



变压器设计原理

尹克宁 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

CEPP



CHINA ELECTRIC POWER PRESS



责任编辑：黄晓华

ISBN 7-5083-1665-7



9 787508 316659 >

ISBN 7-5083-1665-7
定价： 29.00 元

变压器设计原理

尹克宁 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

本书全面介绍了油浸式变压器与干式变压器的设计计算原理以及结构、运行等有关问题。全书共分为七章，内容主要包括变压器电磁计算的一般问题，绝缘设计基础，铁芯及空载参数计算，绕组及负载损耗计算，短路阻抗计算，温升计算，耐受短路能力及其校验等。

本书着重于从基本理论与物理概念出发，深入浅出地阐述油浸式变压器与干式变压器的设计、结构等有关的原则性问题，尽量避免一些繁琐的数学推导，以期更好地适合读者自学。另外，本书还注意紧密联系实际，尤其是结合了许多最新国家标准的内容以及变压器的运行、维护方面的知识，并对有关领域的国内外最新动态与发展方向进行了介绍。

本书可供从事变压器设计、制造、试验、运行维护、检修等方面的工程技术人员自学使用，也可供有关院校相关专业的师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

变压器设计原理/尹克宁编著. —北京: 中国电力出版社, 2003
ISBN 7-5083-1665-7

I. 变… II. 尹… III. 变压器-设计 IV. TM402

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 054064 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

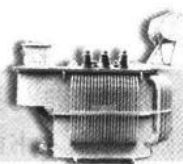
汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

2003 年 10 月第一版 2003 年 10 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 18.5 印张 417 千字
印数 0001—3000 册 定价 29.00 元

版权专有 翻印必究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)



自新中国成立以来，尤其是改革开放后，我国的电力工业取得了突飞猛进的发展。迄今，全国的总装机容量与年发电量都已跃升到世界第二位，成为了名副其实的“电力大国”，其成就是十分巨大和惊人的。但是，由于我国人口众多，在按人口平均的装机容量与年用电量方面，仍处于发展中国家的中等水平。今后，随着我国在新的世纪中国经济迈向全面的小康社会，电力工业必将取得更快的发展。

众所周知，变压器是电力系统中的一个极其重要的设备，无论是发电厂、变电所、输电网络还是广大的用户以及国民经济的各个部门，都使用着各式各样的变压器。据统计，每增加1kW的发电装机容量，就需要配套6~8kVA的变压器，可见，今后随着整个国民经济的高速发展，对变压器的需要量还将不断增加。

目前，在我国，各种类型的变压器生产厂家已有上千家。它们在生产规模、设计水平、制造业绩等方面均已迈入了世界先进水平。另外，在各个电力部门和工厂企业，还有大批人员在从事变压器的运行、维护、检修等工作。随着在线监测、状态检修等新技术的推广和应用，变压器的运行维护水平也正向世界先进水平靠近。变压器设计是整个变压器制造的第一步。设计质量的高低，直接影响到产品的技术水平、质量与制造成本。另外，即使在使用部门，也需要对变压器设计有所了解。例如，使用部门在订购变压器时，就需要对影响变压器性能参数的诸多因素有所了解；又如正确决定变压器的正常与事故过负荷能力，也是运行部门十分关心的问题。

变压器是一种静止高压电器，就其最基本的电磁感应原理而言，是与旋转电机相同的。但是，其机械结构和在机加工方面的要求，却较旋转电机简单。二者最大的区别在于，除配电变压器之外的高压及超高压变压器，它们的工作电压都大大高于旋转电机，这时高电压下的绝缘等问题，将上升为十分突出的矛盾。同时，高压变压器在设计、结构、运行等方面所涉及的绝缘、损耗与发热、噪声、抗短路能力等问题，从物理学的观点来看，都分别属于电场、磁场、温度场、声场与力场的范畴，总的来说，是属于“场”的问题。它们不仅理论高深，而且不依靠现代电子计算机进行数值计算，就不能得出精确的解答，也可以说，变压器在设计、结构方面的原理，不仅不直观，而且是比较高深的。

正是基于上述情况，随着我国变压器制造业与电力工业的发展，早年就有不少部门提出了进一步学习变压器设计与结构原理的要求。应这些单位的邀请，笔者从20世纪70年代起，就曾在全国各地为变压器厂与供电局等部门，陆续多次举办过有关变压器设计与结

