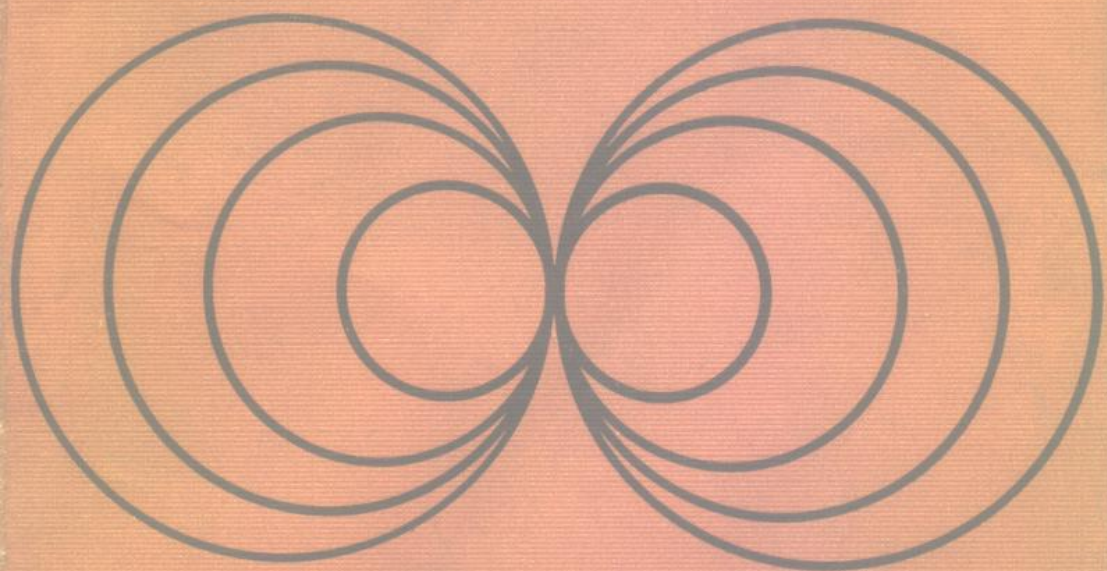


# 变压器全书

(电力变压器实用技术)

[英] A.C. 夫兰克林 编  
D.P. 夫兰克林



机械工业出版社

# 变 压 器 全 书

(电力变压器实用技术)

[英] A.C. 夫兰克林 D.P. 夫兰克林 编

崔立君 等译



机 械 工 业 出 版 社

0191/20

## 译者的话

本书最初是由英国Johnson & Philips Ltd公司于1925年出版的，所以原书名称叫做《The J&P Transformer Book》，译文书名简化为《变压器全书》。本书的知名度很高，并一再修订，到1983年已再版第十一版，本书就是根据第十一版译出的。

本书是一部论述电力变压器问题的专著，所涉及的内容比较广泛，几乎包括了变压器专业的各个领域。它比较全面地反映了英国及欧美当代变压器行业的水平。

本书的内容，理论与实践相结合，但更偏重于实践，所以本书的副标题为《电力变压器实用技术》。

译者翻译本书的目的是想把英国现代电力变压器的实用技术介绍到中国来。由于译者的水平有限，所以译文中定会存在许多不足，敬请读者批评指正。

参加本书翻译工作的有崔立君（第一章至第十三章）、杨力田（第十四章至第十八章）、张万和（第十九章至第二十三章）和侯世源（第二十四章至第二十八章及附录），并由崔立君担任全书译文的校对工作。为了便于读者查阅，译文中增加了小标题编号。译文中对原文的版误也尽量作了更正。

## 原书编辑的话

《J&P变压器全书》是一部论述电力变压器问题的专著。在此意义上，可以认为，本书是从事变压器设计、安装及维护工作的电气工程师的主要参考书。对于设计师和电力系统规划者来说，本书是一本必不可少的常备书。对于电气工程专业的大学毕业生及大学生而言，本书的益处更是无法估计的。由于本书的知名度很高，因此在世界上广为流传。近些年来，香港、新加坡以及台湾等一些地区，也有中译本销售，但译文质量不佳。

