

电机与控制

哈尔滨电工学院王振永 冯兆纯 编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $16 \frac{1}{4}$ · 字数 396 千字
1980 年 12 月重庆第一版·1980 年 12 月重庆第一次印刷

印数 00,001—11,000 定价 1.70 元

*

统一书号: 15033·5023

前 言

本书是根据1978年4月在天津召开的高等学校一机部对口专业座谈会确定的计划及同年7月在上海召开的“电子计算机及应用”专业会制定的“电机与控制课程教学大纲”编写的。可以作为“电子计算机及应用”专业的试用教材。

根据“电子计算机及应用”专业的需要,本书内容包括电机学、控制电机、电力拖动、可控硅技术及电力拖动自动控制等几方面必要的知识,内容较杂,涉及面较宽。虽然在方法上我们作了一些尝试,但仅是第一次,有待于在今后的实践中进一步改进提高。书中内容可分为两部分:第一部分包括第一、二章,阐述一般电机及控制电机的原理和性能;第二部分包括第三、四、五章,介绍电动机的选择、控制方式和线路、可控硅整流以及可控硅-电动机调速系统的一般理论问题。

本书第一部分由哈尔滨电工学院王振永同志编写,合肥工业大学范毓礼同志审阅;第二部分由哈尔滨电工学院冯兆纯同志编写,合肥工业大学董亚林同志审阅。初稿完成后,1979年元月在合肥召开了审稿会议。参加会议的有合肥工业大学吴本炎、董亚林同志,东北重型机械学院冯宝珩同志,吉林工业大学韩绍生同志,沈阳机电学院蒋道凯同志。在会上对大纲及书稿提出了许多宝贵意见,在此表示谢意。

在编写过程中,得到哈尔滨电工学院电机系及电机教研室、自控系及自动化教研室有关同志的支持和帮助,王鹏飞同志、关士杰同志审阅了第三、四、五章,提出不少宝贵意见,在此一并致谢。

限于编者水平,谬误不当之处恐所难免,衷心希望读者批评指正。

目

录

绪 言	1	\$2-10 力矩式自整角机的特性	89
第一章 动力用电机	2	\$2-11 力矩式差动自整角机	90
\$1-1 变压器的用途和结构	2	\$2-12 交流测速发电机的原理、性能和结构特点	90
\$1-2 变压器的基本原理	4	\$2-13 异步测速发电机的特性	92
\$1-3 变压器的运行特性	10	\$2-14 伺服电动机的类型和原理	94
\$1-4 感应电动机的作用原理和结构	16	\$2-15 交流伺服电动机的控制	96
\$1-5 交流电机的绕组及其电势和磁势	18	\$2-16 交流伺服电动机的性能	98
\$1-6 感应电动机的运行分析	22	\$2-17 交流力矩电动机	100
\$1-7 感应电动机的机械特性	26	\$2-18 步进电动机	101
\$1-8 感应电动机的工作特性	31	\$2-19 直流测速发电机	102
\$1-9 感应电动机的起动和调速	32	\$2-20 电枢控制的直流伺服电动机	104
\$1-10 感应电动机的制动	36	\$2-21 磁极控制的直流伺服电动机	107
\$1-11 单相感应电动机	38	\$2-22 永磁式直流伺服电动机	108
\$1-12 同步电机的基本原理	41	\$2-23 直流力矩电动机	109
\$1-13 同步发电机的运行特性	42	第三章 电动机的选择与控制	111
\$1-14 同步电动机	48	\$3-1 决定电动机容量的主要因素	111
\$1-15 小型同步电动机	49	\$3-2 电动机容量的选择	115
\$1-16 中频发电机的基本结构和工作原理	51	\$3-3 电动机的种类、电压、转速和结构型式的选择	119
\$1-17 直流电机的基本原理	52	\$3-4 接触器	121
\$1-18 直流发电机的运行特性	53	\$3-5 电磁继电器	125
\$1-19 直流并励电动机的运行特性	58	\$3-6 自动控制线路图及其元件符号	127
\$1-20 直流串励电动机	62	\$3-7 简单控制环节介绍	132
\$1-21 直流电动机的起动	63	\$3-8 感应电动机起动的控制	136
\$1-22 直流电动机的制动	67	\$3-9 实现生产机械上某些控制要求的控制环节	140
\$1-23 直流电机的换向	68	第四章 可控硅及其整流电路	145
第二章 控制用电机	73	\$4-1 可控硅元件	145
\$2-1 概述	73	\$4-2 可控硅的串并联和保护	149
\$2-2 感应解算器的原理和结构	73	\$4-3 单相可控整流电路	154
\$2-3 四绕组感应解算器分析	76	\$4-4 三相半波可控整流电路	160
\$2-4 感应解算器的性能和应用	78	\$4-5 三相桥式可控整流电路	165
\$2-5 感应式电位器	80	\$4-6 可控硅-电动机系统的机械特性	173
\$2-6 四线制数据传输	82	\$4-7 变压器和可控硅容量的决定	180
\$2-7 自整角机的分类和结构	83	\$4-8 可控硅的触发电路	185
\$2-8 控制式自整角机的分析方法和性能	84	第五章 可控硅-电动机调速系统	199
\$2-9 力矩式自整角机的原理	86		

§5-1 概述	199
§5-2 转速负反馈自动调速系统	203
§5-3 电压负反馈和电流正反馈自动调速系统	207
§5-4 电流截止负反馈在自动调速系统中的应用	210
§5-5 调节器	216
§5-6 带有比例积分调节器的调速系统	222

§5-7 带有速度调节器和电流调节器的双闭环调速系统	225
§5-8 带有励磁控制的调速系统	230
附录	238
附一 机电能量转换和电磁转矩	238
附二 平波电抗器的计算	245
常用物理量符号表	254
主要参考书刊	254

绪 言

近些年来,各种新的电工装置如雨后春笋,层出不穷,发展很快。不过在理论和实践上,目前,电机仍然是电工装置中的一种最重要和最基本的形式。作为动力设备,发电机是电能的主要能源;而应用电能,电动机则是主要的设备。在各种控制系统及自动装置中,各类控制电机则作为控制元件,完成控制信号的传递和转换。所以在国民经济各个部门,如动力系统、工矿企业、交通运输、军事国防、空间技术、农业、医疗卫生以及日常生活中的家用电器,几乎没有不和产生与应用电能有密切关系的,人们也就经常接触到各式各样的电机。

随着生产不断发展,对生产机械提出越来越高的要求,从而不断地提高劳动生产率,改善劳动条件,提高产品质量,减低各种消耗,降低生产成本。因此,对驱动生产机械的电机,从用设备简单的人工控制到自动控制,从单机自动化到自动线以至自动化车间和自动化工厂;在控制方式上,由有触点电器到无触点电器的控制,由这些电器元件的断续控制到可控硅系统的连续控制,进而应用数控技术和电子计算机控制,使生产机械能运行在最佳状态,高速度高质量地进行生产。