构原理方面的培训班。

本书正是在笔者在上述培训班授课时编写的教材的基础之上，经修改、整理并重新编著而成的。在编写本书时，尤其注意借鉴了笔者这 20 年来在参加全国变压器标准化技术委员会的工作中、在制定与审查国家标准时，所积累的经验与素材，以致力于使本书内容与我国当前的实际紧密结合。另外，本书在内容上的一个很大特点是，同时讲述了油浸式变压器与干式变压器的设计原理。

笔者编著本书的出发点是：不局限于只按传统的电磁计算程序与计算方法去进行叙述讲解，而是着重于从基本理论与物理概念出发，深入浅出地去阐述变压器设计中各个问题的物理本质与基本原理，以便更好地适合读者自学。另外，全书的各个部分都注意了结合最新的国家标准与 IEC（国际电工委员会）标准，以期紧密地联系当前实际。笔者深信：只要掌握了这些基本原理，不仅有助于读者易于理解自己所使用的具体设计方法，还将有助于他们更好地去灵活运用与发挥。另外，本书内容不仅与变压器设计有关，还与变压器的原理、结构、制造、试验、标准、运行维护、检修等都有着密切的关系，而了解这些全面的知识，正是做好变压器设计所必需的。另外，本书还注意介绍了一些近年来在变压器领域的最新技术及其发展信息，以开阅读者的眼界和思路。

基于本书特点以及限于全书篇幅等原因，笔者认为还有下列几点需要向读者说明：

(1) 对一般设计手册、书籍中已有的一些较具体的内容：如变压器绕组排列、绕组数据计算、油箱设计、变压器重量计算以及各种电工钢片、绝缘材料与导线的特性数据等，本书均未列入。读者如有需要，可参阅有关手册或书籍。

(2) 为便于初学读者理解，并照顾绝大多数读者的需要，本书所述的产品对象重点是 220kV 及以下的双绕组电力变压器。限于篇幅，本书对 330kV 以上超高压电力变压器的一些特殊问题（如变压器绕组的波过程，操作冲击过电压以及自耦变压器的一些特殊问题等）本书虽有所涉及，但未作深入阐述。读者如有需要，可参考其他专著。

(3) 本书在叙述原理时，必然涉及到许多公式的推导。但笔者在编写本书时，考虑到读者原有的学历、基础等并不相同。为便于读者理解，本书并不是单纯的推导，甚至还略去一些推导过程，以便更多地着重于物理概念的阐述。

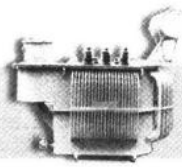
本书在编写过程中，曾参阅了大量的国内外书刊（详见参考文献），笔者在此谨向有关作者一并表示诚挚的谢意。

另外，本书在编著中还受到一些工厂企业的大力支持。一些专家和培训班学员等都曾提出过许多宝贵意见，笔者一并在此表示感谢。

本书的编写由于时间仓促，内容面广，肯定有不少疏忽、遗漏甚至不妥之处，恳请读者提出宝贵的意见，批评指正。

笔 者

2002 年 12 月
于西安交通大学



133w 94/2

前言

第一章 变压器的电磁计算	1
第一节 变压器电磁计算的一般程序.....	1
第二节 变压器技术参数的确定.....	2
第三节 电压和电流的计算.....	3
第四节 做好变压器设计应注意的问题.....	9
第五节 铁芯直径的选择	10
第六节 高、低压绕组匝数的计算	15
第二章 绝缘设计基础	19
第一节 变压器绝缘的分类及对绝缘设计的要求	19
第二节 变压器运行时各部分所承受的电压	20
第三节 变压器试验电压的确定以及绝缘配合的概念	22
第四节 变压器的电场计算	29
第五节 变压器常用的绝缘材料及其放电特性	42
第六节 油浸式变压器的绝缘结构	54
第七节 干式变压器的绝缘结构	80
第八节 变压器绕组在冲击电压作用下的波过程	95
第九节 变压器的纵绝缘和引线绝缘.....	111
第十节 绝缘材料的热特性以及油变和干变的负载能力.....	121
第三章 变压器的铁芯与空载参数的计算	134
第一节 变压器铁芯的结构型式.....	134
第二节 三相变压器的磁路系统分析.....	136
第三节 三相卷铁芯变压器的磁路分析.....	140
第四节 铁磁材料的基本特性.....	145
第五节 空载损耗和空载电流的计算.....	152

