = *E*1 + *I*1*r*1，*U*2 = *E*2 – *I*2*r*2，即 *U*1 稍大于 *E*1，而 *U*2 稍小于 *E*2，即使 = 成立，= 也只能是近似成立。不难看出，变压器次级的输出电压 *U*2 是随负载的增加而逐渐减小的，如图 1 所示就定性地反映了它的输出电压随负载变化的情况。现代的电力变压器，满载时输出电压 *U*2 满与空载时的电压 *U*20 之比大约下降 2 % ~ 3 %，对于小型变压器则下降得更多一些。

1（电阻性负载）

*U*2

图 1 变压器的输出电压随负载变化的关系

*U*20

*O*

*I*

2（电感性负载）

### （3）有负载时的输出功率

一般情况下，初级和次级的电压和电流都有相位差，而且相位差不相等，设初级的相位差为 *φ*1，次级的相位差为 *φ*2，则它的输入功率和输出功率分别为 *P*1 = *U*1*I*1cos*φ*1，*P*2 = *U*2*I*2cos*φ*2。

由于存在着导线电阻造成的铜损和铁芯涡流及磁滞造成的铁损，*P*1 > *P*2，*P*2 与 *P*1 的比值即为变压器的效率，即 *η* = ×100%。变压器的效率与负载有关，包括负载的性质和负载的大小，电阻性负载效率较高，电感性负载效率较低；负载越小效率越低，越接近满载时效率越高。一般电力变压器在纯电阻性负载时的效率可达 95%，更大型的变压器效率甚至可达 99%，但小型变压器的效率达不到这么高。

### （4）从空载到满载，初级电流与电压相位差的变化

空载时，初级线圈的感抗很大而电阻很小，其电流与电压间的相位关系如图 2 所示，这时的电压 *U* 与电流 *I* 间的相位差小于 90°，但很接近于 90°，其有功功率很小，即消耗的电能很少。

*U*L

图 2 空载时的输入电压与电流的相位关系

*O*

*U*R

*I*

*U*

有负载时，次级线圈中有电流存在，它在铁芯内产生的磁通与初级电流产生的磁通方向相反，从而使得初级感应电动势减小，初级电流增大，这相当于初级的感抗减小而电阻增大，初级电压 *U* 的大小保持不变，但与电流 *I* 的相位差变小，到满载时，电压 *U* 与电流 *I* 间的相位差已经减小到接近于 0°（但不会等于 0°），如图 3 所示。（满载是指初级电流达到设计允许的最大值时的负载。）

*U*L

图 3 满载时的输入电压与电流的相位关系

*O*

*U*R

*I*

*U*

电压变比公式 = 及电流变比公式 = 都是近似公式，但前者显然近似程度更高，而后者近似程度较低。这两个公式都与负载的大小有关，即随着负载的增加，近似程度都有所降低，但从空载到满载，次级电压只下降百分之几，在不要求很精确的情况，可以认为电压变比公式在负载变化时仍然是近似程度较高的成立。但电流变比公式不同，空载时，初级电流不为零而次级电流为零，电流变比公式根本不成立，负载很小时，电流变比公式也基本不成立，只有在满载或接近满载时，电流变比公式才近似成立，且近似程度仍然不如电压变比公式高。