

电机与 控制系统

主
编：张
粤

东南大学出版社

电机与控制系统

主 编 张 粤
副主编 田 敏
参 编 应根旺 周扬忠

东南大学出版社

内容提要

本书内容主要包括交、直流电动机及电力拖动、变压器、微特电机、电力电子器件、可控整流、有源逆变、触发电路与保护电路、自动控制原理、直流调速系统、交流电机变频调速系统、伺服系统等。本书内容新颖、信息量大、综合性强,既有先进性和系统性,又有很强的实用性。

本书可作为高等院校机械设备与自动化、数控技术、电气技术、工业自动化等专业的教材或教学参考书,对有关工程技术人员也有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

电机与控制系统/张粤主编. —南京:东南大学出版社,
1999.10

ISBN 7-81050-529-7

I. 电… II. 张… III. ①电机-教材②电机-控制系统-
教材 IV. TM3-43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 62452 号

东南大学出版社出版发行
(南京四牌楼 2 号 邮编 210096)

出版人:洪焕兴

江苏省新华书店经销 南京京新印刷厂印刷

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:20.5 字数:496 千字

1999 年 10 月第 1 版 1999 年 10 月第 1 次印刷

印数:1—850 定价:37.00 元

前 言

近年来,随着电动机应用技术、现代电力电子技术、控制技术和计算机技术的迅速发展,电气自动化技术作为多种学科的交叉综合,也在发生日新月异的变化,已广泛应用于各个领域,特别是为机电一体化开辟了更加广阔的前景。

本书是在机电一体化的基础上重新编写而成,以电动机及其控制为主线,将电机及拖动、电力电子技术、自动控制原理与系统、交流调速系统和伺服系统等课程内容有机整合,融为一体,成为一门较有新意的课程,而不是简单的组合,满足了少学时、多内容的教学要求。

本书共分为五篇。第一篇:电机部分,以鼠笼式三相异步电动机为主,介绍了变压器、交、直流电机以及控制系统中常用的几种微控电机。第二篇:电力电子技术部分,以三相全控桥式整流电路和交直交有源逆变器为主介绍了各种类型整流和逆变电路的工作原理、电路组成及输出特性。第三篇:直流调速部分,以双闭环无静差直流调速系统为主介绍了几种常用的有静差、无静差直流调速系统的组成、工作原理及系统特性。第四篇:交流调速部分,介绍了几种常用交流变频调速系统的组成、工作原理及系统特点。第五篇:伺服系统部分,介绍以位置跟随系统为主的各种伺服系统的原理、系统组成等。

为了在教学上拓宽专业面、淡化专业界限、增强学生的工程实践能力,本书在编写过程中力求做到取材新颖、精练、涉及范围较广;内容阐述循序渐进,层次清楚,概念正确,深入浅出。编写中参考了近年来出版的有关教材和资料,特别是介绍了目前正在应用的一些新器件、新技术,有的内容还取自近年的科研成果。在名词术语和图形符号上注意采用了新的国家标准。书中每章内容后都有一定量的思考练习题,主要针对内容中的重点和难点,供学生练习思考,以加深对所学内容的理解消化,培养学生解决工程实际问题的能力。

本书由张粤担任主编,田敏担任副主编。第一、二、三、四章由张粤编写,第五、六、七、八、九章由周扬忠编写,第十、十一、十二章由应根旺编写,第十三、十四、十五章由田敏编写。

本书在编写和出版过程中,得到了上海理工大学方承远教授、东南大学张华教授以及东南大学出版社的支持和帮助,对此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在一些缺点甚至错误,恳切希望广大读者批评指正。