第六节	变压器空载损耗的分析以及降低损耗的措施	164
第四章	变压器的绕组以及负载损耗计算	173
第一节	变压器绕组的结构型式和特点	173
第二节	变压器负载损耗的计算及其降低措施	178
第五章	短路阻抗计算	195
第一节	概述	195
第二节	漏电抗计算的基本公式的推导	196
第三节	短路阻抗的工程计算方法	203
第四节	短路阻抗的其他计算方法	214
第五节	分裂绕组变压器的阻抗计算	219
第六节	变压器的零序电抗计算	224
第六章	变压器的温升计算	230
第一节	变压器的发热和冷却过程	230
第二节	变压器的散热计算和冷却方式	232
第三节	变压器的温升限值	237
第四节	油浸式变压器的温升计算简介	240
第五节	干式变压器的温升计算	244
第六节	变压器暂态温升的计算	249
第七章	变压器耐受短路的能力及其校验	252
第一节	突然短路时的短路电流计算	252
第二节	短路情况下变压器的受力分析	256
第三节	安匝平衡计算	261
第四节	短路电动力的设计计算	265
第五节	短路时导线应力的计算	268
第六节	突然短路时的动态力	273
第七节	短路热稳定的校验	278
第八节	从运行实践看提高变压器耐受短路能力的措施	281
参考文献		287

变压器的电磁计算

第一节 变压器电磁计算的一般程序

通常，变压器设计应包括两个阶段，即首先进行电磁计算，然后再进行结构设计及绘制产品生产图纸。电磁计算的任务是确定变压器的电磁负载和主要几何尺寸，计算其性能参数以及各部分的温升、重量等。应当指出，电磁计算是整个产品设计的基础，是设计的关键部分。本章主要讲述电磁计算的一般问题，对结构设计本书将不涉及。

变压器的电磁计算应根据产品设计任务书中所给定的技术参数来进行，其结果首先必须满足国家标准及有关技术标准中的规定以及用户的要求，同时还应具有较好的技术经济指标。通常所说的“优化设计”，就是以实现上述要求为目标的。

变压器电磁计算的一般程序如下：

- (1) 根据设计任务书确定各原始技术数据；
- (2) 计算铁芯柱直径、选择铁芯柱和铁轭截面；
- (3) 根据硅钢片牌号，初选铁芯柱磁密，计算每匝电势；
- (4) 计算高低压绕组匝数；
- (5) 根据正常及过电压下的电气计算，进行绕组铁芯等部分的绝缘设计，确定变压器的主、纵绝缘结构；
- (6) 高、低压绕组设计；
- (7) 短路特性计算；
- (8) 磁路系统设计和空载特性的计算；