本书第一版出于1925年，原作者是Mr. H. Morgan Lacey。该版本的前身是1922年出版的以变压器文摘为主的一组小册子。

《J&P变压器全书》问世以来，其需求量一直在增长。

1958年，Mr. S. A. Stigant与Mr. A. C. Franklin合作编写并出版了本书的第九版。在1961年，他们又共同出版了第十版，并于1965年进行了修订。后来，Mr. Stigant退休，因此，Mr. Franklin基本上独立完成了第十一版的准备工作以及编写和出版工作。Mr. Franklin曾在Johnson & Philips有限公司多年承担变压器设计工作，并在此期间使得该公司成为Dundee Bonar Long有限公司的经理研究会成员。去年，Dundee指定Mr. D. P. Franklin为他的合作者。同年七月，Dundee去世。

本著作体现了两位编者对变压器制造厂家及有关单位、研究所和有关学会所提供的大量资料所进行的广泛研究、深入探讨以及精辟概括。本书包括很多新技术，并列有大量数据、表格、计算公式、联结图及图示说明。本版的内容也做了重新调整。

希望本版同前几版一样，对工程技术人员有更多的奉献。

编辑 C. A. Worth

## 原书第十一版序言

如同前几版一样，编者在此向许多在电器制造、发电及供电行业中工作的朋友们表示衷心的感谢，感谢他们向我们提供了大量数据、资料及图片，并慷慨地协助我们工作。他们对本书的贡献是世所公认的。

本版的内容重新作了修订。自第十版问世以来，由于在变压器设计和工程实践中，新技术、新工艺层出不穷，所以本版的发行势在必行。本版自始至终充分考虑了第十版的整个内容。同时也参考并引用了英国和国际电工委员会的电力变压器标准。

希望已经从《J&P 变压器全书》的前几版广收效益的电气工程师们，无论在什么地方，只要依然从事原来的工作，能够一如既往地在本版中得到更多的收获。

ACF

DPF

CAW

# 目 录

第一章 变压器基本原理 .....	1
第二章 磁路 .....	13
一、用晶粒取向硅钢带卷制成的铁心 .....	18
二、环形铁心和矩形铁心 .....	20
三、切铁心 .....	20
四、用于单相农用变压器中的切铁心和非切铁心 .....	21
五、三相变压器用的切铁心 .....	23
六、Y型铁心 .....	23
七、典型数据 .....	24
八、变压器铁心叠片的生产 .....	25
第三章 基本型式和特性 .....	28
一、磁路 .....	28
二、一、二次绕组 .....	30
三、绕组的冷却 .....	36
四、线圈处理 .....	38
五、绕组的绝缘 .....	40
六、套管绝缘子 .....	41
七、油箱及冷却表面 .....	43
八、干式配电变压器 .....	46
九、干式变压器的线圈 .....	47
十、典型结构 .....	47
第四章 变压器询价和投标 .....	71
一、询价 .....	71
二、投标 .....	79
三、损耗 .....	86
四、效率 .....	93
五、调整率 .....	96

六、变压器设计 .....	102
七、确定变压器性能的计算公式 .....	103
第五章 变压器效率 .....	109
第六章 负载系数对变压器损耗值的影响 .....	119
第七章 多相联结 .....	130
一、双绕组变压器 .....	132
二、自耦变压器 .....	155
第八章 斯考特联结和拉普拉斯联结 .....	165
一、斯考特联结 .....	165
二、拉普拉斯联结 .....	196
第九章 曲折形联结和开口三角形联结 .....	199
一、曲折形联结 .....	199
二、开口三角形联结 .....	207
第十章 多绕组变压器和第三绕组 .....	224
一、多绕组变压器 .....	224
二、第三绕组 .....	229
第十一章 变压器分接头 .....	235
一、每匝电压 .....	236
二、电流 .....	237
三、电压 .....	239
四、电抗 .....	239
五、损耗 .....	242
六、并联运行 .....	243
七、特殊情况 .....	244
第十二章 利用分接变换调节电压 .....	248
一、无励磁分接变换 .....	248
二、有载分接变换 .....	250
三、分接开关电路 .....	251
四、分接开关的结构 .....	273
五、有载分接开关的控制 .....	277
六、移圈调压器 .....	284
七、布伦特福德线性调压器 .....	286