因此,电机及其控制的有关知识,就成为各种专业人员所应该掌握的了。本课程共分五章,分别阐述动力用电机、控制用电机、电动机的选择和控制、可控硅及其整流电路以及可控硅-电动机调速系统。学习时应注意对基本概念、基本理论及基本方法的掌握,联系实际,完成必要的实践环节。

第一章 动力用电机

§ 1-1 变压器的用途和结构

变压器是根据电磁感应原理，以互感现象为基础，将一种形式电能变换为另一种形式电能的静止装置。一般由二个或二个以上不同匝数的绕组构成，其间无电的联系而只有磁的耦合。电能自一边输入，经过电磁耦合传至另一边。为了加强耦合关系，绕组常绕在铁心上。如图 1-1 所示，一个绕组接于电源，吸收能量，称为原绕组；另一输出电能至负载，称为副绕组。当原绕组接于交流电源，通过交变电流时，在铁心内产生交变磁通 ϕ ，按电磁感应原理，这一磁通在原、副绕组内感生电势 e_1 及 e_2 ，

设原、副绕组匝数各为 W_1 及 W_2 ，则

$$e_1 = -W_1 \frac{d\phi}{dt}$$

$$e_2 = -W_2 \frac{d\phi}{dt}$$

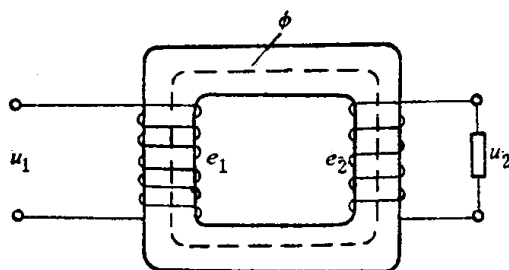


图 1-1 变压器的作用原理

如磁通随时间按正弦律变化，即 $\phi = \Phi_m \sin \omega t$ ，
则

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= -W_1 \omega \Phi_m \cos \omega t = 2\pi f_1 W_1 \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) \\ e_2 &= -W_2 \omega \Phi_m \cos \omega t = 2\pi f_1 W_2 \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

故变压器中感应电势的相位较产生这些电势的磁通滞后 90° 。

交流电常用有效值，对正弦波来说为

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f_1 W_1 \Phi_m = 4.44 f_1 W_1 \Phi_m \\ E_2 &= \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f_1 W_2 \Phi_m = 4.44 f_1 W_2 \Phi_m \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

两式相除

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2}$$

由此可知，变压器绕组中的感应电势与其匝数成比例；而原、副绕组每匝电势是相等的，

$$\text{即 } \frac{E_1}{W_1} = \frac{E_2}{W_2}。$$

当副绕组开路时，由于原绕组里电流很小，其中感应电势 E_1 与端电压 U_1 近乎相等， $U_1 \approx E_1$ 。副绕组电势 E_2 与其开路电压 U_{20} 相等。按国家标准规定，变压器空载时原、副绕组电压之比为变压器的变比（或称变换系数） k ，因此

$$k = \frac{U_1}{U_{20}} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} \quad (1-3)$$

当变压器有负载时，由于 E_2 的作用，副绕组中将流过电流 I_2 。由楞次定律可知，副绕组磁势 I_2W_2 是去磁的，将阻止与其相链的磁通变化。因此，如果两绕组的耦合系数为1(其意义见下节)，则

$$I_1W_1 \approx I_2W_2$$

又如在变换能量过程中无任何损耗，则

$$U_1I_1 \approx U_2I_2$$

因之

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1} = \frac{W_1}{W_2} = k \quad (1-4)$$

故变压器各绕组的电流与电压约成反比的关系。变换一定的功率时，降低电压，则电流增大；电压升高则电流减小。

因此，变压器可用以升高或降低电压，变换电流；有时还用于变换相数，隔离直流电源等。

变压器的主要构成部分是铁心和绕组。对电力变压器来说，还有结构部件、绝缘结构及冷却装置等。

变压器铁心由变压器钢片冲裁后叠成，钢片厚为0.35或0.5毫米，含硅约4~5%两面涂有绝缘漆或形成氧化膜以减少损耗。由于铁心形式不同，变压器可分为铁心式和铁壳式两种。图1-2示单相及三相铁心式变压器，绕组绕在铁心柱上。铁壳式变压器则铁心包围在绕组外面，好象铁壳，如图1-3，多用于小容量及特种变压器里。

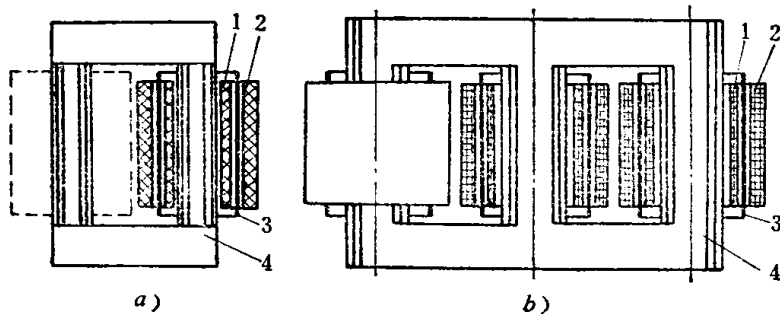


图 1-2 铁心式变压器

a)单相铁心式 b)三相铁心式

1—低压绕组 2—高压绕组 3—绝缘筒 4—铁心

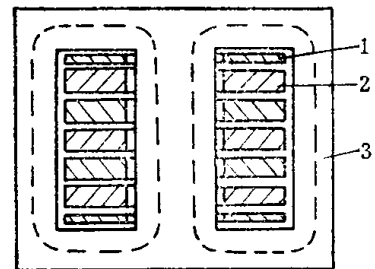


图 1-3 单相铁壳式变压器

1—低压绕组 2—高压绕组 3—铁心

变压器绕组按高压和低压线圈的布置方式可分为同心式和交叠式两种。同心式绕组做成同心圆筒，将低压绕组靠近铁心柱安置，以便于绝缘，外面放高压绕组。高压和低压绕组间用电木纸板制成绝缘筒隔开，如图1-2所示。

交迭式绕组是将高压及低压绕组做成盘形线圈，交替叠装在铁心柱上，如图1-3所示。高、低压绕组间用绝缘圆盘隔开。

小型变压器常是空气自冷式的，大中型变压器也有制成干式的，但大多均为油浸式的，将变压器铁心及绕组置于油箱内，依靠油的循环以散热。图1-4为油浸式变压器的结构及零部件示意图。