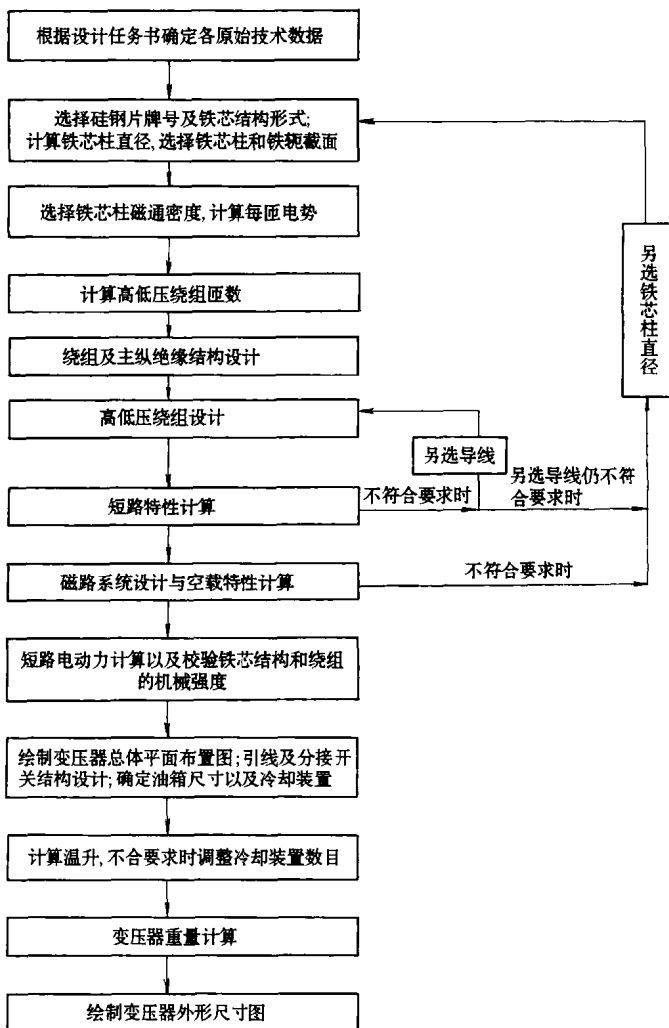


图 1-1 变压器电磁计算的一般程序

- (9) 散热及冷却装置设计；
- (10) 温升计算；
- (11) 安匝平衡与短路电动力计算；
- (12) 重量计算；
- (13) 其他特殊计算。

整个电磁计算过程如用流程图表示，则如图 1-1 所示。



第二节 变压器技术参数的确定

确定技术参数实际上就是确定变压器设计的原始条件。在变压器设计计算之前所需要确定的技术参数主要由国家标准及有关标准以及用户订货时所提出的要求来决定。例如，对电力变压器而言，设计计算中主要涉及的国家标准有《电力变压器》（即 GB 1094）干式变压器（GB 6450）与《三相油浸式电力变压器技术参数和要求》（即 GB/T 6451），以及《干式电力变压器的技术参数和要求》（即 GB/T 10228）等。其主要项目如下：

(1) 额定容量：一般应按 GB 1094 中所规定的容量等级，特别注意所推荐优先采用的容量等级。如特殊订货时，则应由制造厂与用户共同协商确定。同时，对三绕组变压器和自耦变压器，还应考虑到中、低压绕组有 50% 容量的可能，而分别注明每个绕组的容量。另外，干式变压器的额定容量，应为其自然冷却时的最大容量。

(2) 额定电压：应按 GB 1094 及有关国家标准和 IEC 标准的规定，尤其是出口产品应考虑用户订货的要求。

(3) 有载调压及无励磁调压的范围和级数：根据上述国标的规定以及用户订货的要求来决定。

(4) 额定频率：一般为 50Hz，个别出口产品可能为 60Hz。

(5) 相数：单相或三相（个别特种变压器除外）。

(6) 绕组联结组标号：按国家标准的规定和用户定货要求来决定。

(7) 额定性能数据（空载损耗、负载损耗、空载电流、短路阻抗等）；其基本要求是应满足变压器的性能参数标准，具体应由厂家根据市场需求并考虑节能环保等要求来决定。个别特殊定货以及某些特种变压器由厂方与用户协商决定。

(8) 额定使用条件：对我国应按国家标准的规定如下：

1) 环境温度：

最高气温 +40℃

最高日平均气温 +30℃

最高年平均气温 +20℃

最低气温 -25℃

（适用于户外式变压器）

最低气温 -5℃

（适用于户内式变压器）

2) 海拔高度：变压器安装地点的海拔高度不应超过 1000m，当超过时应按降低绝缘处理，对温升标准也应另作考虑，具体可见国标中的规定。

3) 冷却水温度：对强油循环水冷式变压器规定冷却器入口处的最高水温为 +25℃。

(9) 冷却方式：按国家标准的规定。

(10) 温升限值：油浸式变压器与干式变压器在额定使用条件下各部分的温升不应超过国家标准中的有关规定，具体可参见第六章中的表 6-4 与表 6-5。

(11) 绝缘水平：各类变压器产品的绝缘水平应符合 GB 311《高压输变电设备绝缘配合》以及 GB 1094.3 及 GB 6450 的规定。具体来说，可分为下面几大类：

1) 全绝缘：中性点绝缘水平与线路绝缘水平一致。

2) 分级绝缘：中性点绝缘水平比线路绝缘水平低，一般用于中性点有效接地系统。

3) 降低绝缘：产品的绝缘水平较一般正常产品要低，适用于不直接和架空线路连接的产品，如试验变压器等。

(12) 噪声水平：由相应的行业标准所规定。

(13) 其他特殊参数：如零序电抗值、安装尺寸要求、运行环境要求、运输重量限制等，均由用户与制造厂协商来决定。



第三节 电压和电流的计算

在确定了变压器的技术参数后，在正式的电磁计算开始之前，应首先进行电压和电流的计算。这项计算同样也是电磁计算的重要原始条件之一。由于变压器的种类繁多，在本节中先针对一般单相变压器和三相变压器的电压和电流的计算原则和方法进行介绍，再进一步介绍更复杂一些的变压器的电压和电流计算。