第十三章 例行试验和型式试验 .....	290
一、电压比和极性试验 .....	291
二、负载损耗和阻抗测量 .....	294
三、绝缘电阻试验 .....	297
四、绕组直流电阻测量 .....	298
五、空载损耗和空载电流测量 .....	298
六、绕组绝缘的耐压试验 .....	303
七、油浸变压器和干式变压器的温升试验 .....	309
八、冲击电压试验 .....	329
九、噪声水平试验 .....	329
第十四章 变压器试验相量图 .....	330
一、电压比和极性试验 .....	331
二、负载损耗和阻抗测量 .....	332
三、空载损耗和空载电流测量 .....	333
四、耐压试验 .....	334
五、温升试验 .....	336
第十五章 变压器的冲击试验 .....	340
一、冲击试验电压水平 .....	340
二、冲击电压波形 .....	341
三、冲击电压发生器 .....	342
四、冲击电压的测量方法 .....	345
五、变压器的冲击试验 .....	345
六、操作冲击试验 .....	351
七、低电压冲击试验 .....	353
第十六章 油浸变压器的发运、安装和维护 .....	357
一、发运 .....	357
二、安装 .....	357
三、维护 .....	365
第十七章 变压器油 .....	384
一、变压器油的物理性能 .....	385
二、变压器油的化学性能 .....	388
三、变压器油的电气性能 .....	391



四、抗氧化变压器油 .....	395
五、油的维护 .....	397
六、综合性建议 .....	403
第十八章 并联运行 .....	408
一、变压器端子标记、端子位置、相量图、极性和相序 .....	408
二、单相变压器 .....	422
三、多相变压器 .....	433
四、通过变压器供电的电网的并联运行 .....	442
第十九章 变电站中并联运行变压器总损耗最小的负载 .....	446
一、相同的变压器 .....	447
二、不同的变压器 .....	452
第二十章 中性点接地 .....	469
一、高压中性点接地 .....	469
二、低压中性点接地 .....	477
第二十一章 三相曲折形联结的中性点接地变压器和静止 平衡器 .....	502
一、接地变压器 .....	502
二、静止平衡器 .....	508
第二十二章 变压器中所出现的瞬变现象 .....	516
一、高压和高频波冲击 .....	516
二、合闸过电压 .....	531
三、分闸过电压 .....	532
四、合闸电流冲击 .....	534
五、短路电流 .....	546
第二十三章 变压器保护 .....	553
一、针对系统所出现的故障对变压器采取的保护 .....	553
二、针对变压器中所出现的故障对系统采取的保护 .....	573
第二十四章 故障及其起因 .....	605
一、磁路中的故障 .....	605
二、绕组中的故障 .....	609
三、绝缘中的故障 .....	613
四、由各种结构缺欠及其它原因而产生的故障 .....	614

五、结论 .....	617
第二十五章 持续非正常运行条件的影响 .....	621
第二十六章 变压器联结方式对三次谐波电压和电流的影响 .....	631
一、对称三相系统中的三次谐波 .....	631
二、变压器中三次谐波电压和电流的起因 .....	634
三、三次谐波的不良影响 .....	642
四、对星形/星形联结的三次谐波问题的进一步说明 .....	644
第二十七章 变压器绕组中的电磁力 .....	655
一、短路电流 .....	655
二、机械强度 .....	656
三、辐向电磁力 .....	656
四、轴向电磁力 .....	659
五、各种分接布置下的轴向力 .....	665
第二十八章 变压器噪声 .....	671
一、噪声的主观性 .....	671
二、噪声的测量方法 .....	671
三、响度的确定 .....	673
四、声级测量仪 .....	674
五、变压器的声级测量 .....	678
六、变压器噪声分析 .....	679
七、现场上变压器的噪声 .....	682
八、衰减措施 .....	685
九、噪声的谐波成分 .....	685
十、变压器的安装地点 .....	686
十一、声强 .....	686
附录 .....	688
1 变压器等效电路 .....	688
2 变压器相量的几何图形 .....	697
3 变压器圆图 .....	703
4 变压器的电压调整率 .....	706
5 不平衡三相系统中的对称分量 .....	710