编 者

1999年8月

目 录

第一篇 电机	1
第一章 变压器	3
第一节 概述	3
第二节 变压器的空载运行	6
第三节 变压器的负载运行	9
第四节 变压器参数的测定	13
第五节 变压器的运行特性	15
第六节 三相变压器及变压器并联	18
第七节 特殊变压器	27
习 题	29
第二章 直流电机	31
第一节 直流电机的基础原理	31
第二节 直流发电机	43
第三节 直流电动机	48
习 题	58
第三章 异步电动机	61
第一节 三相异步电动机的转动原理及旋转磁场的产生	61
第二节 三相异步电动机的构造及铭牌数据	65
第三节 三相异步电动机的负载运行	72
第四节 三相异步电动机的起动、反转和制动	83
第五节 三相异步电动机的选择	90
习 题	93
第四章 微控电机	96
第一节 单相异步电动机	96
第二节 伺服电动机	99
第三节 测速发电机	102
第四节 直线电动机	106
第五节 步进电动机	109
第六节 微型同步电动机	114
第七节 自整角机	117
第八节 旋转变压器	121
习 题	126
第二篇 电力电子技术	127
第五章 常用电力电子器件	129
第一节 无自关断能力的电力电子器件	129
第二节 具有自关断能力的电力电子器件	138
习 题	147

第六章 交流一直流的可控整流电路	148
第一节 单相桥式可控整流电路	148
第二节 三相半波可控整流电路	155
第三节 三相桥式全控整流电路	161
习 题	164
第七章 直流—交流变换的有源逆变电路	165
第一节 电能的双向传输及要求	165
第二节 逆变过程分析	165
习 题	167
第八章 晶闸管的触发电路	168
第一节 触发电路的基本要求	168
第二节 同步信号为锯齿波的晶闸管触发电路	168
第三节 集成触发器	173
第四节 晶闸管主回路与触发电路的同步问题	175
习 题	177
第九章 电力电子器件的缓冲及驱动电路	178
第一节 功率晶体管的缓冲电路	178
第二节 功率晶体管的驱动电路	179
第三节 IGBT 驱动电路	183
习 题	184
第三篇 直流调速	185
第十章 直流调速系统基本概念	187
第一节 直流电动机调速原理和方案的比较	187
第二节 直流调速系统的组成和分类	190
习 题	195
第十一章 直流调速系统	196
第一节 有静差直流调速系统	196
第二节 无静差直流调速系统	201
第三节 双闭环直流调速系统	206
第四节 可逆直流调速系统	211
第五节 直流脉宽调制调速系统	220
习 题	223
第十二章 直流调速系统的分析与设计	225
第一节 自动控制系统的数学模型	225
第二节 系统的动态结构图及传递函数的求取	226
第三节 频率特性	232
第四节 系统的性能分析	236
第五节 直流调速系统设计	241
习 题	248
第四篇 交流调速	251
第十三章 异步电动机调速基础	253
第一节 交流调速概述	253

第二节	交流调速系统分类	253
习 题		262
第十四章	异步电动机的变频调速系统	263
第一节	变频调速系统的控制方式及其机械特性	263
第二节	交—交变频器	265
第三节	交—直—交变频器	272
第四节	脉冲宽度调制变频器	280
第五节	转速开环、电压闭环控制的变频调速系统	285
第六节	转差频率控制的变频调速系统	289
第七节	异步电动机矢量控制概述	292
习 题		296
第五篇	伺服系统	297
第十五章	伺服系统	299
第一节	伺服系统概述	299
第二节	伺服系统的检测与执行装置	303
第三节	伺服系统	307
习 题		317
参考文献		318

第一篇 电 机

第一章 变压器

第一节 概 述

一、变压器的用途

变压器是一种静止的电气设备,它的主要功能是利用电磁感应将一种交流的电压电流系统转换成另一种同频率的交流电压电流系统。

在电能的输送方面,当输送功率 $P = UI \cos \varphi$ 及负载功率因数 $\cos \varphi$ 为一定时,电压 U 愈高,则线路电流愈小。这不仅可以减小输电线的截面积,节省材料,同时还可减小线路的功率损耗,因此采用高压输电极为经济。我国常用的输电电压等级为 35kV、60kV、110kV、220kV、330kV、400kV、500kV 等,而发电站发出的电能因受绝缘等条件的限制最高电压一般为 10.5 ~ 20.5kV,因此,需要利用变压器将电压升高。在电能的使用方面,为了保证用电的安全和合乎用电设备的电压要求,还要利用变压器将电压降低。

除电力系统外,变压器在通讯、广播、遥控测量、冶炼、焊接、电子、实验等多种领域都有广泛的应用,比如在电子线路中,除电源变压器外,变压器还用来耦合电路、传递信号,并实现阻抗匹配。

