

国外电气工程名著译丛

(英) 马丁 J·希思科特 著
保定天威保变电气股份有限公司
王晓莺 等译

变压器实用 技术大全

(原书第12版)



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国外电气工程名著译丛

变压器实用技术大全

(原书第 12 版)

(英) 马丁 J. 希思科特 著

保定天威保变电气股份有限公司

王晓莺 等译

机械工业出版社

本书包括变压器理论, 变压器设计基础, 变压器基本材料和构造, 变压器试验、运行和维护, 不同用途变压器的特性以及变压器的询价和投标等内容, 并在附录中提供了大量的变压器设计所需的资料。

本书是依据英文版《The J&P Transformer Book》(第 12 版)译出的, 旨在将英国的电力变压器技术介绍给国内读者。

希望本书能使变压器设计工程师、有关院校学习变压器制造的学生以及电力行业从事变压器运行和维护的技术人员从中受益。

The J & P Transformer Book Twelfth edition/Martin J. Heathcote

ISBN 07506 1158 8

© Reed Educational and Professional Publishing Ltd 1998

本书中文简体字版由里德教育专业出版集团授权机械工业出版社独家出版。未经出版者书面许可, 不得以任何方式抄袭、复制或节录本书中的任何部分。

版权所有, 侵权必究。

本书版权登记号: 图字 01-2002-4725 号

图书在版编目(CIP)数据

变压器实用技术大全: 原书第 12 版/(英)希思科特(Heathcote, M.J.)著; 王晓莺等译. —北京: 机械工业出版社, 2004.3

(国外电气工程名著译丛)

书名原文: The J&P Transformer Book

ISBN 7-111-13819-8

I. 变... II. ①希...②王... III. 变压器—技术手册 IV. TM4-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 007317 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 牛新国 赵玲丽 版式设计: 冉晓华 责任校对: 刘志文

封面设计: 陈 沛 责任印制: 施 红

北京铭成印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

1000mm × 1400mm B5·24.625 印张·2 插页·960 千字

0 001—4 000 册

定价: 68.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

译 者 的 话

本书系由英国大型电力变压器制造公司的几位总工程师或总设计师编写的，是一部内容详实丰富的电力变压器著作。本书从 1925 年问世以来共再版 12 次，在第 1 版至 12 版的 75 年间，它像一把火炬照亮着英国电力变压器的发展进程，并为世界各国从事变压器工作的技术人员提供了有益的参考。在 12 次改编过程中，通过不断增添新内容，使其受到读者的普遍欢迎，出现供不应求的状况。

在我国电力事业重大变革的 21 世纪，我们译出此书，旨在将英国的电力变压器技术介绍给国内读者，为变压器制造厂、电力部门及相关科研院所的技术人员和大专院校师生提供一本电力变压器参考书。

本书为第 12 版。由天威保变电气股份有限公司王晓莺翻译第 1、2、3、6、8 章和附录 A~J；杨俊海翻译第 4、7 章；王文昌翻译第 5 章。校核人员有：王文昌第 1、2、3、8 章；王雪刚第 5 章；刘东升第 6 章；张元录第 7 章；王晓莺第 4 章和附录并对全书统审。

我们对原书的明显错误进行了纠正，为小标题加注了章节编号。由于译校者水平所限，不当之处在所难免，请不吝指正。

序 言

《变压器实用技术大全》已经出版 75 年了。75 年来，这本书不仅使在校大学生、年轻工程师改行从事变压器工作，并且使较老的工程师、实习设计人员和几代变压器应用工程师都受益匪浅。在前 11 版中，各版的出版者都尽可能对书中内容进行修订，不断增添新内容，使其满足发展需要。实际上，《变压器实用技术大全》一书仍然处于供不应求状态，这对 75 年来高擎火炬照亮变压器发展进程的出版者和作者是一种称颂。此书的第一版由 H.Morgan Lacey 先生于 1925 年编写，他根据 1922 年发表的《变压器概要》的系列单行本编写而成。当时这本书被作为主要参考书深受读者欢迎，为英国变压器技术发生巨大变革的年代指明了前进方向。在其后的 30 年间，它被重新印刷和多次修订。

本书第 9 版由 A.C.Franklin 先生和他的合作者 S.A.Stignant 先生于 1958 年完成。第 10 版仍由上述两位作者编写，于 1961 年完成，并于 1965 年修订。后来 Stignant 先生退出，Franklin 先生便作为本书第 11 版的主要作者。第 11 版于 1983 年问世，D.P.Franklin 先生对出版予以一定帮助，因此他被指定为合作者。