X

6	油浸式变压器的负载 .....	735
7	并联变压器接地故障的对称分量研究 .....	744
8	英国电工研究协会 (REA) 关于变压器冲击现象所发表的 报告一览表 .....	804
9	英国标准协会发布的有关电力变压器的主要技术标 准一览表 .....	808

## 第一章 变压器基本原理

鉴于工程理论与实践之间的相互依存关系，现在已完全被人们所公认，故在编写一部某一学科一个方面的书时，简略地涉及另一方面是完全必要的。本书的宗旨是阐述关于英国电力变压器实践的一般概况，所以首先用基本公式和简化相量图简略地介绍一下关于变压器功能是完全必要的。

变压器基本上是由一个用绝缘的硅钢片所制成的导磁铁心和两个套在铁心上的独立的彼此适当放置的绕组所构成的。这两个绕组分别叫做一次绕组和二次绕组。这种组合体可以用来得到比电源电压高或低的电压。在前一种情况下的变压器称做升压变压器，而在后一种情况下的变压器称做降压变压器。一次绕组是施加电源电压的绕组，不管它是高压绕组还是低压绕组；另一个直接连接负载的绕组就叫做二次绕组。

正如电磁感应现象只能在磁通连续变化的情况下才在静止的装置中发生那样，静止的变压器也只能用在具有交流电路特性的电路中。

如果一个交流电势施加在变压器一次绕组的端子上，而二次绕组开路，那么仅有一个很小的电流流过一次电路，它使铁心励磁并提供变压器的铁心损耗。这样，便在铁心中建立起一个交流磁通，而该磁通则在一、二次绕组中感应出电势来。励磁安匝等于励磁电流与一次线匝的乘积。空载电流等于总的空载安匝除以一次线匝。由于一、二次绕组是套在同一铁心上的，又由于磁通是这二个绕组所共有的，显然每个绕组的一个线匝中所感应的电压是相同的，所以在一、二次绕组中所感应的电压将正比于这二个绕组的匝数。联系感应电压、磁通和匝数的公式如下：

$$E = 4K_f \Phi_m N f \quad (1.1)$$

式中  $E$ ——所论绕组中感应电势的有效值, V;  
 $K_f$ ——电势波的波形系数 (正弦波为1.11);  
 $f$ ——电源的频率, Hz;  
 $\Phi_m$ ——流过铁心的总磁通 (峰值), Wb;  
 $N$ ——所论绕组的匝数。

上式无论对一次绕组还是对二次绕组都是完全成立的, 而且仅仅是代入相应绕组的  $N$  值的事。图1.1表示空载变压器的简化相量图, 符号的意义已在图中注明。通常在变压器的实际设计中, 忽略由一次绕组的空载电流而引起的微小电压降。

对于正弦波电压 (通常总是这样假定), 式 (1.1) 可以简化成

$$E = 4.44f\Phi_m N$$

在实际的设计计算中, 这个公式可以改写成

$$\frac{V}{N} = \frac{B_m A f}{22.51 \times 10^4} \quad (1.2)$$

式中  $\frac{V}{N}$ ——每匝电压, 对二个绕组都是一样的;

$B_m$ ——铁心的磁通密度, T;

$A$ ——铁心的净截面积,  $\text{mm}^2$ ;

$f$ ——电源频率, Hz。

在实际设计中,  $B_m$  和  $A$  是事先确定的, 而  $f$  也总是已知的, 所以每匝电压可以由该公式求出。根据绕组的给定电压和已求出的每匝电

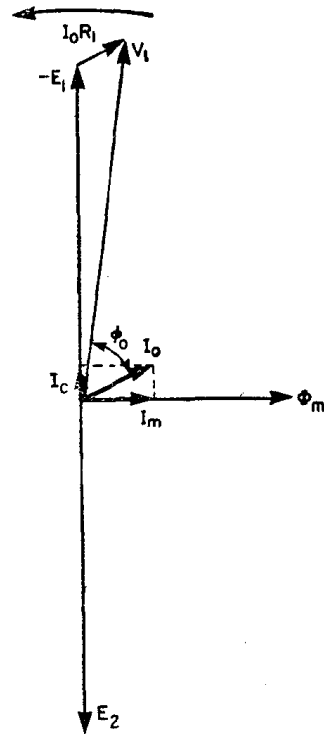


图1.1 单相变压器空载时的相量图

(假定匝数比为1:1)