二、变压器的分类

变压器的用途很广,因此种类也很多,按其用途不同可分为:

- (1) 电力变压器 如升压变压器、降压变压器、配电变压器、联络变压器(联接几个不同电压等级的电网用)和厂用电变压器(供发电厂自用电用)等。
- (2) 特殊电源用变压器 如电炉、电焊、整流变压器等。
- (3) 仪用变压器 如电压、电流互感器等。
- (4) 实验变压器 如专供电力设备作耐压用的高压变压器。
- (5) 调压器 如自耦调压器等。
- (6) 控制用变压器 如脉冲变压器以及在电子设备中作为电源、隔离、阻抗匹配等小容量变压器等。

变压器还可以按线圈数、相数、冷却介质、冷却方式、铁芯结构及调压方式等分类。

虽然变压器的种类很多,但是它们的基本构造和工作原理是相同的。

三、变压器的构造

图 1-1 是一油浸式电力变压器的外形结构图。

变压器的主要结构部件有:由铁芯和绕组两个基本部分组成的器身以及置放器身且盛有变压器油的油箱。此外还有为把绕组出线端从油箱内引出而在油箱盖上装的高、低压绝缘套管;为在一定范围内调整电压而附有的分接开关等。这里着重介绍变压器的铁芯和绕组结构。

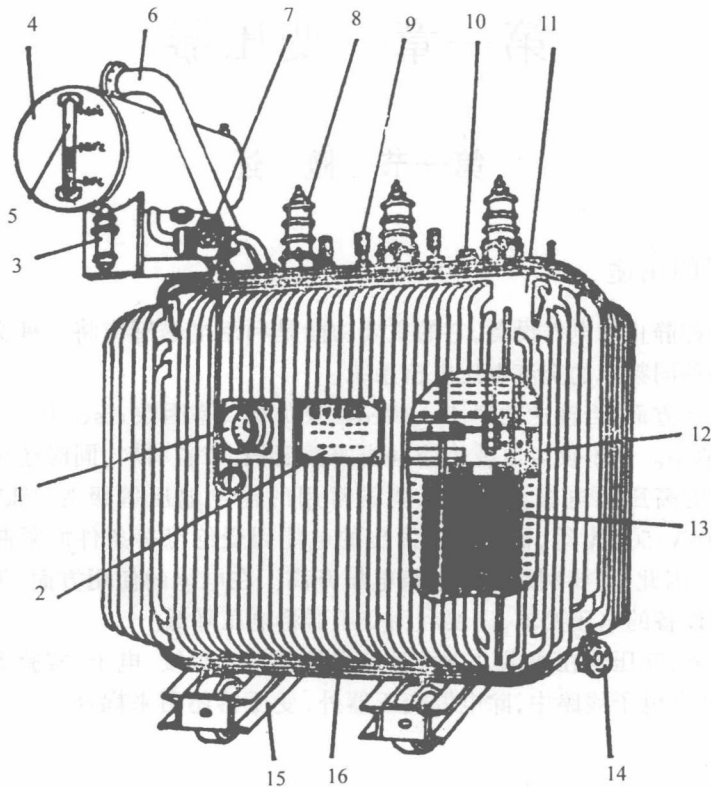


图 1-1 油浸式电力变压器

- 1 - 信号式温度计; 2 - 铭牌; 3 - 吸湿器; 4 - 储油柜; 5 - 油表; 6 - 安全气道;
7 - 气体继电器; 8 - 高压套管; 9 - 低压套管; 10 - 分接开关; 11 - 油箱; 12 - 铁芯;
13 - 绕组及绝缘; 14 - 放油阀门; 15 - 小车; 16 - 地线

(一)铁芯

铁芯是变压器的磁路部分。为了减少铁芯内的磁滞损耗与涡流损耗,铁芯通常是用含硅量较高表面涂有绝缘漆的 0.35mm 或 0.5mm 硅钢片叠装而成。铁芯分为装有绕组的铁芯柱和作闭合磁路用的铁轭两部分。图 1-2 是单相芯式和壳式变压器的铁芯和绕组结构图。