本书现在为第 12 版，由 Martin J.Heathcote 编写。与以前各版作者不同，Heathcote 先生既具有制造变压器的经验，又有运行方面的经验。他最近的任职单位是英国电力设备公司(PowerGen)，在此之前他任职于英国中央供电局(CEGB)。在电力设备公司工作期间，他积累了英国和海外许多变压器厂家所认可的设计和制造方面的技术经验。他和制造厂以及用户之间有着密切的关系，这使得他能够从他们那里获得大量的信息，从而为本书的改写增添了新的内容。特别是，他对本书的许多章节进行了彻底改写，使其满足发展需要，更能全面反映当前变压器制造的现况，其中包括变压器所用材料的最新进展，具有最低寿命成本的变压器技术的发展趋势等，并且在每个章节中都考虑了与其他设备的相关问题。本书包括了 Heathcote 先生在变压器运行和维护方面的丰富实践经验，还对安装在供电系统和工业电网中的许多特型变压器进行了较全面的分析。

本版包括大量的新技术信息，这些信息来源于变压器厂、电力部门、一些科研院所和工业协会，例如国际大电网会议。希望《变压器实用技术大全》第 12 版中的内容能使现在从事电力的技术人员知识得到更新，并且使年轻的工程师也像他们的前辈受益于前 11 版那样，从第 12 版获得很大的收益。

Dennis J. Allan Feng 教授

第 12 版前言

关于《变压器实用技术大全》的形成历史和各版的多位杰出作者的简历已在本书其他地方做过介绍。从这些介绍中可以看出，作者大多数都曾经是大型变压器制造厂的总工程师或总设计师。这些作者使本书的影响具有两个方面：其一，所有作者均倾向于从制造厂的角度来写；其二，所有作者都有繁忙的“日常工作”，而只能用各自的业务专长和积累的经验去修订和补充前辈作者的论著。这种修订和补充是一项艰巨的工作，因此，从时间上来说，不可能对本书进行改写，虽然本版许多章节完全进行了“修订”，但却并未失去本书 1925 年版本的独特风貌。

本书第 12 版的作者利用编辑第 12 版的机会对本书进行全面改写，并对本书的结构做了明显变动，使本书更适用于变压器用户。

期望本书和以前的版本一样能对刚从事变压器设计的年轻工程师、学习变压器制造的学生以及其他变压器专业的技术人员提供有价值的内容。如果要在本书添加更专门的设计知识，那么必将会使本书的篇幅更长，这样可能会使相当部分的读者产生一种消极的影响。较高级的设计人员可查阅其他文献，例如，国际大电网会议和许多技术学会的科技论文及某些教科书。

本书的基本目的是阐述变压器设计、结构、试验运行和维护原理，以及技术规定和订货，阐述深度足以使从事变压器设计、安装或维护工作的工程师成为“知识受益者”。另外期望，早期版本中一切有价值的运行导则保留下来，融入现代思路，使之更加完善。