一、单相变压器和三相变压器的电压、电流计算

1. 单相变压器

(1) 当两个芯柱上的绕组相互串联时（见图 1-2）：

$$\text{每柱电压：} \quad U_z = U_N / 2, \quad \text{kV} \quad (1-1)$$

$$\text{每柱电流(总电流)：} \quad I_N = I_z = S_N / U_N, \quad \text{A} \quad (1-2)$$

式中 U_N ——额定电压，kV；

S_N ——额定容量，kVA。

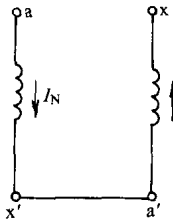


图 1-2 两个芯柱上的绕组相互串联

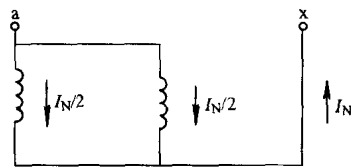


图 1-3 两个芯柱上的绕组相互并联

(2) 当两个芯柱上的绕组相互并联时 (见图 1-3):

$$\text{每柱电压: } U_Z = U_N, \text{ kV} \quad (1-3)$$

$$\text{总电流: } I_N = \frac{S_N}{U_N}, \text{ A} \quad (1-4)$$

$$\text{每柱电流: } I_Z = I_N/2, \text{ A} \quad (1-5)$$

2. 三相变压器

由于三相变压器有 Y 接法 (或 YN 接法) 与 D 接法两种类型, 因此在计算电压、电流时, 必须注意线值与相值的关系, 下面分别介绍这两种情况。

(1) Y (YN) 接法。这种接法多用于高压绕组, 又可分为端部出线与中部出线两种情况 (见图 1-4)。当采用 Y 接法时, 具有下列关系

$$\text{电压: } U_N = \frac{U_{\phi N}}{\sqrt{3}}, \text{ kV} \quad (1-6)$$

$$\text{电流: } I_N = I_{\phi N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_N}, \text{ A} \quad (1-7)$$

式中 $U_{\phi N}$, $I_{\phi N}$ ——每相的额定电压、额定电流值。

当采用中部出线时, 每相电流为额定相电流的一半。

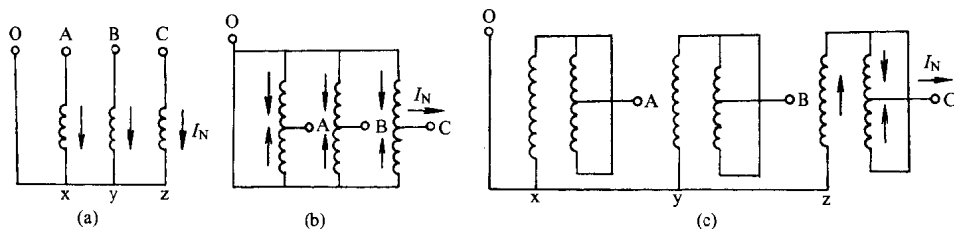


图 1-4 三相变压器的 Y (YN) 接法

(a) 端部出线; (b)、(c) 中部出线

(2) D (三角形) 接法 (见图 1-5)。这种接法多用于中、低压绕组。其特点为相电压等于线电压, 但相电流为线电流的 $1/\sqrt{3}$, 即

$$\text{电压: } U_N = U_{\phi}, \text{ kV} \quad (1-8)$$

$$\text{电流: } I_{\phi N} = \frac{I_N}{\sqrt{3}} = \frac{S_N}{3U_N}, \text{ A} \quad (1-9)$$

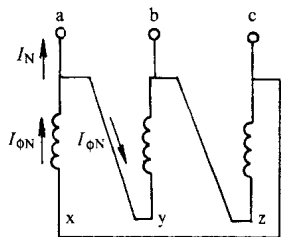


图 1-5 三相变压器的 D 接法

综上所述可知: 根据已知的额定容量、额定电压 (包括各分接电压)、变压器绕组的接法以及相数等, 按照上述各有

关公式, 即可计算出所需的线、相电流值以及各分接下的电压。

二、三相变两相的变压器的电压、电流计算

在交通运输以及某些工业部门（如电解冶金、电焊等），当变压器为两个单相负载时，就需要采用三相变二相的变压器。由于负载仅有二相，所以这种变压器的主要任务就是应使得三相输入侧的负载电流尽可能地平衡。在这类变压器中，以斯柯特（Scott）变压器的应用最早，下面就以这种变压器为例来介绍一下特种变压器的电压和电流的计算。

1. 一次侧的电压关系

斯柯特变压器的一次侧接线如图 1-6 所示。在被称为主绕组的中点 M（实际上是把绕组分割为两个部分，取其阻抗相等而平衡绕制的）上与另一个被称做 T 座的绕组相联。当在其三个端子上加上三相平衡电压时，则主绕组的电压与 T 座绕组之间的电压的相量关系，如下式所示。

如以 \dot{U}_A 作为基准，利用对称分量法并运用符号法分析可得

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix} \dot{U}_1 \quad (1-10)$$

$$\text{式中 } a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

用下标 T 表示 T 座的各个量，则根据图 1-6 可以有下列关系式

$$\dot{U}_T = \frac{\dot{U}_A}{2} + \dot{U}_C = \frac{\dot{U}_1}{2} + aU_1 = j\frac{\sqrt{3}}{2}U_1$$