(二)绕组

绕组是变压器的电路部分,它是用纸包的绝缘扁线或圆线绕成的,分为接于高压电网的高压绕组和接于低压电网的低压绕组,也可分为与电源相接的原绕组(或称一次绕组,用下标 1 表示其所有的物理量)和与负载相接的副绕组(或称二次绕组,用下标 2 表示其所有的物理量)。

四、变压器的铭牌及额定值

每台变压器都有一个铭牌,铭牌上标注着变压器的型号、额定数据等。例如某台三相自冷油浸双绕组铝线变压器的型号为 BS7-1000/6.10,各字母数字代表的意义如下:

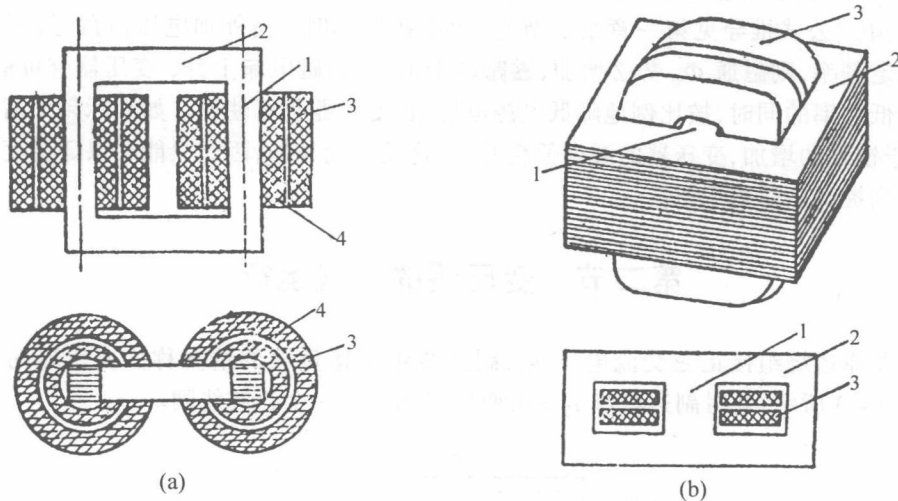
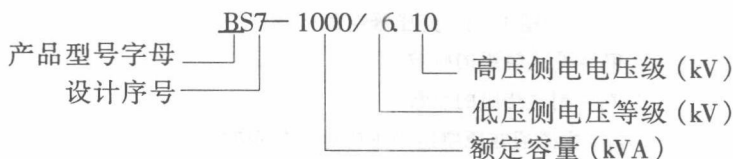


图 1-2 单相变压器
(a) 芯式 (b) 壳式
1 - 铁心柱; 2 - 铁轭; 3 - 高压线圈; 4 - 低压绕组



由于变压器的使用环境和运行条件不一样,因此必须用一些事先规定的数值来衡量,这些数值称为变压器的额定数据,它们被标注在变压器的铭牌上,主要有:

(1) 额定电压 U_{1e}/U_{2e} 它是变压器空载时,在额定电压分接下各绕组端电压的保证值,单位为 V 或 kV。 U_{1e} 是原绕组的额定电压; U_{2e} 是当原绕组上加额定电压时,副绕组的开路电压,即空载电压。对三相变压器,额定电压指线电压。

(2) 额定电流 I_{1e}/I_{2e} 是指变压器在额定容量情况下,各绕组长期允许通过的线电流,单位为 A。

(3) 额定容量 S_e 它是变压器在额定工作条件下输出能力的保证值,是变压器的视在功率,以 VA、kVA、MVA 表示。通常把变压器原、副绕组的额定容量设计得相同。

单相变压器的额定容量为

$$S_e = U_{1e} I_{1e} = U_{2e} I_{2e}$$

三相变压器的额定容量为

$$S_e = \sqrt{3} U_{1e} I_{1e} = \sqrt{3} U_{2e} I_{2e}$$

变压器输出的有功功率大小决定于副边绕组所接负载的性质。

(4) 额定频率 f_e 我国规定标准工业用电频率为 50Hz。在使用变压器时,要注意它对电源频率的要求,否则有可能损坏变压器,因为铁芯的能量损耗与频率的高低有关,而且在