在所有希望中，最大的希望是第 12 版能够保留前 11 版的精华，并希望本版的内容将被证明要比前 11 版能为现代变压器工程技术人员提供更多的有价值内容和收获。

MJH

目 录

译者的话

序言

第12版前言

第1章 变压器理论 1

1.1 引言 1

1.2 理想变压器——电压比 1

1.3 漏电抗——变压器阻抗 3

1.4 铁心和绕组的损耗 4

1.5 额定参数 8

1.6 电压调整率 9

第2章 设计基础 11

2.1 变压器类型 11

2.2 相位关系——联结组标号 14

2.3 每匝电压和磁通密度 17

2.4 分接 17

2.5 阻抗 18

2.6 带有第三绕组的多
绕组变压器 21

2.7 零序阻抗 25

2.8 双二次绕组变压器 26

2.9 三绕组变压器的基本情况 27

第3章 基本材料 31

3.1 介电材料 31

3.2 铁心用电工钢片 31

3.3 绕组导线 41

3.4 绝缘材料 46

3.5 变压器油 58

参考文献 79

第4章 变压器结构 80

4.1 铁心结构 81

4.2 变压器绕组 93

4.3 绕组的位置布置 112

4.4 冲击强度 118

4.5 变压器热性能 124

4.6 分接与分接开关 133

4.7 绕组短路力和短路特性 183

4.8 油箱与辅助设备 199

4.9 变压器处理和器身干燥 229

参考文献 232

第5章 变压器试验 250

5.1 制造过程中的试验和质量
保证(QA) 250

5.2 成品试验 253

5.3 重要变压器的附加试验 301

5.4 运输、安装和投运 308

第6章 运行和维护 319

6.1 变压器安装的设计和布局 319

6.2 中性点接地 327

6.3 变压器噪声 338

6.4 并联运行 356

6.5 变压器的瞬变现象 387

6.6 变压器保护 414

6.7 运行维护 465

6.8 在非正常条件下运行 492

6.9 变压器联结方式对三次谐波 电压和电流的影响	511	8.2 投标评估	636
参考文献	530	8.3 经济运行和损耗成本	639
第 7 章 不同用途变压器的 特殊性能	531	附录	648
7.1 发电机变压器	531	附录 A 变压器等效电路	648
7.2 其他电厂用变压器	541	附录 B 变压器相量图的 几何形状	655
7.3 联络变压器和自耦变压器	546	附录 C 变压器圆图	660
7.4 高压直流换流变压器	547	附录 D 变压器电压调整率	663
7.5 移相变压器和正交增压 变压器	555	附录 E 不平衡三相系统的 对称分量	666
7.6 系统变压器	561	附录 F 并联变压器接地故障的 对称分量研究	685
7.7 曲折形联结的接地变压器	565	附录 G 用有限元法计算变压器的 漏磁场和介电应力分布 ...	734
7.8 配电变压器	568	参考文献	757
7.9 斯考特接线变压器和雷布兰 克接线变压器	587	附录 H 与电力变压器有关的 国家和国际标准一览表 ...	757
7.10 整流变压器	593	附录 I 与变压器有关的国际大 电网会议报告和文献表	759
7.11 交流电弧炉变压器	595	附录 J 由英国电气研究协会(ERA) 技术有限公司提出的与变 压器及涌流现象有关的 报告一览表	761
7.12 牵引变压器	601	汉英名词索引(以拼音排序)	766
7.13 发电机中性点接地变压器 ...	605		
7.14 静电除尘用变压器	611		
7.15 串联电抗器	613		
参考文献	617		
第 8 章 变压器询价和投标	618		
8.1 变压器询价	618		

第 1 章 变压器理论

1.1 引言

电力变压器发明于 19 世纪末，它为现代远距离恒定电压交流供电系统的发展奠定了基础。在 19 世纪之前，公用供电的早期阶段里，均采用直流发电系统，人们不得不把发电设备靠近负载地点。

电力工业的先驱们很快认识到，发电装置能够接受发电机大电流、较低电压输出、并将电能转换到用电设备便可输送给用户的电压水平，当然，在那个年代，输电距离仅达 $1.16 \sim 3.22\text{km}$ ($1 \sim 2\text{mile}$)，不过，以当时的标准来看，能达到这种程度就是一种奇迹了。

当然，现代输变电系统地域广阔，这主要归功于现代电力变压器比 19 世纪末的变压器更为有效；对巨大的发电机变压器来说(见图 7-5)，可以将 23.5kV 级 19000A 的输出升压到 400kV (英国的大型发电机)，可将电流降到 1200A 左右，从而输送给数千台昼夜运行、几乎无人看管的配电变压器，为工农业生产和人民生活提供电力。

本书的主要目的是从英国的角度来探讨变压器技术的现状，但在知识快速更新和竞争日趋激烈的情况下，如果没有对大洋彼岸的知识的了解，就不可能立于不败之地，因此希望本书的观点不受国家的局限。

为使读者正确理解作者的意图，需要简单回顾变压器理论和基本公式及简单的相量图。

1.2 理想变压器——电压比

电力变压器一般由两个绕组，即一次绕组和二次绕组组成，这两个绕组通过磁路(铁心等)而发生耦合。将交流电压施加给其中的一个绕组(从定义来说，一般是一次绕组)时，这个绕组中就会有电流流动，从而形成磁动势，因此，铁心中出现交变磁通。这种交变磁通通过两个绕组，使其分别感应出一个电动势。在一次绕组中，这个电动势被称为“反电动势”，如果变压器达到理想状态，一次绕组的反电动势就会抵消施加给一次侧的电压，此时一次绕组没有电流通过。实际上，流动的电流是变压器的励磁电流。在二次绕组中感应出的电动势是二次开路