$V_1$ ——一次端电压  $E_1$ ——一次感应电势  
 $E_2$ ——二次感应电势  $I_0 R_1$ —— $I_0$ 引起的电阻压降  
 $\Phi_m$ ——磁通的最大(峰)值  
 $I_0$ ——一次空载电流  
 $I_c$ ——一次铁损耗电流  
 $I_m$ ——一次励磁电流  
 $\cos \phi_0$ ——一次空载功率因数 (忽略漏磁)

压，确定每个绕组的匝数是相当容易的事情。

图1.2所示的计算图用在式(1.2)中三个参数的情况下，快速确定另一个参数的值。

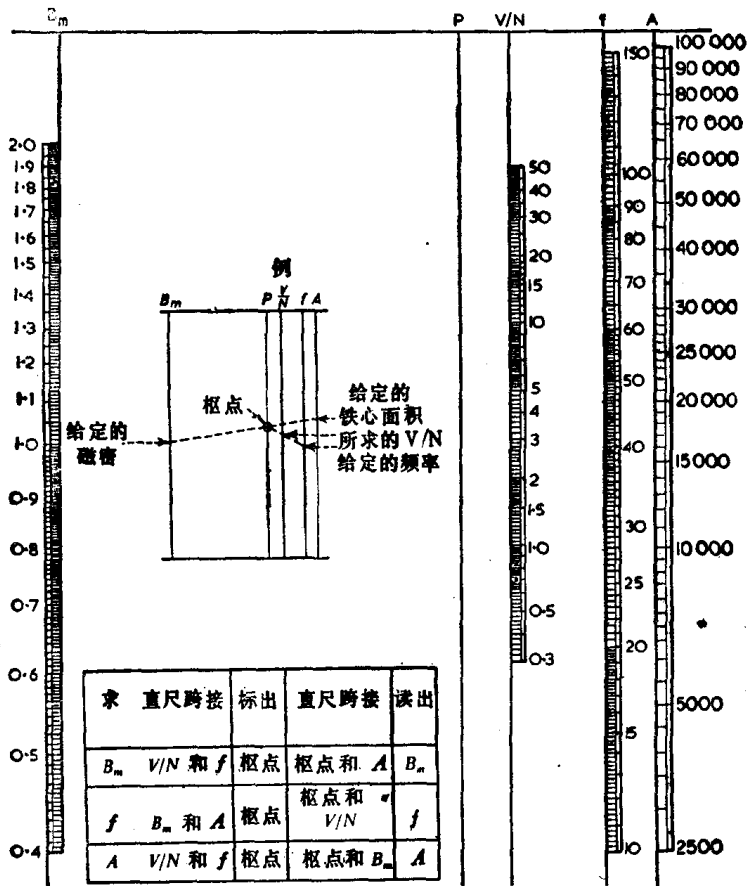


图1.2 确定单相和三相变压器 $V/N$ 的计算图

求 $V/N$ 时，将直尺跨接 $B_m$ 和 $A$ 的给定值，并在辅助线 $P$ 上标出交点。再将直尺跨接在辅助线 $P$ 上，所得出的交点和给定频率，即可读出所求的 $V/N$ 值

在理论上，出现在空载变压器中的损耗，包括铁心损耗、由空载电流流过一次绕组而引起的铜线损耗和介质损耗。实际上，在空载变压器中，仅铁心损耗是重要的，它是磁滞损耗和涡流损耗的和，对于给定的外施电压它是恒定不变的，而且与变压器的负载无关。