设计变压器时,据电源电压的大小和频率值来确定匝数 W_1 及磁通量的最大值 Φ_m ,即有 $U_1 \approx 4.44fW_1\Phi_m$ (公式推导见第一章第二节)。如果在使用时,当外加电压值恒定,而实际频率低于额定频率,则磁通 Φ_m 势必增加,磁路趋于饱和,励磁电流上升,变压器有可能烧毁;当然在降低频率的同时,按比例地降低电源电压值,变压器仍可使用。如实际频率高于额定值时,由于铁耗的增加,变压器的温度便会升高,这是不允许的,因此只能在保证温度不变的条件适当提高电源电压值。

第二节 变压器的空载运行

变压器原边绕组接正弦交流电压 u_1 ,副边绕组不接负载的情况称为变压器的空载运行。如图 1-3 所示,此时副边电流 $i_2 = 0$,变压器相当于一个铁芯线圈。

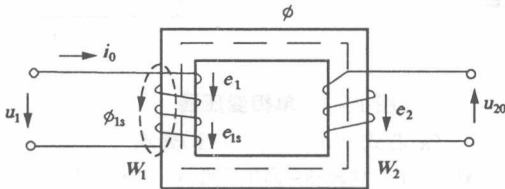


图 1-3 变压器空载运行

W_1 - 原边绕组的匝数

W_2 - 副边绕组的匝数

e_1 - 主磁通在原绕组中感应电势的瞬时值

e_2 - 主磁通在副绕组中感应电势的瞬时值

e_{1s} - 漏磁通在原绕组中感应电势的瞬时值

一、磁通、感应电势、电压平衡方程式和电压变换

当原绕组加正弦交流电压 u_1 时,便有空载电流 i_0 通过,在空载磁势 $i_0 W_1$ 的作用下,产生磁通,因为铁芯的导磁率比空气的导磁率高得多,磁通大部分流经铁芯,并与原、副绕组相交链,称为主磁通 Φ ;少量磁通(约 0.1% ~ 0.2%)经空气与产生它的绕组相交链,称为漏磁通 Φ_{1s} 。变压器空载运行时,由空载电流建立主磁通,所以空载电流即为励磁电流。空载电流可以分成磁化电流 i_μ 和铁耗电流 i_{Fe} 两个分量,即 $\dot{I}_0 = \dot{I}_\mu + \dot{I}_{Fe}$ 。前者起单纯的磁化作用,是空载电流的无功分量;后者对应于磁滞损耗和涡流损耗,是空载电流的有功分量。在变压器中, $\dot{I}_\mu \gg \dot{I}_{Fe}$,故可近似以 $\dot{I}_0 \approx \dot{I}_\mu$ 来分析空载电流的性质。由于磁化曲线的非线性, i_μ 和 i_0 都不是正弦波的,若用向量来表示这些电流时,必须取它们的基波。工程上为了便于测量和计算,采用与 i_0 基波同频率的等效正弦电流来代替实际的空载电流 i_0 。

随时间交变的磁通 Φ 和 Φ_{1s} 在原、副绕组中分别产生感应电势,当电流与磁通的正方向符合右手螺旋法则,感应电势和电流的正方向一致时,楞次定律可表示为 $e = -d\Phi/dt$ 。由此得

$$\begin{aligned}e_1 &= -W_1 \frac{d\Phi}{dt} \\e_2 &= -W_2 \frac{d\Phi}{dt} \\e_{1s} &= -W_1 \frac{d\Phi_{1s}}{dt}\end{aligned}\quad (1-1)$$

按图 1-3 中所规定的各物理量的正方向,利用电路定律,得空载时原、副边的电压方程为

$$\begin{aligned}u_1 &= -(e_1 + e_{1s}) + i_0 r_1 = i_0 r_1 + L_{1s} \frac{di_1}{dt} + (-e_1) \\u_{20} &= e_2\end{aligned}\quad (1-2)$$

因各物理量均按正弦规律变化,则上式的向量形式为

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \dot{I}_0 r_1 + (-\dot{E}_{1s}) + (-\dot{E}_1) = \dot{I}_0 r_1 + j\dot{I}_0 X_1 + (-\dot{E}_1) = \dot{I}_0 Z_1 + (-\dot{E}_1) \\ \dot{U}_{20} &= \dot{E}_2\end{aligned}\quad (1-3)$$