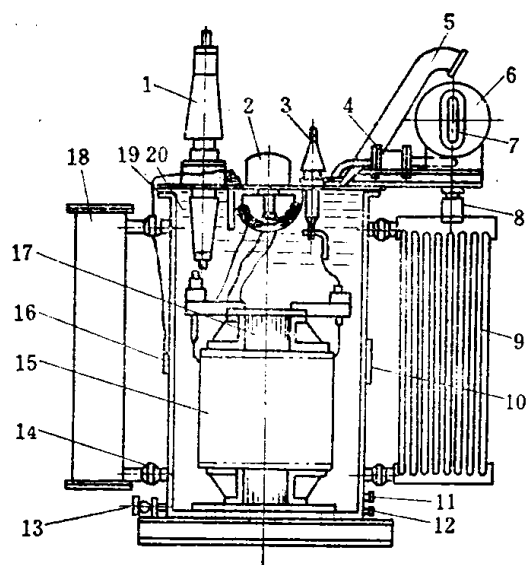


图 1-4 油浸变压器结构示意图

1—高压套管 2—分接开关 3—低压套管 4—气体继电器 5—安全气道 6—贮油柜 7—油表 8—吸湿器 9—散热器 10—铭牌 11—接地螺栓 12—油样活门 13—放油阀门 14—活门 15—绕组 16—信号温度计 17—铁心 18—净油器 19—油箱 20—变压器油

$\phi_{\sigma 1}$ ——仅交链 W_1 而与 W_2 无关的磁通, 或称为原绕组的漏磁通。

当副绕组 W_2 中有电流 i_2 以后, 其磁势也建立磁场, 产生磁通, 交链两绕组, 绕组 1 中的电流也将增大, 因此, 由各个绕组共同产生互磁通。当然, 这时变压器实际存在的磁场是很复杂的, 各绕组中的瞬时电流随时间在变化, 有时这一电流大于那一电流, 有时则反之, 磁通的分布也随之变化。其中有一部分磁通经过空气自行闭合, 即只交链一个绕组, 而与另一绕组无关, 是为漏磁通。工程上, 常引入等效磁场以便于分析, 如图 1-6 所示, 其中

$$\phi_{22} = \phi_{12} + \phi_{\sigma 2} \quad (1-7)$$

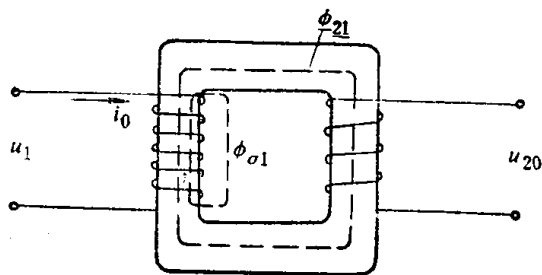


图 1-5 空载变压器

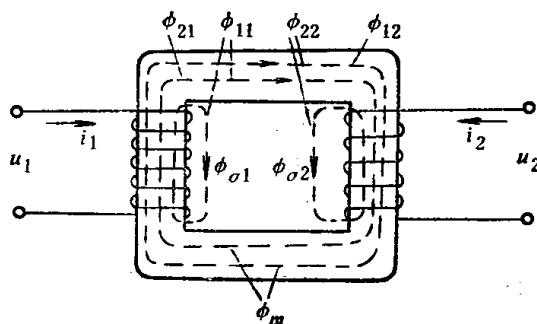


图 1-6 变压器的等效磁场分布

是由电流 i_2 所生, 其中一部分 ϕ_{12} 与两个绕组都交链, 而另一部分 $\phi_{\sigma 2}$ 只与副绕组本身相交链, 即漏磁通。相应的磁链为

$$\psi_{12} = L_{12} i_2 = W_1 \phi_{12}$$

$$\psi_{\sigma 2} = L_{\sigma 2} i_2 = W_2 \phi_{\sigma 2}$$

$$\psi_{22} = L_{22} i_2 = W_2 \phi_{22}$$

电力变压器的额定功率 (容量) 是指额定情况下 (在额定电压和额定频率下) 副绕组端输出视在功率的保证值, 以伏安或千伏安为单位。

§ 1-2 变压器的基本原理

变压器各绕组间的互相作用及能量转移关系是基于磁耦合或互感作用。如图 1-5, 当 $i_2 = 0$ 时, 即所谓空载情况, 这时 $i_1 = i_0$, 即原绕组中流过电流 i_0 , 由其产生的原绕组磁通为

$$\phi_{10} = \phi_{21} + \phi_{\sigma 1} \quad (1-5)$$

在副绕组中则为

$$\phi_{02} = \phi_{21} \quad (1-6)$$

式中 ϕ_{21} ——交链 W_1 及 W_2 两绕组的磁通, 即互磁通;

相应的电感则为

$$\left. \begin{aligned} L_{12} &= \frac{W_1 \phi_{12}}{i_2} = \frac{W_1 W_2 i_2 A_m}{i_2} = W_1 W_2 A_m \\ L_{\sigma 2} &= \frac{W_2 \phi_{\sigma 2}}{i_2} = W_2^2 A_{\sigma 2} \\ L_{22} &= \frac{W_2 \phi_{22}}{i_2} = W_2^2 (A_m + A_{\sigma 2}) = L_{m2} + L_{\sigma 2} \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

式中 A_m ——互磁通路径的磁导。

同理，对绕组 1 则为

$$\left. \begin{aligned} \phi_{11} &= \phi_{21} + \phi_{\sigma 1} \\ \psi_{21} &= L_{21} i_1 = W_2 \phi_{21}, & L_{21} &= W_1 W_2 A_m \\ \psi_{\sigma 1} &= L_{\sigma 1} i_1 = W_1 \phi_{\sigma 1} & L_{\sigma 1} &= W_1^2 A_{\sigma 1} \\ \psi_{11} &= L_{11} i_1 = W_1 \phi_{11} & L_{11} &= W_1^2 (A_m + A_{\sigma 1}) = L_{m1} + L_{\sigma 1} \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

又 ϕ_1 ——所有绕组共同产生的与绕组 1 交链的总磁通；

ϕ_2 ——所有绕组共同产生的与绕组 2 交链的总磁通。

由图，对两个绕组的变压器来说，

$$\left. \begin{aligned} \phi_1 &= \phi_{11} + \phi_{12} \\ \phi_2 &= \phi_{22} + \phi_{21} \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

如由功率转移的观点来看，只有同时交链两个绕组的那些互磁通才参与能量变换：

$$\left. \begin{aligned} \phi_1 &= \phi_{12} + \phi_{21} + \phi_{\sigma 1} = \phi_m + \phi_{\sigma 1} \\ \phi_2 &= \phi_{21} + \phi_{12} + \phi_{\sigma 2} = \phi_m + \phi_{\sigma 2} \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$

同理

$$\text{其中} \quad \phi_m = \phi_{12} + \phi_{21} = A_m (W_2 i_2 + W_1 i_1) \quad (1-12)$$