电压。如果将负载连接到二次绕组,便有二次电流流动,由此电流则产生一个消磁动势,从而破坏了施加给一次侧的电压和反电动势间的平衡。为了恢复平衡,就必须从电源汲取更大的电流来提供一个完全相等的磁动势,这样,当一次侧增加的电流使一次侧和二次侧达到安匝平衡时,电动势便达到平衡。由于在单匝导线上所感应出的电压之间没有差异,所以无论是一次绕组还是二次绕组,由公共磁通在每个绕组感应出的总电压一定与匝数成正比。于是就有大家所熟知的关系式:

$$E_1/E_2 = N_1/N_2 \quad (1-1)$$

根据安匝平衡关系:

$$I_1 N_1 = I_2 N_2 \quad (1-2)$$

式中 E 、 I 和 N ——感应电压、感应电流和匝数,用相应的下标予以区分。

因此,一、二次绕组的电压分别与绕组的匝数成正比,而电流则与匝数成反比(无论是瞬时值还是有效值,这种关系均成立)。

法拉第定律和楞次定律给出了感应电压和磁通之间的关系。法拉第定律指出,感应电动势的大小与磁链变化率成正比;楞次定律指出,如果有电流流动,感应电动势的极性总是抵抗磁链变化,通常由下式表示:

$$e = -N(d\Phi/dt)$$

但在实际变压器中,每匝的感应电压是:

$$E/N = K\Phi_m f \quad (1-3)$$

式中 K ——常数;

Φ_m ——穿过线匝的总磁通最大值(Wb);

f ——电源频率(Hz)。

仅仅需要代入所研究绕组 N 的正确数值。上述表达式对于一次绕组和二次绕组的感应电压均成立。图 1-1 是一台变压器空载(暂且忽略变压器电抗)状态下的相量图,图中示出了符号代表的意义。在变压器的实际设计中,由于一次绕组空载电流引起的微小电压降可忽略不计。

如果假定变压器处于正弦电压下(当然总是这样假定)那么, $K = 4.44$, 式(1-3)则变成

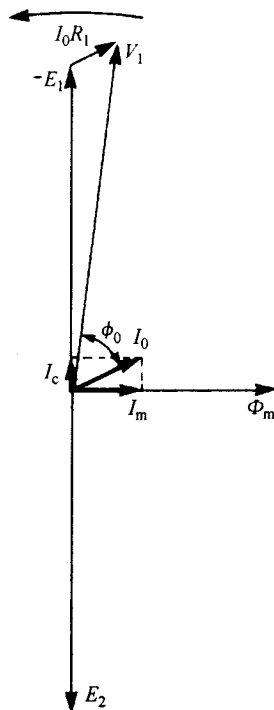


图 1-1 单相变压器开路状态下的相量图(假定匝数比为 1:1)

V_1 ——一次端子电压 E_1 ——一次感应电动势 E_2 ——二次感应电动势
 $I_0 R_1$ ——由 I_0 引起的电阻电压降
 Φ_m ——磁通最大值(峰值) I_0 ——一次空载电流 I_c ——一次铁心损耗电流 I_m ——一次励磁电流
 $\cos \phi_0$ ——一次空载功率因数(漏磁通可忽略不计)

$$E = 4.44 f \Phi N$$

设计人员在进行设计计算时，对每匝电压和铁心磁通密度更感兴趣，而不太注重总磁通，因此代入这两个参数后变成下列形式：

$$E/N = 4.44 B_m A f \times 10^{-6} \quad (1-4)$$

式中 E/N ——每匝电压，两个绕组的每匝电压相同；

B_m ——铁心磁通密度最大值(T)；

A ——铁心净截面积(mm²)；

f ——电源频率(Hz)。

在实际设计中， B_m 由设计人员所选用的铁心材料和变压器运行状态来决定， A 根据制造厂铁心标准截面尺寸来选择，而 f 则必须由用户指定。因此可容易地计算出每匝电压。根据所规定的绕组电压，可容易地确定出每个绕组的匝数。