式中 r_1 和 $X_1 = \omega L_{1s}$ 分别表示原绕组的电阻和漏磁感抗(漏磁感抗,由漏磁通产生,是一个常数),并称 Z_1 为原绕组的漏阻抗。

由于原绕组的电阻 r_1 和感抗 X_1 (或漏磁通 Φ_{1s}) 较小,因而它们两端的电压降也较小,与主磁电动势 $\dot{E}_1$ 比较起来,可以忽略不计,于是

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1 \quad (1-4)$$

变压器空载运行时,虽然副边没有功率输出,但原边仍要从电源吸收一部分有功功率,来补偿由于磁通的交变在铁芯中引起的铁耗和电流 I_0 流过 r_1 时引起的铜耗。

由于 $u_1 \approx -e_1$, 如 u_1 随时间按正弦规律变化,则 e_1 和 Φ 也按正弦规律变化,设

$$\Phi = \Phi_m \sin(\omega t) \quad (1-5)$$

将式(1-4)代入式(1-1)得

$$e_1 = -W_1 \frac{d\Phi}{dt} = -\omega W_1 \Phi_m \cos \omega t = \omega W_1 \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) = E_{1m} \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (1-6)$$

$$e_2 = -W_2 \frac{d\Phi}{dt} = -\omega W_2 \Phi_m \cos \omega t = \omega W_2 \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) = E_{2m} \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (1-7)$$

由上式得 e_1 和 e_2 的相位都滞后于 $\Phi 90^\circ$, 它们的有效值分别为

$$\begin{aligned}E_1 &= \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega W_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f W_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f W_1 \Phi_m \\E_2 &= \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega W_2 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f W_2 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f W_2 \Phi_m\end{aligned}\quad (1-8)$$

用向量表达为

$$\begin{aligned}\dot{E}_1 &= -j4.44 f W_1 \dot{\Phi}_m \\ \dot{E}_2 &= -j4.44 f W_2 \dot{\Phi}_m\end{aligned}\quad (1-9)$$

由式(1-3)、式(1-4)和式(1-8)、式(1-9)可得变压器原、副边电压变换关系为

$$\frac{U_1}{U_{20}} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} = k \quad (1-10)$$

式中 k 为高、低压绕组的匝数之比,称为变比。

二、变压器空载时的等效电路和向量图

变压器的原边和副边并没有直接的电的关系,它们只是通过磁的关系才联系起来的,而我们在研究变压器时,就是要找出原边各量之间,副边各量之间以及原、副边各量之间的关系。为此,希望能把原、副边之间磁的关系用电路的形式相联系起来。这就是等效电路的目的。

前面讲过,对电源电压 $\dot{U}_1$ 而言,电势 $\dot{E}_1$ 的作用可看作是电流 $\dot{I}_0$ 流过漏抗 X_{1s} 时所引起的电压降。同样,对主磁通所感应的电势 $\dot{E}_1$ 的作用,也可类似地引入一个参数处理。但考虑主磁通在铁芯中还要产生铁耗(相当于电阻上的能量损耗),故不能单纯地引入一个电抗,而应该引入一个阻抗 $Z_m = r_m + jX_m$,把 $\dot{E}_1$ 和 $\dot{I}_0$ 联系起来,如图 1-4 所示,即