就是互磁通，是两个绕组磁势共同产生的。由式(1-8)及(1-9)可知

$$L_{21} = L_{12} = W_1 W_2 A_m = L_m \quad (1-13)$$

要考虑漏磁通的效应，可引入耦合系数，它表示两绕组的耦合程度，或两绕组磁通互链的紧密程度：

$$\tau_1 = \frac{\phi_{21}}{\phi_{11}} = \frac{L_m i_1 / W_2}{L_{11} i_1 / W_1} = \frac{L_m}{L_{11}} \frac{W_1}{W_2}$$

$$\tau_2 = \frac{\phi_{12}}{\phi_{22}} = \frac{L_m i_2 / W_1}{L_{22} i_2 / W_2} = \frac{L_m}{L_{22}} \frac{W_2}{W_1}$$

令

$$\tau^2 = \tau_1 \tau_2 = \frac{L_m^2}{L_{11} L_{22}}$$

则耦合系数 τ 为

$$\tau = \sqrt{\tau_1 \tau_2} = \frac{L_m}{\sqrt{L_{11} L_{22}}} \quad (1-14)$$

一般说来，

$$0 < \tau < 1$$

漏磁电感

$$L_{\sigma 1} = \frac{W_1 \phi_{\sigma 1}}{i_1} = \frac{W_1 (\phi_{11} - \phi_{21})}{i_1} = L_{11} - \frac{W_1}{W_2} L_{21} = L_{11} (1 - \tau_1)$$

$$L_{\sigma 2} = \frac{W_2 \phi_{\sigma 2}}{i_2} = L_{22} - \frac{W_2}{W_1} L_{12} = L_{22} (1 - \tau_2)$$

原、副绕组电流和磁通随时间变化，在原绕组中感应的电势为

$$\begin{aligned} e_{1t} &= -W_1 \frac{d}{dt} (\phi_{\sigma 1} + \phi_{21} + \phi_{12}) \\ &= -\frac{d}{dt} (W_1^2 A_{\sigma 1} i_1 + W_1^2 A_m i_1 + W_1 W_2 A_m i_2) \\ &= -\frac{d}{dt} (L_{11} i_1 + L_m i_2) \end{aligned}$$

或

$$\begin{aligned} e_{1t} &= -\frac{d}{dt} (L_{\sigma 1} i_1 + \frac{W_1}{W_2} W_1 W_2 A_m i_1 + W_1 W_2 A_m i_2) \\ &= -\frac{d}{dt} (L_{\sigma 1} i_1 + \frac{W_1}{W_2} L_m i_1 + L_m i_2) \\ &= -\frac{d}{dt} \left[L_{\sigma 1} i_1 + \frac{W_1}{W_2} L_m (i_1 + \frac{W_2}{W_1} i_2) \right] \end{aligned}$$

以上两个式子虽然都是由同样的磁链变化关系导出的，但是意义不同。将磁通对时间的导数代换为电流对时间的导数，在一般的网络基础上分析电路是方便的。前一式应用自感和互感的概念，条理清楚，计算方便，但必须 L_{11} 、 L_{22} 及 L_m 均为常数，这对空心变压器或未饱和的铁心变压器是符合的。在实际的铁心变压器中，这些参数随电流的大小而变化，视饱和程度而有不同数值。由工程的观点，方程式中的一些常数应该可以用试验方法准确的测得。因此，对电力变压器常用后一式，引入漏电感及漏抗的概念，且漏磁路径为空气，所以漏感可认为是恒定的。在原绕组电路中，外加电压应平衡所交链的磁通产生的电势并供给电阻压降，故

$$\begin{aligned} u_1 &= r_1 i_1 + \frac{d\psi_1}{dt} \\ &= r_1 i_1 + L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} + \frac{W_1}{W_2} L_m \left(\frac{di_1}{dt} + \frac{W_2}{W_1} \frac{di_2}{dt} \right) \end{aligned} \quad (1-15)$$

若电流及电压均按正弦变化，写成复量方程式

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= r_1 \dot{I}_1 + j\omega L_{\sigma 1} \dot{I}_1 + j\omega L_m \frac{W_1}{W_2} \left(\dot{I}_1 + \frac{W_2}{W_1} \dot{I}_2 \right) \\ &= r_1 \dot{I}_1 + jx_{\sigma 1} \dot{I}_1 + jx_m (\dot{I}_1 + \dot{I}_2') \end{aligned} \quad (1-16)$$

式中 $x_{\sigma 1} = \omega L_{\sigma 1} = \omega (L_{11} - \frac{W_1}{W_2} L_m)$ ——原绕组漏抗；

$x_m = \omega L_m \frac{W_1}{W_2} = \omega \left(W_1 W_2 A_m \frac{W_1}{W_2} \right) = \omega (W_1^2 A_m)$ ——互感抗，或称激磁电抗；

$\dot{I}_2' = \dot{I}_2 \frac{W_2}{W_1}$ ——用原绕组匝数表示的副绕组电流，或称折算至原边的副电流，且 $\dot{I}_2' W_1 = \dot{I}_2 W_2$ 。

式 (1-15) 中最后一项即为 $W_1 \frac{d}{dt} (\phi_{21} + \phi_{12}) = W_1 \frac{d\phi_m}{dt}$ ，对正弦量来说，常用互感电势

E_1 表示, 在实际应用中, 用电势的概念是方便的。互磁通 ϕ_m , 由式 (1-12) 可知是由原、副绕组磁势 $\dot{I}_1 W_1 + \dot{I}_2 W_2$ 共同产生的, 或写作

$$-\dot{E}_1 = jx_m(\dot{I}_1 + \dot{I}_2') = jx_m \dot{I}_0 \quad (1-17)$$

式中
$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2' = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \frac{W_2}{W_1} \quad (1-18)$$

或
$$\dot{I}_0 W_1 = \dot{I}_1 W_1 + \dot{I}_2 W_2 \quad (1-19)$$

这就是变压器的磁势平衡方程式。

同理, 对副绕组来说, 电压方程可写作

$$\begin{aligned} u_2 &= -r_2 i_2 - \frac{d\psi_2}{dt} \\ &= -r_2 i_2 - L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt} - \frac{W_2}{W_1} L_m \left(\frac{di_2}{dt} + \frac{W_1}{W_2} \frac{di_1}{dt} \right) \end{aligned}$$

写作复量方程式则为

$$\begin{aligned} \dot{U}_2 &= -r_2 \dot{I}_2 - j\omega L_{\sigma 2} \dot{I}_2 - j\omega L_m \frac{W_2}{W_1} \left(\dot{I}_2 + \frac{W_1}{W_2} \dot{I}_1 \right) \\ &= -r_2 \dot{I}_2 - jx_{\sigma 2} \dot{I}_2 - jx_m \frac{W_2}{W_1} \left(\dot{I}_2 + \frac{W_1}{W_2} \dot{I}_1 \right) \end{aligned}$$