另外， \dot{U}_A 为加在主绕组上的电压，如把它用 \dot{U}_M 来表示，则有

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_M \\ \dot{U}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ j\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (1-11)$$

由于 \dot{U}_M 与 \dot{U}_T 为相位差为 90° 的两个相电压，所以由此所感应的两个磁通，当然也有 90° 的相差。

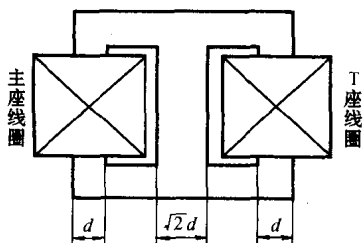


图 1-7 斯科特变压器的铁芯布置

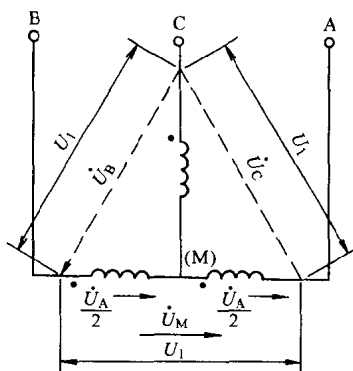
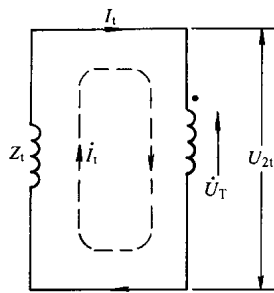
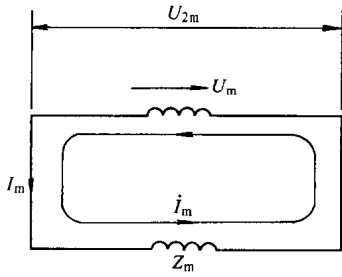


图 1-6 斯科特变压器的一次侧接线

因而，如图 1-7 所示，如取三柱式铁芯的中心柱铁芯宽度为左右铁芯宽度的 $\sqrt{2}$ 倍，按主座的一次、二次绕组用左柱，而 T 座的一次、二次绕组用右柱，则可以更好地节省铁芯材料消耗。

2. 二次侧的电流（见图 1-8）

如主绕组及 T 座绕组的负荷以及端子电压的大小，



分别用 S_{2m} 及 S_{2t} 以及 U_{2m} 及 U_{2t} 来表示时, 则有

$$\begin{aligned} I_m &= \frac{S_{2m} \times 10^3}{U_{2m}} \\ I_t &= \frac{S_{2t} \times 10^3}{U_{2t}} \end{aligned} \quad (1-12)$$

式中 S_{2m} ——主绕组二次侧的负荷, kVA;

S_{2t} ——T 座绕组二次侧的负荷, kVA。

图 1-8 斯科特变压器的二次侧电流

另外, 如忽略绕组的内部阻抗, 而回路阻抗仅看作负荷的等效阻抗, 则对主绕组二次侧的阻抗可用 Z_m 来表示, 对 T 座绕组的二次阻抗可用 Z_t 来表示, 则有

$$\begin{aligned} Z_m &= \frac{U_{2m}}{I_m} \\ Z_t &= \frac{U_{2t}}{I_t} \end{aligned}$$

因而

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_m \\ \dot{U}_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{2m} \\ jU_{2t} \end{bmatrix} \quad (1-13)$$

故有

$$\begin{bmatrix} I_m \\ I_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_m / Z_m \\ \dot{U}_t / Z_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{2m} / Z_m \\ jU_{2t} / Z_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_m \\ j\dot{I}_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{2m} \times 10^3 / U_{2m} \\ jS_{2t} \times 10^3 / U_{2t} \end{bmatrix} \quad (1-14)$$

3. 一次侧电流

如图 1-9 所示, 在该图中表示出了一次侧负荷电流的方向。

由于

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} &= \frac{1}{U_1} \begin{bmatrix} -U_{2m}, & \frac{1}{2} \times \frac{2}{\sqrt{3}} U_{2t} \\ U_{2m}, & \frac{1}{2} \times \frac{2}{\sqrt{3}} U_{2t} \\ 0, & -\frac{2}{\sqrt{3}} U_{2t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_m \\ I_t \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{U_1} \begin{bmatrix} -U_{2m}, & \frac{1}{\sqrt{3}} U_{2t} \\ U_{2m}, & \frac{1}{\sqrt{3}} U_{2t} \\ 0, & -\frac{2}{\sqrt{3}} U_{2t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_m \\ \dot{I}_t \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1-15)$$