$$\dot{E}_1 = \dot{I}_0 Z_m = \dot{I}_0 (r_m + jX_m) \quad (1-11)$$

式中 Z_m 、 X_m 、 r_m 称为励磁阻抗、励磁电抗和励磁电阻。 r_m 对应于铁耗的等效电阻,即 $I_0^2 r_m$ 的值等于铁耗。

需要指出的是:由于铁芯磁路饱和的影响, r_m 和 X_m 都不是常数,而是随着电源电压的增加而减小的。

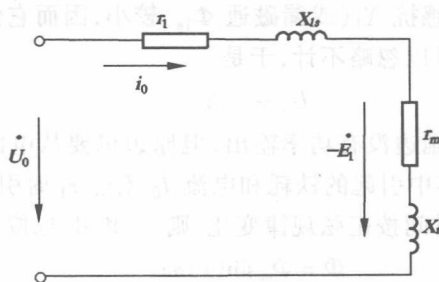


图 1-4 变压器空载运行时的等效电路

为了直观地表示变压器中各物理量之间的大小和相位关系,在同一张图上把各物理量用向量的形式来表示,即为变压器的向量图。

作向量图时,我们先以 Φ 作为参考向量,由于磁通 Φ 产生的感应电势 $\dot{E}_1$ 、 $\dot{E}_2$ 都滞后于其 90° ;其次根据 $\dot{I} = \dot{I}_\mu + \dot{I}_{Fe}$ 画出 $\dot{I}_0$,因铁耗的存在,故 $\dot{I}_0$ 超前于 Φ 一个小角度;最后根据式(1-3)在 $-\dot{E}_1$ 向量的末端作平行于 $\dot{I}_0$ 方向的电阻压降向量 $\dot{I}_0 r_1$,画在 $\dot{I}_0 r_1$ 向量的端点作超前于 $\dot{I}_0 90^\circ$ 的漏抗压降向量 $j\omega L_{1s} \dot{I}_0$,其末端与零点相连,即为向量 $\dot{U}_1$,如图 1-5 所示。

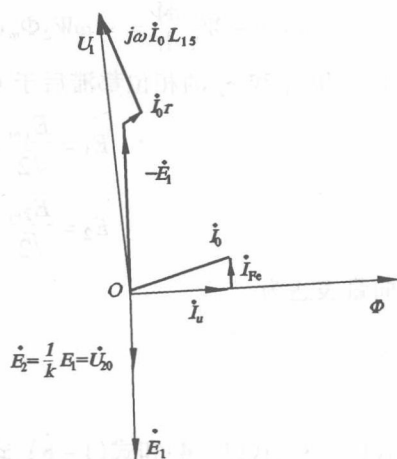


图 1-5 变压器空载运行时的向量图

第三节 变压器的负载运行

一、负载时原、副边电流的关系, 电流变换

当变压器副边接上负载 Z_f 时(如图 1-6 所示), 副边电流由零增加到 I_2 , 由 I_2 产生的磁动势为 $I_2 W_2$, 它产生的磁通绝大部分都通过铁芯而闭合, 与原边磁动势共同产生主磁通, 也有小部分磁通仅与副边绕组和空气相交链, 这部分磁通称为副边漏磁通 Φ_{2s} , Φ 和 Φ_{2s} 在副边绕组上分别感应 e_2 和 e_{2s} , 上述电磁关系可用图 1-7 表示。

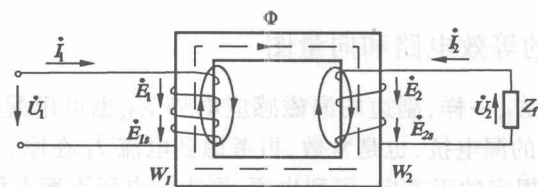


图 1-6 变压器负载运行

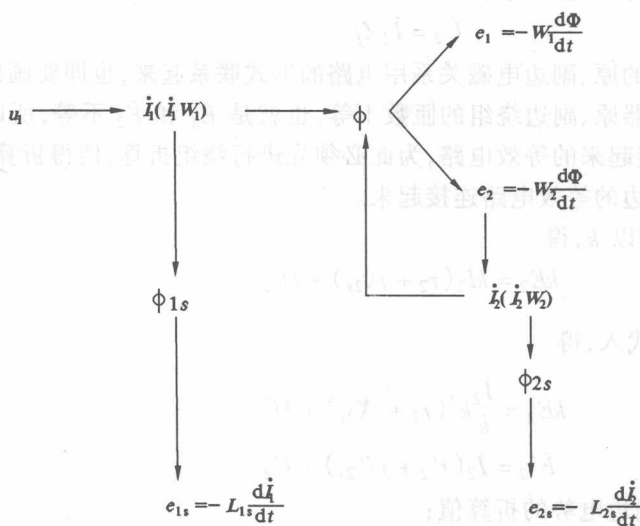


图 1-7 变压器的电磁关系

变压器空载和有载时, 由于 $\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$, 故在 $\dot{U}_1$ 一定时, 产生 $\dot{E}_1$ 的主磁通也应近似不变, 所以得如下磁势平衡方程式

$$\dot{I}_1 W_1 + \dot{I}_2 W_2 = \dot{I}_0 W_1$$

$$\text{或} \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \left(-\frac{\dot{I}'_2}{k}\right) = \dot{I}_0 - \dot{I}'_2 \quad (1-12)$$