两边均乘以 $\frac{W_1}{W_2}$, 则得

$$\dot{U}_2 \frac{W_1}{W_2} = -\left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2 r_2 \dot{I}_2 \frac{W_2}{W_1} - jx_{\sigma 2} \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2 \dot{I}_2 \frac{W_2}{W_1} - jx_m \left(\dot{I}_2 \frac{W_2}{W_1} + \dot{I}_1 \right)$$

或
$$\dot{U}_2' = -r_2' \dot{I}_2' - jx_{\sigma 2}' \dot{I}_2' - jx_m (\dot{I}_2' + \dot{I}_1) \quad (1-20)$$

式中
$$\left. \begin{aligned} U_2' &= U_2 \frac{W_1}{W_2} \\ I_2' &= I_2 \frac{W_1}{W_2} \\ r_2' &= r_2 \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2 \\ x_{\sigma 2}' &= x_{\sigma 2} \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2 \end{aligned} \right\} \quad (1-21)$$

其中表示各个量的字母右上方加撇 (') 的是折算量, 将副边的量折算至原边, 以去除式中的匝数关系。一般说来, 为了分析计算方便, 电机理论中常将一些量进行折算。绕组的折算常将两个或几个绕组折算成同样的匝数, 即分别乘以匝数比 (如 $\frac{W_1}{W_2}$ 或称折算系数) 即成为 1:1 的变压器, 这就是经过折算用匝数为 W_1 的等效绕组来代替副绕组。为了不改变实际的电磁关系, 在折算前后, 必须使传递的功率、损耗、磁场储能及磁势平衡关系等维持不变。例

如令 $k = \frac{W_1}{W_2}$, 由式 (1-21)

$$I_2'^2 r_2' = -\frac{I_2^2}{k^2} r_2 k^2 = I_2^2 r_2$$

$$U_2' I_2' = U_2 k \cdot \frac{I_2}{k} = U_2 I_2$$

副绕组折算后变为 W_1 匝, 故 $E_2' = k E_2 = E_1$

或者说, 副绕组每匝电势为 $\frac{E_2}{W_2}$, 折算为 W_1 匝后则为

$$E_2' = \frac{E_2}{W_2} \times W_1 = E_1$$

因此, 可维持变压器的性能不变。

副绕组折算以后, 我们可以根据式 (1-16), (1-18) 及 (1-20) 画出变压器的向量图, 清晰明确地表示出变压器中各个量之间的关系。设变压器接有感性负载 $Z_L = R_L + jX_L$, 因为是在副边, 所以也要折算到原边, 故

$$\dot{U}_2' = \dot{I}_2' Z_L' = \dot{I}_2' R_L' + j \dot{I}_2' X_L' \quad (1-22)$$

设主磁通向量 $\dot{\Phi}_m$ 取水平方向, 如图 1-7 所示, 由式 (1-20) 画 $\dot{E}_1$ 及 $\dot{E}_2'$ 较 $\dot{\Phi}_m$ 滞后 90° 。而 $\dot{I}_2'$ 则较 $\dot{E}_2'$ 滞后 ψ_2 角, $\psi_2 = \tan^{-1} \frac{x_{o2}' + X_L'}{r_2' + R_L'}$ 。将 $\dot{E}_2'$ 加上 $-\dot{I}_2' r_2'$ 及 $-j x_{o2}' \dot{I}_2'$ 即可得出副边电压的向量 $\dot{U}_2'$, 其中 $-\dot{I}_2' r_2'$ 与电流 $\dot{I}_2'$ 反向, 而 $-j \dot{I}_2' x_{o2}'$ 应较 $\dot{I}_2'$ 滞后 90° 。反过来说, 就是将 $\dot{U}_2'$ 加上 $\dot{I}_2' r_2'$ 及 $j \dot{I}_2' x_{o2}'$ 即得 $\dot{E}_2'$ 。再由式 (1-18), 将 $\dot{I}_2'$ 反向并与空载电流 $\dot{I}_0$ 相加即得原边电流 $\dot{I}_1$ 。最后将 $\dot{E}_1$ 反向并和 $\dot{I}_1 r_1$ 及 $j \dot{I}_1 x_{o1}$ 相加, 即得原边的外加电压 $\dot{U}_1$ 。 $\dot{U}_1$ 与 $\dot{I}_1$ 的相位角 φ_1 即为变压器的功率因数角。

以上平衡方程式及向量图是对单相变压器或平衡的三相变压器的一相来讨论的。图 1-7 中的阻抗压降画得比实际比例要大。

一般说来, 变压器的原绕组和副绕组之间只有磁的耦合而无电的连接, 这就使讨论变压器运行过程和特性产生困难。为了使讨论简化, 计算方便, 可将变压器的问题化为电路问题, 用电的连接来替代磁的耦合, 这就是等效电路的方法。等效电路的四个端点与变压器的四个出线端 (单相的或三相中的一相) 两两等值, 完全与实际的变压器等效, 有效地表示出变压器的各种性能。图 1-8 表示一单相变压器, 若将绕组中的电阻及漏磁通作用从原、副绕组中移出来就成为图 1-9a) 所表示的了。漏磁的作用, 如前所述, 相当于电抗的作用, 所以可用电抗 x_{o1} 及 x_{o2} 表示, 图中 ab 及 cd 绕组中只有主磁通作用及其所感应产生的电势 E_1 及 E_2 。再进一步化简, 可在折算的基础上, 将副边折算到原边去, 使 ab 两端和 cd 两端有相同

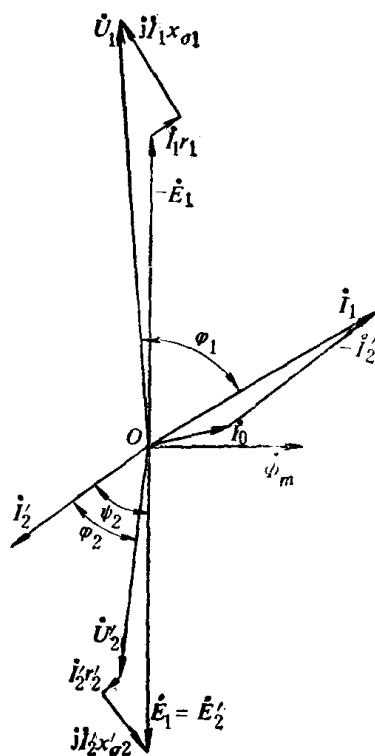


图 1-7 变压器向量图

的电位, 因此可将 a 与 c 及 b 与 d 联结在一起, 使原副绕组间的磁耦合变成电连接如图1-9b)。合成在一起的中间支路将通过空载电流 I_0 以对应于磁势或电流方程式, 这一支路称为激磁分路。因为铁心内还有磁滞和涡流损耗, 所以空载电流 I_0 中既有无功分量产生磁通, 又有有功分量以供给铁心损耗。因此, 中间支路用串联的 r_m 和 x_m 表示, 如图1-9c), 相应的式(1-17)应改作:

$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_0 Z_m = \dot{I}_0 (r_m + jx_m) \quad (1-23)$$