1.3 漏电抗——变压器阻抗

在引言中已经提到，一、二次绕组之间的电压变换并不理想。首先，由一次绕组产生的磁通并非均通过二次绕组，由此使变压器具有漏电抗。早期的变压器设计人员认为变压器漏电抗是一种缺点，应把它降低到最低，以满足正常的经济约束条件。随着发电站和输变系统规模的扩大和日趋复杂，漏电抗，或按实际术语称为阻抗，因为变压器绕组也具有电阻——被逐渐作为一个能限制故障电流的有用参数。变压器阻抗一般表示为变压器满负载电流下的电压降百分数，这是变压器设计人员对阻抗的习惯表示方式，例如，10%的阻抗意味着满负载电流下的电压降是开路电压的10%，换言之，在不计系统其他阻抗的情况下，在10倍的满负载电流下，变压器的电压降等于系统的总电压。表达式如下：

$$V_Z = \% Z = \frac{I_{FL} Z}{E} \times 100$$

式中 $Z = \sqrt{(R^2 + X^2)}$ ；

R 和 X ——变压器电阻和漏电抗；

I_{FL} 和 E ——一次绕组或二次绕组的满负载电流和开路电压。

当然 R 和 X 自身也可以表示为电压降百分数，下面对此予以说明。百分阻抗的“正常”值会随着变压器额定参数的增大而增大，中型电力变压器的阻抗典型值大约为9%~10%。特殊情况下，某些变压器的阻抗值可以设计为高达22.5%。在下一章将对变压器阻抗做更加详细的阐述。

1.4 铁心和绕组的损耗

变压器也产生损耗。铁心在系统频率下产生交变磁通，需要励磁电流，而励磁就要消耗能量。这便是所谓的铁心损耗，即空载损耗。无论何时，只要变压器被励磁，就会产生铁心损耗。在开路情况下，变压器相当于一个具有高自感的绕组，此时，功率因数平均滞后大约 0.15。变压器二次绕组中负载电流的流动和由此产生的磁动势被完全等效的一次绕组负载电流及其磁动势所平衡，因此可以说明为什么铁心损耗与负载无关。

然而，在电力系统中，电流流动还产生一种与电流大小和系统电阻有关的损耗。

变压器绕组也不例外，它们会使变压器产生负载损耗(或称铜损耗)。负载损耗仅仅在变压器加载时出现，因为空载电流很小，它在绕组中产生的电阻损耗可忽略不计。负载损耗与负载电流的二次方成正比。

电抗性和电阻性电压降及相量图

一次电路中的总电流是一次负载电流和空载电流的相量和。如果不考虑电阻和漏电抗的电压降，那么变压器非感性负载的相位关系可以表示为图 1-2。现在来考虑变压器绕组电阻和漏电抗引起的电压降。首先应当指出，无论各个电压降如何分配，图中相量和的总影响明显处于二次端子上。对每个绕组来说，可以很容易地分开并确定一次和二次绕组的电阻电压降。

由两绕组总漏磁通所导致的电抗性电压降不能够精确地分成两个分量，因为难于确定一次和二次漏磁通间的界线，因此，习惯上规定每个绕组的漏磁通为一半，对电抗性电压降的划分也是如此。图 1-3 示出了功率因数 $\cos\phi_2$ 滞后的带电感性负载的单相变压器相位关系，每个绕组均承担了电阻和漏电抗的电压降。实际上，总电压降的影响是降低二次端子电压。一次绕组承担的电阻和电抗电压降在图中作为增量被加到一次绕组的感应电动势上。

图 1-4 所示的相量关系和图 1-3 所示的相同，只是电阻和电抗电压降标示在二次侧。

当然，由一次电阻和漏电抗产生的电压降可折算到二次电压，即对于升压和降压变压器来说，可以用电压比 n 除一次电压降。换言之，换算后出现在任何一侧绕组的电压降百分数保持相等。

对升压或降压变压器来说，为了把一次电阻值 R_1 或漏电抗值 X_1 折算到二次侧，可以用电压比 n 的二次方除 R_1 和 X_1 。

将阻抗从一侧折算到另一侧的计算公式如下：

令 Z_2 为二次电路的总阻抗，包括漏电抗和负载特征阻抗； Z'_2 为和一次绕组

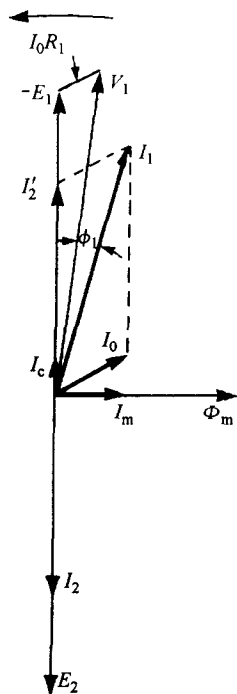


图 1-2 单相变压器相量图(负载功率因数为 1)。

假定匝数比为 1:1)