如把式 (1-14) 代入式 (1-15) 中则有

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} &= -\frac{1}{U_1} \begin{bmatrix} -U_{2m}, & \frac{1}{\sqrt{3}}U_{2t} \\ U_{2m}, & \frac{1}{\sqrt{3}}U_{2t} \\ 0, & -\frac{2}{\sqrt{3}}U_{2t} \end{bmatrix} \\ &\times \begin{bmatrix} \frac{S_{2m} \times 10^3}{U_{2m}} \\ j \frac{S_{2t} \times 10^3}{U_{2t}} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -\sqrt{3}S_{2m} & +jS_{2t} \\ \sqrt{3}S_{2m} & +jS_{2t} \\ 0 & +j2S_{2t} \end{bmatrix} \frac{10^3}{\sqrt{3}U_1} \end{aligned}$$

(1-16)

只要使用式 (1-16), 即可计算出当二次侧的二个负荷不相等的时的一次侧三相不平衡电流。

现在如把二次侧的总负荷用 S_2 来表示, 由于在二次侧二个回路的负荷相等时, $S_{2m} = S_{2t} = S_2/2$, 故从上式可得

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} = -\frac{1}{U_1} \begin{bmatrix} -\sqrt{3} \frac{S_2}{2} & +j \frac{S_2}{2} \\ \sqrt{3} \frac{S_2}{2} & +j \frac{S_2}{2} \\ 0 & +j2 \times \frac{S_2}{2} \end{bmatrix} \frac{10^3}{\sqrt{3}U_1} = \begin{bmatrix} (-\sqrt{3} + j1)/2 \\ (\sqrt{3} + j1)/2 \\ -j1 \end{bmatrix} \frac{S_2 \times 10^3}{\sqrt{3}U_1} \quad (1-17)$$

故有

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{S_2 \times 10^3}{\sqrt{3}U_1} \quad (1-18)$$

从上式可以看出, 即使二次侧的二个端子电压不同, 只要二个负荷相等, 这样一次侧的负荷电流即可完全平衡。因此, 这种变压器还同时具有把二相系统逆变换为三相系统的优点。

4. 二次侧为单相负荷

从用户的要求来看, 常常希望斯科特变压器的二次侧能按单相三线的接线来使用 [见图 1-10 (a)], 下面来分析一下当二次侧联接单相负荷时, 一次侧的负荷电流。

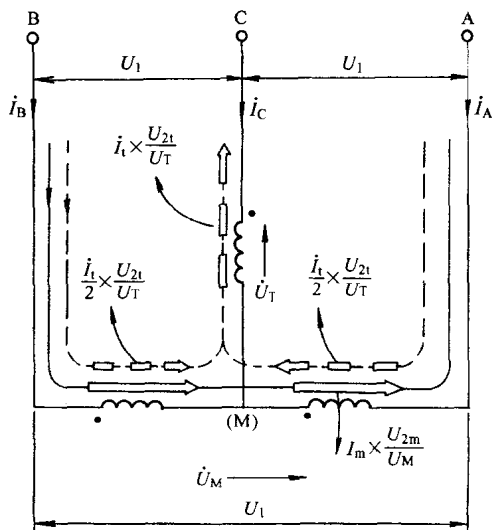


图 1-9 斯科特变压器的一次侧电流

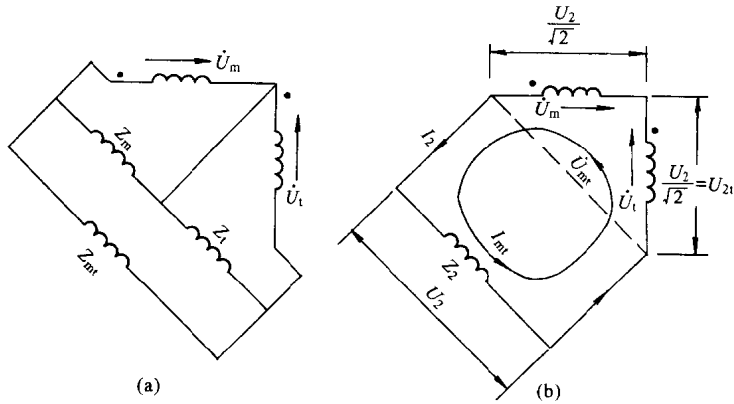


图 1-10 二次侧为单相负荷时的电压和电流

由于

$$I_2 = S_2 \times 10^3 / U_2 \quad (1-19)$$

$$I_2 = U_2 / I_2 \quad (1-20)$$

$$\dot{U}_{mt} = \dot{U}_m - \dot{U}_t = \dot{U}_{2m} - j\dot{U}_{2t} = (1 - j1) \times \frac{U_2}{\sqrt{2}} \quad (1-21)$$