实际上, 图1-9c)右边表出式(1-20), 左

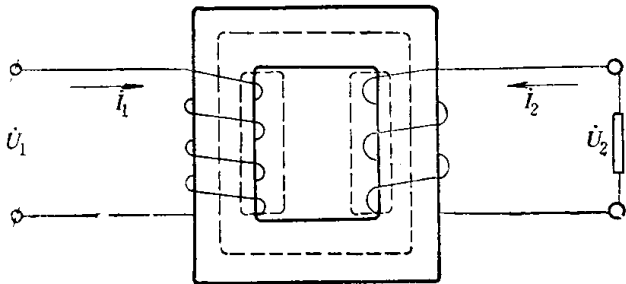


图 1-8 单相变压器

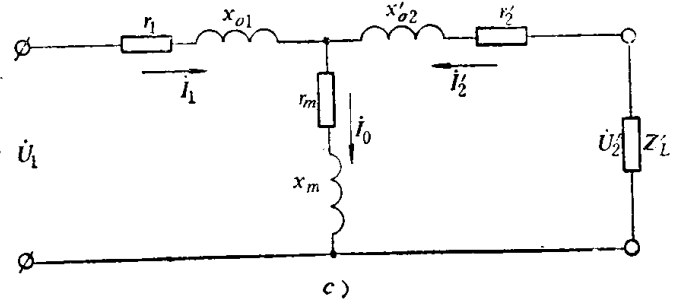
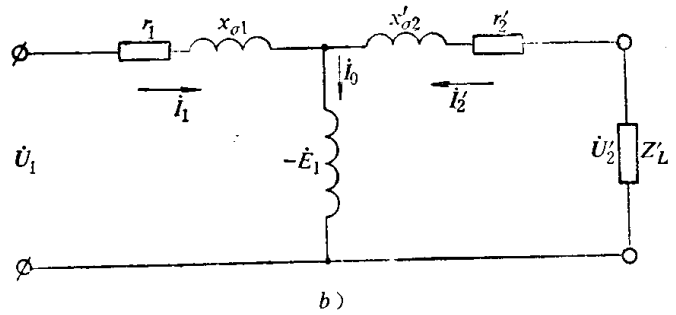
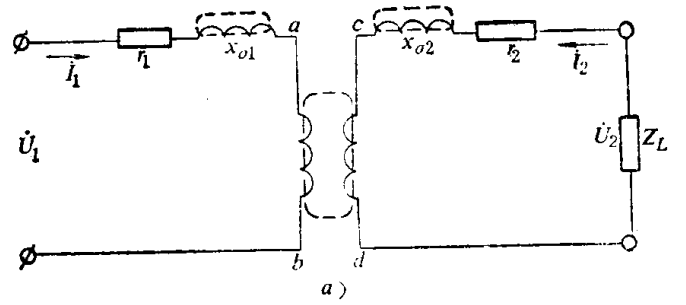


图 1-9 变压器的等效电路

边表出式(1-16), 而中间则表示式(1-23)。因此由以上三式不仅可画出向量图, 还可得出等效电路。实际上, 因

$$\dot{I}_0 = \frac{-\dot{E}_1}{Z_m}, \quad \dot{I}'_2 = \frac{\dot{E}'_2}{Z'_2 + Z'_L} = \frac{\dot{E}_1}{Z'_2 + Z'_L}$$

而

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2) = \frac{-\dot{E}_1}{Z_m} + \frac{-\dot{E}_1}{Z'_2 + Z'_L}$$

由此

$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_1 \left(\frac{1}{\frac{1}{Z_m} + \frac{1}{Z'_2 + Z'_L}} \right)$$

又

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{I}_1 Z_1 + (-\dot{E}_1) = \dot{I}_1 Z_1 + \dot{I}_1 \left(\frac{1}{\frac{1}{Z_m} + \frac{1}{Z'_2 + Z'_L}} \right) \\ &= \dot{I}_1 \left(Z_1 + \frac{1}{\frac{1}{Z_m} + \frac{1}{Z'_2 + Z'_L}} \right) \end{aligned} \quad (1-24)$$

由上式可见, 如用电路来表示变压器中的电磁关系, 应该是阻抗 Z'_L 与 Z'_2 相串联以后再与 Z_m 并联, 最后与 Z_1 串联接于 $\dot{U}_1$ 上, 与图1-9c)完全一致。

为了便于计算变压器的性能, 可以将等效电路和向量图加以简化。例如将激磁分路往前

移, 如图1-10所示。对电力变压器来说, 这样做造成的误差很小, 因为 $Z_1 \ll Z_m$, 在满载情况下, Z_1 的压降也很小 ($I_{1N} Z_1 \approx 2.5 \sim 3.5\% U_{1N}$)。由电压方程可知

$$\dot{E}_1 = \dot{E}_2' = \dot{U}_2' + \dot{I}_2'(r_2' + jx_2')$$

又

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$$

因在这一情况下, 流过 Z_1 的电流为 $-\dot{I}_2'$, 而不再是 $\dot{I}_1$, 故

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -(\dot{U}_2' + \dot{I}_2' Z_2') - \dot{I}_2' Z_1 \\ &= -\dot{U}_2' - \dot{I}_2' (Z_2' + Z_1) = -\dot{U}_2' - \dot{I}_2' Z_{sh} \end{aligned} \quad (1-25)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} Z_{sh} &= r_{sh} + jx_{sh} \\ r_{sh} &= r_1 + r_2' \\ x_{sh} &= x_{\sigma 1} + x_{\sigma 2}' \end{aligned} \right\} \quad (1-26)$$