V_1 —一次端子电压 E_1 —一次感应电动势 E_2 —二次感应电动势 I_0R_1 —由 I_0 引起的电阻电压降 Φ_m —磁通最大值(峰值) I_0 —一次空载电流 I_c —一次铁心损耗电流 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 —总一次电流(包括 I_0 和 I_2') $\cos\phi_1$ —一次总负载功率因数

率因数

注:负载电压降可忽略不计。

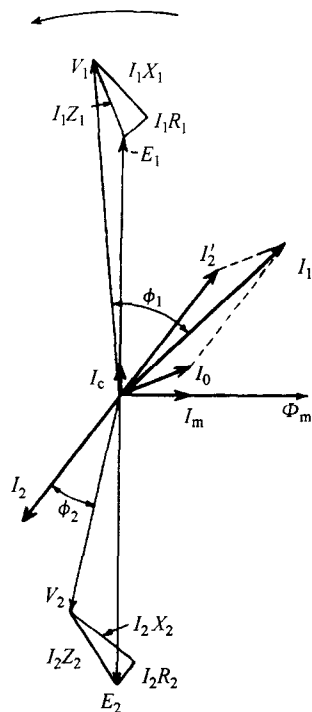


图 1-3 带感性负载的单相变压器相量图(功率因数

$\cos\phi_2$ 滞后。假定匝数比为 1:1。

一次和二次侧均承担电压降)

V_1 —一次端子电压 E_1 —一次感应电动势 V_2 —二次端子电压 E_2 —二次感应电动势 I_1R_1 —一次电阻电压降 I_1X_1 —一次电抗电压降 I_1Z_1 —一次阻抗电压降 I_2R_2 —二次电阻电压降 I_2X_2 —二次电抗电压降 I_2Z_2 —二次阻抗电压降 Φ_m —磁通最大值(峰值) I_0 —一次空载电流 I_c —一次铁心损耗电流 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 —总一次电流(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

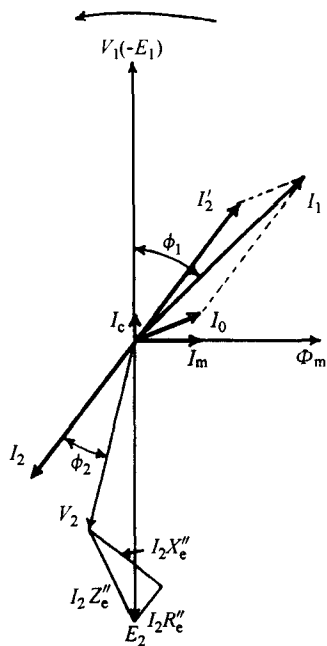


图 1-4 带感性负载的单相
变压器相量图(功率因数

$\cos\phi_2$ 滞后,假定匝数比为 1:1,

电压降标示在二次侧)

V_1 —一次端子电压 E_1 —一次感应电
动势 V_2 —二次端子电压 E_2 —二次

感应电动势 I_2R_e'' —总电阻电压降

I_2X_e'' —总电抗电压降 I_2Z_e'' —总阻抗

电压降 Φ_m —磁通最大值(峰值)

I_0 —一次空载电流 I_c —一次铁心损

耗电流 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 —总一次电流(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

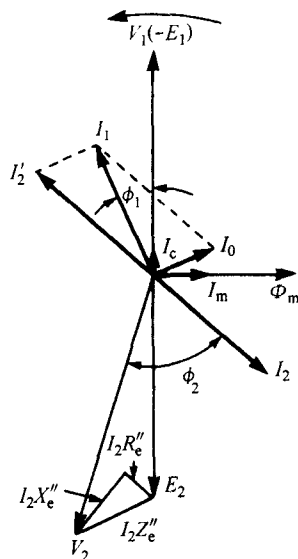


图 1-5 带电容性负载的单相
变压器相量图(功率因数

$\cos\phi_2$ 超前,假定匝数比是 1:1,

电压降折算到二次侧)