式中: $\dot{I}'_2 = \dot{I}_2/k$ 。

由于(1-12)可见, 有载时, 原边电流有两个分量: 其中一个分量 $\dot{I}_0$ 用来在铁芯中建立

主磁通 Φ ; 另一个分量 $(-I_2/k)$ 是用来抵消副边电流所建立的磁势, 称为负载分量, 正是由于它随副边电流的增加而增加, 便使得变压器输出的电功率从原边传递到了副边。

变压器的空载电流 I_0 是励磁用的, 由于铁芯磁导率高, 空载电流是很小的, 它的有效值 I_0 在原绕组额定电流 I_{1e} 的 10% 以内, 因此 $I_0 W_1$ 与 $I_1 W_1$ 相比, 常可忽略, 于是式 (1-12) 可写成

$$I_1 W_1 \approx -I_2 W_2 \quad (1-13)$$

也即 $\frac{I_1}{I_2} = \frac{W_2}{W_1} = \frac{1}{k}$ 上式表明, 变压器原、副边不仅有电压变换关系, 也有电流变换关系。原、副边电流之比近似等于变比的倒数。

二、变压器有载时的等效电路和向量图

同原边漏磁感应电势 $\dot{E}_{1s}$ 一样, 副边的漏磁感应电势 $\dot{E}_{2s}$ 也可用漏抗压降 $-j\dot{I}_2 X_{2s}$ 来等效, 式中 X_{2s} 称为副边绕组的漏电抗, 也是常数, 再考虑到电流 $\dot{I}_1$ 在原、副边绕组电阻 r_1 和 r_2 上的压降, 按图 1-6 所规定的正方向, 可列出原、副边的电压平衡方程为

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1s} + \dot{I}_1 r_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (r_1 + jX_{1s}) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \quad (1-14)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 + \dot{E}_{2s} - \dot{I}_2 r_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 (r_2 + jX_{2s}) = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 \quad (1-15)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_f \quad (1-16)$$

要想把变压器有载时的原、副边电磁关系用电路的形式联系起来, 也即要画出变压器的有载等效电路。由于变压器原、副边绕组的匝数不等, 也就是 $\dot{E}_1$ 和 $\dot{E}_2$ 不等, 所以我们不能直接得到一个原、副边连接起来的等效电路, 为此必须先进行绕组折算; 使得折算后的原、副边电势相等, 从而将原、副边的等效电路连接起来。

将式 (1-15) 两边中乘以 k , 得

$$k\dot{E}_2 = k\dot{I}_2 (r_2 + jX_{2s}) + k\dot{U}_2$$

将式 (1-12) 中的 $\dot{I}'_2 = \frac{\dot{I}_2}{k}$ 代入, 得

$$k\dot{E}_2 = \frac{\dot{I}_2}{k} k^2 (r_2 + jX_{2s}) + k\dot{U}_2$$

$$\dot{E}'_2 = \dot{I}_2 (r'_2 + jX'_{2s}) + \dot{U}_2 \quad (1-17)$$

式中: $\dot{E}'_2 = k\dot{E}_2 = \dot{E}_1$ ——副边电势的折算值;

$\dot{I}'_2 = \frac{\dot{I}_2}{k}$ ——副边电流的折算值;

$\dot{U}'_2 = k\dot{U}_2$ ——副边电压的折算值;

$X'_{2s} = k^2 X_{2s}$ ——副边漏抗的折算值;

$r'_2 = k^2 r_2$ ——副边电阻的折算值;

$Z'_f = \frac{\dot{U}'_2}{\dot{I}'_2} = \frac{k\dot{U}_2}{\frac{\dot{I}_2}{k}} = k^2 \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} = k^2 Z_f$ ——负载阻抗的折算值。 (1-18)

考虑到 $-\dot{E}_1 = \dot{I}_0 (r_m + jX_m)$, 故用 r_m 和 X_m 串联电路来代替铁芯磁路, 即得折算后的等效电路如图 1-8 所示, 称为变压器的“T”型等效电路。它虽能真实地反映变压器内部的电