故有

$$\begin{aligned} \dot{I}_{mt} &= \frac{\dot{U}_{mt}}{Z_2} = (1 - j1) \times \frac{E_2}{\sqrt{2}Z_2} = \frac{(1 - j1)}{\sqrt{2}} I_2 \\ &= \frac{(1 - j1)}{\sqrt{2}} \frac{S_2 \times 10^3}{U_2} \end{aligned} \quad (1-22)$$

如把式 (1-15) 右边的右端矩阵 $\begin{bmatrix} \dot{I}_m \\ \dot{I}_t \end{bmatrix}$ 用 $\begin{bmatrix} \dot{I}_{mt} \\ \dot{I}_{mt} \end{bmatrix}$ 来代替, 则有

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{U_1} \begin{bmatrix} -U_{2m}, & \frac{1}{\sqrt{3}}U_{2t} \\ U_{2m}, & \frac{1}{\sqrt{3}}U_{2t} \\ 0, & -\frac{2}{\sqrt{3}}U_{2t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{mt} \\ \dot{I}_{mt} \end{bmatrix} = \frac{1}{U_1} \begin{bmatrix} -U_{2m} + \frac{1}{\sqrt{3}}U_{2t} \\ U_{2m} + \frac{1}{\sqrt{3}}U_{2t} \\ -\frac{2}{\sqrt{3}}U_{2t} \end{bmatrix} \dot{I}_{mt} \quad (1-23)$$

再把式 (1-22) 中的值代入式 (1-23) 后可得

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{U_1} \begin{bmatrix} -1 + \frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{-\sqrt{3}+1}{\sqrt{3}} \\ 1 + \frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{3}+1}{\sqrt{3}} \\ -\frac{2}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \frac{U_2}{\sqrt{2}} \times \frac{(1-j1)}{\sqrt{2}} \times \frac{S_2 \times 10^3}{U_2}$$

$$\begin{bmatrix} [(-\sqrt{3}+1) - j(-\sqrt{3}+1)]/2 \\ [(\sqrt{3}+1) - j(\sqrt{3}+1)]/2 \\ (-1+j1) \end{bmatrix} \frac{S_2 \times 10^3}{\sqrt{3}U_1} \quad (1-24)$$

故有

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2(-\sqrt{3}+1)^2/2} = \sqrt{2-\sqrt{3}} \\ \sqrt{2(\sqrt{3}+1)^2/2} = \sqrt{2+\sqrt{3}} \\ \sqrt{1+1} = \sqrt{2} \end{bmatrix} \frac{S_2 \times 10^3}{\sqrt{3}U_1} \quad (1-25)$$

从式 (1-25) 的结果可知

$$I_A : I_B : I_C = \sqrt{2-\sqrt{3}} : \sqrt{2+\sqrt{3}} : \sqrt{2}$$

$$= 1 : 3.730 : 2.730$$

因而一次侧将流过很大的不平衡电流，所以这种运行方式必须避免。

上面我们介绍了三相变二相的变压器的电压和电流的计算，可见还是比较复杂的。限于篇幅，本书中就不再对其他特种变压器的电压、电流计算逐个介绍了，如有需要读者可参阅其他有关书刊^[3]。

第四节 做好变压器设计应注意的问题

1. 熟悉国家标准与 IEC 标准

“标准”就是技术立法。任何一台产品是否能够出厂，关键在于它是否符合标准中的各项规定。只有在产品性能满足标准的前提下，讨论其技术经济性能才有意义。因此，要搞好产品设计，首先应当熟悉标准。

按我国现行标准体系，标准分为国家标准（GB）、行业标准（JB 与 ZB 以及 DL）以及企业标准这三个等级。标准又分为强制性与非强制性（又称推荐性标准）两类。另外，根据对外开放的需要，为使我国产品赶上甚至超过世界先进国家的水平，我们还推广采用了 IEC（国际电工委员会）标准。此外，对有些出口产品，有时还应参考采用其他国际先进标准。其中如英国标准（BS），美国标准（ANSI, IEEE），德国标准（DIN, VDE），日本标准（JEC, JEM），前苏联标准（ГОСТ），加拿大标准（CSA），法国标准（NF）