V_1 —一次端子电压 E_1 —一次感
应电动势 V_2 —二次端子电压

E_2 —二次感应电动势 I_2R_e'' —总电

阻电压降 I_2X_e'' —总电抗电压降

I_2Z_e'' —总阻抗电压降 Φ_m —磁

通最大值(峰值) I_0 —一次空载电

流 I_c —一次铁心损耗电流 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

有关的 Z_s 的等效值。由此得出：

$$I'_2 = \frac{N_2}{N_1} I_2 = \frac{N_2 E_2}{N_1 Z_s}, \quad E_2 = \frac{N_2}{N_1} E_1$$

因为

$$I'_2 = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \frac{E_1}{Z_s} \tag{1-5}$$

又有

$$V_1 = E_1 + I'_2 Z_1$$

式中

$$E_1 = I'_2 Z'_s$$

所以

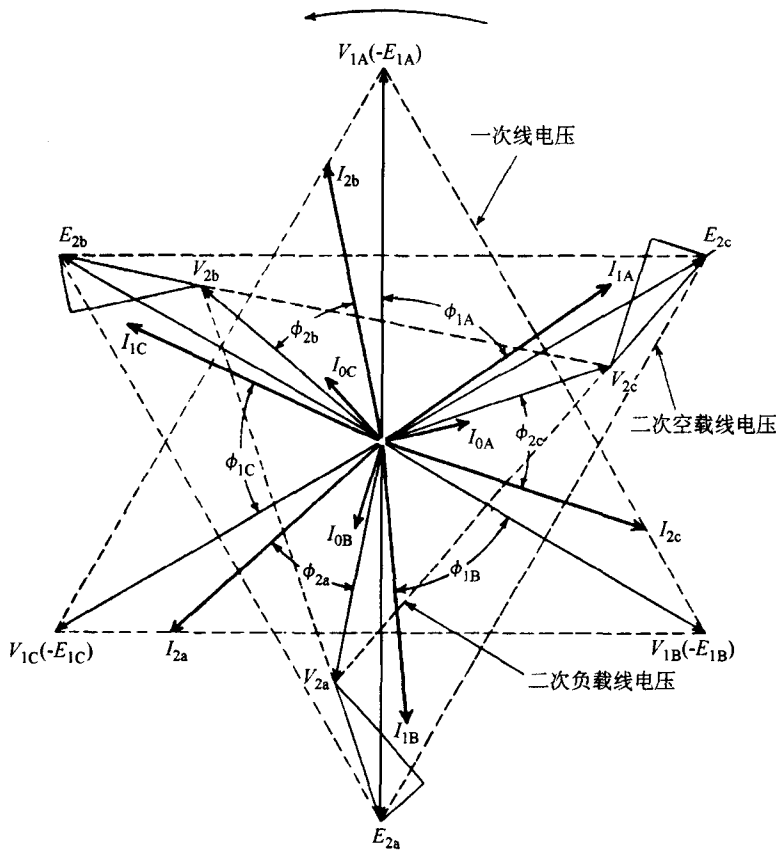


图 1-6 功率因数 $\cos \phi_2$ 滞后的带感性负载的三相变压器相量图
(假定匝数比为 1:1, 电压降折算到二次侧, 各符号含义与图 1-4 相同, 新增下标 A、B、C 表示一次侧的相量, 下标 a、b、c 则表示二次侧的相量)

$$I'_2 = E_1 / Z'_s \quad (1-6)$$

比较式(1-5)和式(1-6)可以看出: $Z'_s = Z_s (N_1/N_2)^2$ 。

因此等效阻抗值可用匝数比 n 的二次方即 $(N_1/N_2)^2$ 乘以实际二次绕组的阻抗而获得。当然, 这种换算方式除了外部负载的电抗和电阻外, 对于二次绕组的漏电抗和二次绕组的电阻以及外部负载的电抗和电阻均适用。

图 1-5 示出了一种有趣的现象, 即当负载功率因数超前时, 二次端子电压上升而不是下降。当超前电流通过感抗时就会出现这种情况。

前面给出的相量图代表的都是单相变压器, 但它们也完全适用于三相变压器, 只需出示各相绕组的情况即可。例如, 图 1-6 示出了三相星形/星形联结变压器的完整相量图, 从图中可以看出, 此图只是图 1-4 的三次重叠, 图中一次和二次相位均准确地与图 1-4 相对应, 但三组相量代表三组相位差为 120° 。