分别称为短路阻抗、短路电阻和短路电抗, 表征变压器短路时的性能, 可由短路试验求出。

如再简化, 则可略去 $\dot{I}_0$, 此时

$$\dot{I}_1 = -\dot{I}_2'$$

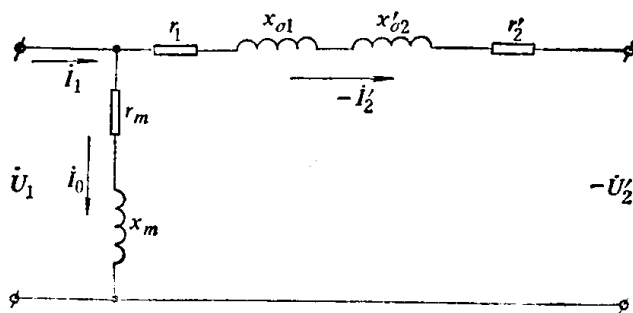


图 1-10 变压器的近似等效电路

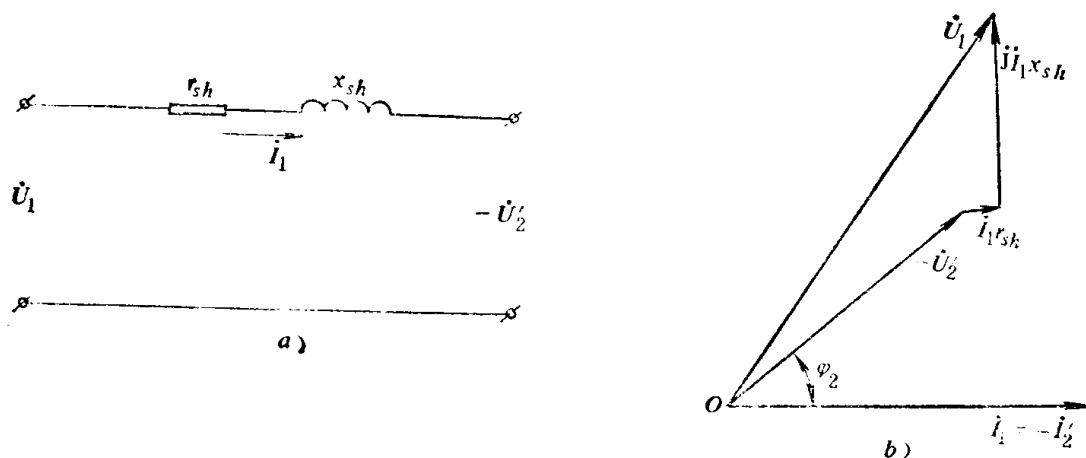


图1-11 变压器的简化等效电路及向量图

a) 等效电路 b) 向量图

相应的等效电路和向量图如图1-11a)、b)所示。

§ 1-3 变压器的运行特性

变压器的运行特性主要有外特性和效率特性。外特性是在电源电压及频率一定时, 对一

定功率因数的负载，当负载电流改变时，副端电压的变化情况。

$$U_2 = f(I_2)$$

变压器的电压变化率是变压器运行上的一个重要因素。有负载后，在原边外加电压恒定的情况下，副边端电压较空载时略有变化，这是由于变压器绕组的阻抗压降 ($I_2 Z_{sh}$) 的缘故，副边电压由空载到负载后的变化，通常用额定电压的百分数表示，即为电压变化率，

$$\Delta U = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \times 100\% = \frac{U_{1N} - U_2}{U_{1N}} \times 100\%$$

变压器的电压变化率不但由负载电流的大小决定，而且还随负载的性质，即功率因数而不同，其值可由图1-12求出近似的表示式。如图所示，

$$U_1 - U_2 \approx CD$$

但满载时 $CD = I_{1N} r_{sh} \cos \varphi_2 + I_{1N} x_{sh} \sin \varphi_2$

故
$$\Delta U \approx \frac{I_{1N} r_{sh}}{U_{1N}} \cos \varphi_2 + \frac{I_{1N} x_{sh}}{U_{1N}} \sin \varphi_2$$

$$= u_r \cos \varphi_2 + u_x \sin \varphi_2 \quad (1-27)$$

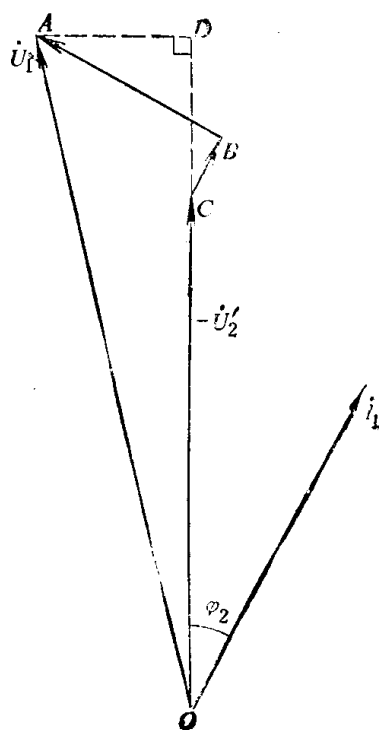


图1-12 求 ΔU 的变压器简化向量图

式中 $u_r = \frac{I_{1N} r_{sh}}{U_{1N}}$, $u_x = \frac{I_{1N} x_{sh}}{U_{1N}}$ 分别为变压器电阻压降和电抗压降的标么值，乘以 100% 即得百分值。

式 (1-27) 表示在额定负载时的电压变化率，在非额定负载时可以引入负载系数 β 。负载系数是某一负载下的视在功率或电流对额定负载时的视在功率或电流之比，即

$$\beta = \frac{S}{S_N} = \frac{I}{I_N}$$

故任意负载下的电压变化率为

$$\Delta U \approx \beta(u_r \cos \varphi_2 + u_x \sin \varphi_2) \quad (1-28)$$

电压变化率准确的计算式为

$$\Delta U = \beta(u_r \cos \varphi_2 + u_x \sin \varphi_2) + \frac{\beta^2}{200} (u_r \cos \varphi_2 - u_x \sin \varphi_2)^2 \quad (1-29)$$

由以上可知，对一定的功率因数，电压变化率随负载的增加而增大；当负载一定时，则将随功率因数减小而增大，分别如图1-13及1-14所示。由图可知，在容性负载 ($\varphi_2 < 0$) 下，电压变化率为负 ($u_r \cos \varphi_2 < |u_x \sin \varphi_2|$)，这说明容性负载时，副端电压较其在空载时高。感性负载时，电压变化率恒为正，纯电阻负载下的电压变化率最小。由这些情况可得变压器的外特性曲线 $U_2 = f(I_2)$ ，如图1-15。