介质损耗也是一、二次电压的函数,但是它与取决于变压器负载的绕组温度却关系不大。由空载电流引起的铜线损耗通常忽略不计,对于给定的励磁,它与负载无关。

空载的变压器尤如一个高自感的单一绕组,空载功率因数平均约为0.15滞后。

当变压器的二次侧接上负载时,其内部现象将发生重大变化。当二次电路闭合时,二次电流流通,其值取决于二次端电压和负载电路阻抗的值。由二次负载电流引起的磁势在铁心中产生一定的负载磁通,其相位与二次电流相同。但是,由于一、二次负载安匝是相等的,所以二次负载电流直接被一次负载电流所平衡。二次负载磁通同样被一次负载磁通所抵消。一次负载磁通与一次负载平衡电流同相位,所以它与二次负载磁通相位相反,数值相同。所以铁心仍然保持原来的励磁状态,这点也可以说明为什么铁心损耗与负载无关。一次电路的总电流等于一次负载电流与空载电流的相量和。暂时先忽略电阻压降和漏抗压降问题,对于带有非感性负载的变压器,其状态用相量形式表示在图1.3中。这时变压器的损耗增加了二次绕组的铜线损耗(即 $I^2R$ 损耗)、导线中的涡流损耗以及油箱和铁心夹件中的杂散损耗。

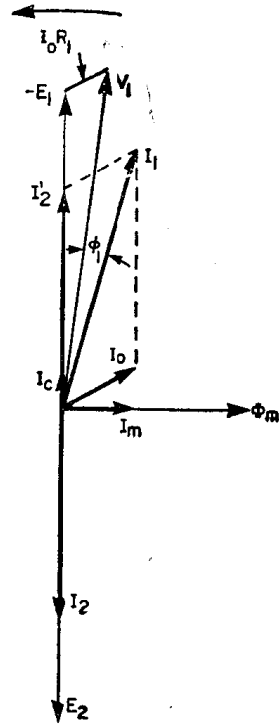


图1.3 带有电阻性负载(功率因数为1)的单相变压器的相量图

(假定匝数比为1:1)

$V_1$ —一次端电压  $E_1$ —一次感应电势  $E_2$ —二次感应电势  
 $I_0R_1$ — $I_0$ 引起的电阻压降  $\phi_m$ —磁通的最大(峰)值  $I_0$ —一次空载电流  $I_c$ —一次铁损电流  
 $I_m$ —一次励磁电流  $I_2$ —二次负载电流  $I_2'$ —总一次电流的负载分量  $I_1$ —一次总电流(包括 $I_0$ 和 $I_2'$ )  $\cos\phi_1$ —一次总负载功率因数(忽略负载压降)

现在来考虑由变压器绕组的电阻和漏抗所引起的电压降问题。应该首先指出，虽然各个电压降被分开了，但是它们总的的影响却都在二次端子上显示出来。一、二次绕组的电阻压降是容易分开的，并且对各绕组来说也是容易确定的。由二个绕组之间的总漏磁通所引起的电抗压降是不能严格分成二个分量的，这是因为一、二次漏磁通之间的分界线是不能确定的。然而通常是将漏磁通的一半划分给每个绕组，并且对电抗压降也同样处理。图1.4表示单相变压器接上具有滞后功率因数为0.80的感性负载时的相位关系，其电阻压降和漏抗压降已划分给各自的绕组。事实上，总的的影响是二次端电压降低，然而划分给一次绕组的电阻压降和电抗压降却以加在一次绕组的感应电势上的形式出现在该图中。

图1.5所表示的相位关系与图1.4相同，但是电阻压降和电抗压降全都出现在二次侧。

当然，一次电阻压降和电抗压降应折算到二次电压，即将一次电压降除以变比  $n$ ，而不管它是升压变压器还是降压变压器。换言之，一个绕组的百分压降折算到任意绕组都保持不变。