1.5 额定参数

一般来说, 电力变压器的输出容量以兆伏安(MV·A)表示, 尽管配电变压器的输出容量以千伏安(kV·A)表示更为方便。假定均采用正弦函数, 则有以下形式:

单相变压器

$$\text{输出容量(kV}\cdot\text{A)} = 4.44f\Phi_m NI \times 10^{-3}$$

$$\text{输出容量(MV}\cdot\text{A)} = 4.44f\Phi_m NI \times 10^{-6}$$

三相变压器

$$\text{输出容量(kV}\cdot\text{A)} = 4.44f\Phi_m NI \times \sqrt{3} \times 10^{-3}$$

$$\text{输出容量(MV}\cdot\text{A)} = 4.44f\Phi_m NI \times \sqrt{3} \times 10^{-6}$$

在单相变压器表达式中, I 是变压器绕组(线路中)的满负载电流; 对三相变压器来说, I 是与变压器连接的每条线路中的满负载电流。表达式中的电压指变压器线路端子间电压。常数 $\sqrt{3}$ 是星形联结绕组相电压的系数, 是三角形联结绕组相电流的系数, 并考虑了相位移。

用另外一种方式表达变压器输出容量时, 可以认为额定输出容量是额定二次电压(空载) E_2 和额定满负载输出电流 I_2 的乘积。虽然事实上两者并不同时出现, 并且在多相变压器的情况下, 还要乘以相应的一个与相数有关的因数和适当的常数, 该常数取决于所用单位的大小。应当指出, 在空载情况下, 额定一次和二次电压的确可以同时出现。

单相变压器

$$\text{输出容量(kV}\cdot\text{A)} = E_2 I_2 \times 10^{-3}$$

$$\text{输出容量(MV}\cdot\text{A)} = E_2 I_2 \times 10^{-6}$$

三相变压器

$$\text{输出容量(kV}\cdot\text{A)} = E_2 I_2 \times \sqrt{3} \times 10^{-3}$$

$$\text{输出容量(MV}\cdot\text{A)} = E_2 I_2 \times \sqrt{3} \times 10^{-6}$$

星形和三角形联结的三相绕组相电流和线电流、相电压和线电压之间的关系如下：

三相星形联结

$$\text{相电流} = \text{线电流 } I = VA / (E \times \sqrt{3})$$

$$\text{相电压} = E / \sqrt{3}$$

三相三角形联结

$$\text{相电流} = I / \sqrt{3} = VA / (E \times \sqrt{3})$$

$$\text{相电压} = \text{线电压} = E$$

E 和 I 为线电压和线电流

1.6 电压调整率

如前所述，当变压器负载运行时，由于绕组电阻和绕组间漏电抗会引起电压下降，因此需要对变压器二次端子进行电压调整。这两部分电压降在相位上相差 90° ，电阻电压降与负载电流同相。负载功率因数为 1 的电压调整率可用下式计算：

$$\frac{\text{负载损耗} \times 100}{\text{输出}} + \frac{(\text{电抗百分数})^2}{200}$$

电压调整率始终是正值，它表示负载引起的电压降。

若电流负载为 a 倍额定满负载电流，功率因数为 $\cos \phi_2$ ，可以按下式求出近似的电压调整率：

$$\text{电压调整率} = a(V_R \cos \phi_2 + V_X \sin \phi_2) + \frac{a^2}{200}(V_X \cos \phi_2 - V_R \sin \phi_2)^2 \quad (1-7)$$

式中 V_R ——满负载时电阻电压百分数， $V_R = (\text{负载损耗} \times 100) / \text{额定容量(kV}\cdot\text{A)}$ ；

V_X ——电抗百分数， $V_X = I_2 X_e'' \times 100 / V_2$ 。

对大多数实际变压器来说，式(1-7)的计算十分准确；但对于电抗高达 4% 的变压器来说，还可以由下式进一步简化计算：

$$\text{电压调整率} = a(V_R \cos \phi_2 + V_X \sin \phi_2) \quad (1-8)$$

对于具有高电抗值的变压器来说，比如电抗值为 20% 或更高，在计算电压调整率时，有时需按下式增加一个附加项。

$$\text{电压调整率} = a(V_R \cos \phi_2 + V_X \sin \phi_2) + \frac{a^2}{2 \times 10^2} \times$$