变压器的效率为输出功率 P_2 与输入功率 P_1 之比，

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% \quad (1-30)$$

变压器在变换能量过程中有功率损耗，这主要是铁损耗和铜损耗。铁损耗包括铁心中的

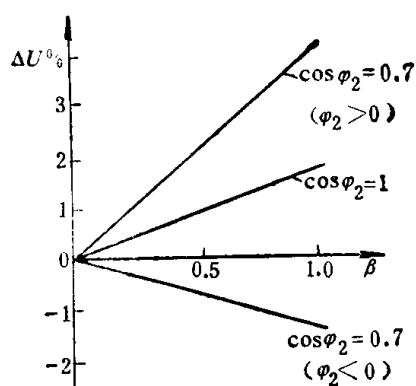
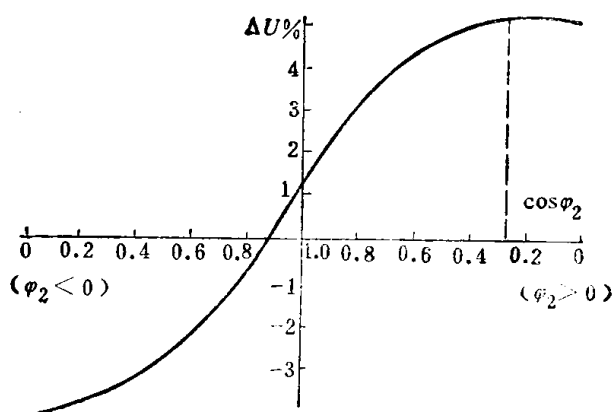
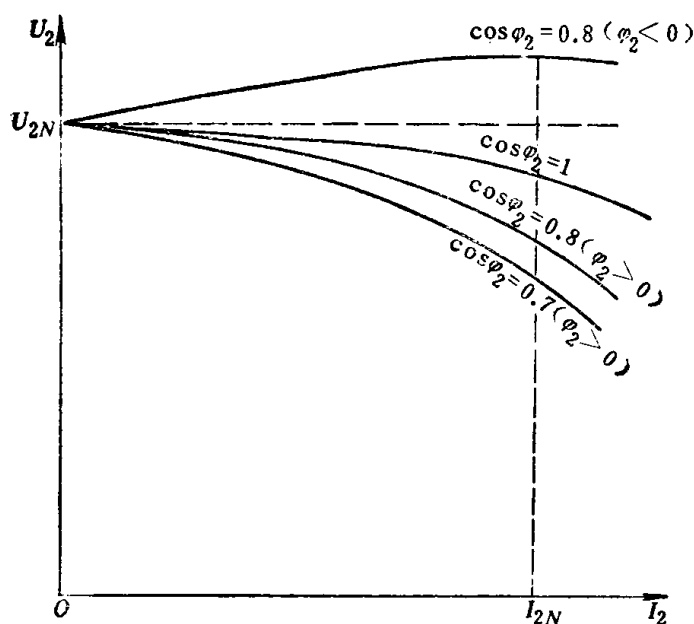
图1-13 $\cos\varphi_2$ 一定时 ΔU 与负载大小的关系图1-14 负载一定时, ΔU 与 $\cos\varphi_2$ 的关系

图1-15 变压器的外特性曲线

磁滞和涡流损耗, 以及由于磁通分布不均, 钢片在冲剪时所受的影响, 螺杆、油箱等受磁通影响所产生的一些附加损耗。这些损耗主要与磁通密度、电源频率及铁心重量等有关。当电源频率一定时, 铁损耗与最大磁通密度 B_m 的平方成比例。对已制成的变压器, 铁心面积一定, 所以铁损耗

$$p_{Fe} \propto B_m^2 \propto \Phi_m^2 \propto E_1^2 \approx U_1^2$$

变压器的铁损耗与其容量相比较是很小的。但一般电力变压器不论有无负载, 总是接在网络上, 所以几乎在任何时候都有几乎相同的铁损耗。而且传输和分配电能往往经过几次变换, 一般变压器在一年或一天内的平均负载也比较低, 所以应尽可能地限制铁损耗, 以减少大量的功率消耗。

铜损耗是由于电流经过原、副绕组所产生的欧姆电阻损耗, 以及漏磁场引起的集肤效应和绕组匝间的密邻效应所引起的附加铜耗。

为了便于计算效率, 常将变压器的损耗分为空载损耗和短路损耗。空载损耗包括铁损耗和空载电流的铜耗。因变压器的空载电流较小, 可认为是不随负载变化的, 故也称作固定损

耗。短路损耗主要为铜损耗, 所以

$$p_{Cu} = m_1 I_1^2 r_1 + m_2 I_2^2 r_2 \approx m_1 I_1^2 r_{sh} = m_1 \beta^2 I_{1N}^2 r_{sh} = \beta^2 P_{shN}$$

式中 m_1, m_2 为原、副绕组相数, P_{shN} 为额定负载时的短路功率, 即短路损耗。由于 近乎和负载电流平方成比例, 所以也称作可变损耗。

一般变压器的效率都很高, 用式 (1-30) 直接确定效率不能得到精确的结果, 且需消耗大量的电能, 故很少应用。一般多用间接方法, 即由损耗和输出功率来求效率。因此

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_2}{P_2 + \sum p} \times 100\% = \frac{m_2 U_2 I_2 \cos \varphi_2}{m_2 U_2 I_2 \cos \varphi_2 + m_1 I_1^2 r_{sh} + p_{Fe}} \times 100\% \\ &= \frac{\beta S_N \cos \varphi_2}{\beta S_N \cos \varphi_2 + \beta^2 P_{shN} + P_0} \times 100\% \end{aligned} \quad (1-31)$$

通常, 可以认为 $U_2 = U_{2N}$, $\cos \varphi_2$ 及 P_0 均恒定不变, 上式右边只有负载电流或负载系数是个变量, 由此可作出效率曲线。曲线有一最大值, 求法如下。令 $\frac{d\eta}{d\beta} = 0$, 由此得 $P_0 = \beta^2 P_{shN}$ 。

即当固定损耗与可变损耗相等时效率有极大值。

$$\text{此时} \quad \beta = \beta_m = \sqrt{\frac{P_0}{P_{shN}}} \quad (1-32)$$

一般电力变压器, $P_0/P_{shN} = 0.25 \sim 0.5$, 所以 $\beta_m = 0.5 \sim 0.7$ 。即约在 50% (半载) 至 70% 额定负载范围内。通常电机均在满载附近有最大效率, 因为电机应按额定值选用。而变压器常需成年累月接在电网上, 有些变压器, 尤其是只供照明用的变压器, 实际的负载时间很少, 或负载较轻。只要接在电网上, 不论负载轻重或有无, 固定损耗总是一定的, 所以固定损耗必须较小, 也就是在一天或一年内的平均负载下具有最大效率, 以求得到合理而有效地利用电能。因此, 对变压器来说, 不仅要求其在某一瞬间的瞬时效率, 如式 (1-30), 还需要知道按能量确定的所谓能量效率。这就是在一定时期内变压器输出能量与输入能量之比, 例如年效率或日效率

$$\eta_w = \frac{W_2 \text{ (一年或一日的输出电能)}}{W_1 \text{ (一年或一日的输入电能)}} \times 100\% \quad (1-33)$$

由此可见, 能量效率决定于一年或一日内的平均负载, 而非取决于某一瞬间的情况, 平均负载低时, 能量效率也低。所以根据运行情况, 需要使固定损耗低些。

变压器的损耗和参数等可通过空载试验和短路试验求出。图1-16示单相变压器空载试验的线路。将副绕组断开, 原绕组接至电源并逐渐增加电压至额定值, 电源电压应符合标准规定的波形以保证结果的正确。量出原边电压 U_{1N} , 电流 I_0 , 功率 P_0 及副边电压 U_{20} , 由此可得:

- 1) 变比 $k \approx \frac{U_{1N}}{U_{20}}$
- 2) 空载电流 I_0
- 3) 铁损耗 $p_{Fe} = I_0^2 r_m \approx I_0^2 r_0 = P_0$
- 4) 激磁参数 $\frac{\dot{U}_{1N}}{\dot{I}_0} = Z_0 = Z_1 + Z_m = (r_1 + r_m) + j(x_{1\sigma} + x_m) = r_0 + jx_0$

但一般电力变压器 Z_1 较 Z_m 小很多, 约在 1% 以下, 故