为了将一次电阻值  $R_1$  或漏抗值

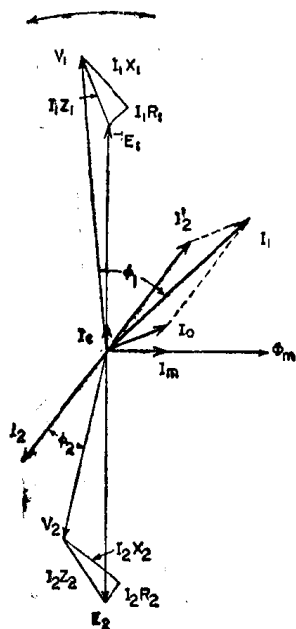


图1.4 带有电感性负载（功率因数  $\cos \phi_2$  滞后）的单相变压器的相量图

（假定匝数比为1:1，电压降划分到一、二次侧）

$V_1$ —一次端电压  $E_1$ —一次感应电势  
 $V_2$ —二次端电压  $E_2$ —二次感应电势  
 $I_1 R_1$ —一次电阻压降  $I_1 X_1$ —一次电抗压降  
 $I_1 Z_1$ —一次阻抗压降  $I_2 R_2$ —二次电阻压降  
 $I_2 X_2$ —二次电抗压降  $I_2 Z_2$ —二次阻抗压降  
 $\Phi_m$ —磁通的最大（峰）值  
 $I_0$ —一次空载电流  $I_c$ —一次铁损耗电流  
 $I_m$ —一次励磁电流  $I_2'$ —二次负载电流  
 $I_1'$ —一次总电流的负载分量  
 $I_1$ —一次总电流（包括  $I_0$  和  $I_1'$ ）  
 $\cos \phi_2$ —二次负载功率因数  
 $\cos \phi_1$ —一次总负载功率因数



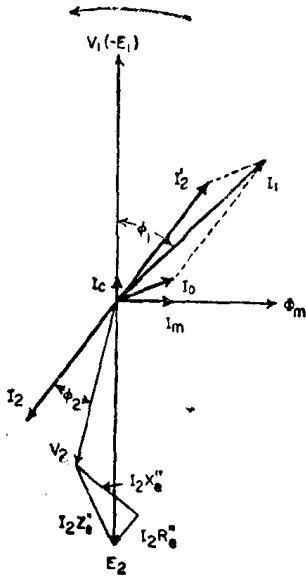


图1.5 带有电感性负载（功率因数 $\cos\phi_2$ 滞后）的单相变压器的相量图

（假定匝数比为1:1,电压降折算到二次侧）

$V_1$ —一次端电压  $E_1$ —一次感应电势  $V_2$ —二次端电压  $E_2$ —二次感应电势  $I_2R_e''$ —总电阻压降  $I_2X_e''$ —总电抗压降  $I_2Z_e''$ —总阻抗压降  $\phi_m$ —磁通的最大（峰）值  $I_0$ —一次空载电流  $I_c$ —一次铁损电流  $I_m$ —一次励磁电流  $I_2$ —二次负载电流  $I_2'$ —一次总电流的负载分量  $I_1$ —一次总电流（包括 $I_0$ 和 $I_2'$ ）  
 $\cos\phi_2$ —二次负载功率因数  $\cos\phi_1$ —一次总负载功率因数

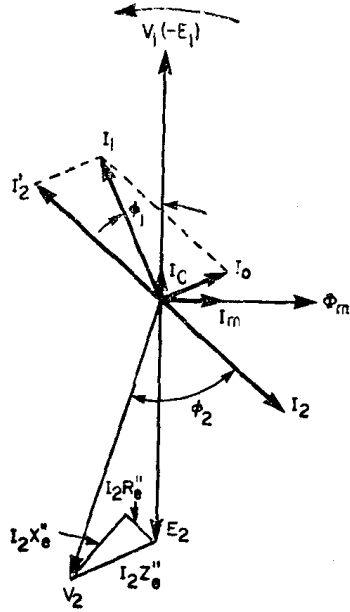


图1.6 带有电容性负载（功率因数 $\cos\phi_2$ 超前）的单相变压器的相量图

（假定匝数比为1:1,电压降折算到二次侧）

$V_1$ —一次端电压  $E_1$ —一次感应电势  $V_2$ —二次端电压  $E_2$ —二次感应电势  $I_1R_e''$ —总电阻压降  $I_1X_e''$ —总电抗压降  $I_1Z_e''$ —总阻抗压降  $\phi_m$ —磁通的最大（峰）值  $I_0$ —一次空载电流  $I_c$ —一次铁损电流  $I_m$ —一次励磁电流  $I_2$ —二次负载电流  $I_2'$ —一次总电流的负载分量  $I_1$ —一次总电流（包括 $I_0$ 和 $I_2'$ ）  
 $\cos\phi_2$ —二次负载功率因数  $\cos\phi_1$ —一次总负载功率因数

$X_1$ 变换到二次侧，需将 $R_1$ 和 $X_1$ 除以变比 $n$ 的平方，这对升压变压器和降压变压器都是适用的。

阻抗从一侧变换到另一侧的步骤如下：

设  $Z_2$ ——二次电路的总阻抗，包括漏抗和负载特性；