

— 高等学校教材 —

电 工 学

第 二 册

楊 游 之 主 編

6469

高 等 教 育 出 版 社

高等学校教材



电 工 学

第 二 册

楊 游 之 主 編

(修訂第三版)

高 等 教 育 出 版 社

本书原是浙江大学电工学教研组编写的,于1960年出版,曾在1961年3月经修改后再版。现由编者按照1962年5月高等工业学校教学工作会审定的高等工业学校本科五年制化工、轻工业类专业适用的《电工学教学大纲(试行草案)》再次修订出版。

本书共分三册。第二册包括变压器、异步电动机、同步电动机、直流电动机、电动机的选择与继电接触控制、供电等内容。

本书由华东化工学院张大恒、王春田两同志审阅,并经高等工业学校电工课程教材编审委员会电工学及电工基础课程教材编审小组复审通过。

本书可作高等工业学校本科五年制化工、轻工业类专业电工学课程的试用教科书,也可供有关工程技术人员参考。

本书原由高等教育出版社出版,自1960年4月至1964年12月改由人民教育出版社出版。1965年1月1日高等教育出版社成立后,本书仍用高等教育出版社名义继续印行。

电 工 学

第二册

杨游之主编

北京市书刊出版业营业许可出字第119号
高等教育出版社出版(北京景山东街)

上海新华印刷厂印装
新华书店上海发行所发行
各地新华书店经售

统一书号:15010·1060 开本:850×1168 1/32 印张:6 11/16
字数:187,000 印数:0,001—8,500 定价(7)¥0.30

1960年11月初版(精装合订本共印30,000册)

1961年6月第2版 1965年6月第3版 1965年6月上海第1次印刷

关于本书所用图形符号及文字符号的说明

本书所用图形符号是根据中华人民共和国科学技术委员会 1964 年颁布的中华人民共和国国家标准 GB 312-64《电工系统图图形符号》绘制的。

本书所用文字符号,除国际通用者外,其余均根据中华人民共和国科学技术委员会 1964 年颁布的中华人民共和国国家标准 GB 315-64《电工设备文字符号编制通则》所规定的原则,采用了我国汉语拼音字母。为了便于区别起见,文字符号的下标采用两种字体排印,凡国际通用符号均排为斜体[除 max(最大)和 min(最小)按照习惯排为正体外];凡汉语拼音字母均排为小写正体。本书所用汉语拼音字母下标的意义见表 1(按在书中出现的先后次序排列)。

由于本书第一册出版时,上述有关国家标准尚未正式颁布,因此仍采用旧符号。兹将本书第二册中不同于第一册的文字符号、图形符号和电工术语列于表 2,以便读者对照。

表 1.

下标符号	意 义	汉 语 拼 音	用 法 举 例
l	漏	lou	漏磁通 Φ_l
cz	磁滞	cizhi	磁滞损失 P_{cz}
wl	涡流	woliu	涡流损失 P_{wl}
dl	短路	duanlu	短路电压 U_{dl}
e	额定	eding	额定电压 U_e
x	线	xian	线电压 U_x
xa	相	xiang	相电压 U_{xa}
q	线圈(绕组)	xianquan(raozu)	绕组系数 k_q
j	机械	jixie	机械损失 P_j
lj	临界	linjie	临界转差率 s_{lj}
fk	反抗	fankang	反抗转矩 M_{fk}
q	起动	qidong	起动转矩 M_q
dx	等效	dengxiao	等效阻抗 z_{dx}
b	变阻器	bianzuqi	变阻器的电阻 R_b
l	励磁	lei	励磁电压 U_l
k	控制	kongzhi	控制电压 U_k
ds	电枢	dianshu	电枢磁通 Φ_{ds}
t	同步	tongbu	同步电抗 X_t
hc	合成	hecheng	合成旋转磁场的磁通 Φ_{hc}
pj	平均	pingjun	导体电动势的平均值 e_{pj}
sf	电枢反映	dianshu fanying	电枢反应电动势 e_{sf}
t	调节	tiaojie	调节电阻 R_t
ol	串励	chuanli	串励绕组的电阻 R_{ol}
f	发电机	fadianji	发电机效率 η_f
d	电动机	diandongji	电动机效率 η_d
d	短时	duanshi	短时运行时间 t_d
g	鼓风机	gufengji	鼓风机效率 η_g
b	泵	beng	泵的效率 η_b
c	传动	chuandong	传动效率 η_c
bc	补偿	buchang	补偿绕组的磁通 Φ_{bc}
rx	容许	rongxu	容许温升 τ_{rx}
wd	稳定	wending	稳定温升 τ_{wd}
r	发热	fare	发热过载系数 α_r

續前表

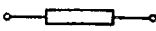
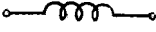
下标符号	意 义	汉 語 拼 音	用 法 举 例
g	工作	gongzuo	工作时间 t_g
sj	实际	shiji	实际負載持續率 $\mathcal{E}_{sj}$
bz	标准	biaozhun	标准負載持續率 $\mathcal{E}_{bz}$
cr	长期容許	changqi rongxu	长期容許电流 I_{cr}
js	計算	jisuan	計算电流 I_{js}
x	需要	xuyao	需要系数 k_x
rd	熔断	rongduan	熔断絲的額定电流 I_{rde}

注：①下标字母的选用，一般是取具有主要表征意义的一个字的第一个拼音字母。例如：控制(kong zhi)用k，負載(fu zai)用z。

② 为了避免下标字母的过多重复，有些下标增注了具有次要表征意义的汉字的第一个拼音字母。例如：放电(fang dian)用fd，临界(lin jie)用lj。

③ 在个别情况下，还增注具有主要表征意义的一字中的第一个或第二个韵母。例如：相(xiang)用xa。

表 2.

名 詞	第一冊中的旧符号和术语	第二冊中的新符号和术语
电阻	r (交流电路中)	R
电抗	x	X
线圈匝数	w	N
铁损失	P_c	P_{FE}
磁滞损失	P_h	P_{cz}
涡流损失	P_e	P_{wl}
线电压	U_x	U_x
线电流	I_x	I_x
相电压	U_ϕ	U_{xa}
相电流	I_ϕ	I_{xa}
物理量额定值的下标符号	H	e
物理量最大值的下标符号	m	$\max$
电阻		
电感线圈		
电阻电感线圈		
电工术语	激磁	励磁

第二册目录

关于本书所用图形符号和文字符号的说明	iii
--------------------	-----

第八章 变压器

8-1 概述	233
8-2 变压器的作用原理	233
8-3 变压器的空载运行	235
8-4 变压器的负载运行	237
8-5 变压器的损失和效率	240
8-6 三相变压器	242
8-7 变压器的构造	245
8-8 变压器的额定值	247
8-9 自耦变压器	250
8-10 仅用互感器	252
8-11 我国变压器制造事业的发展及国产变压器的型号	257
习题	258

第九章 异步电机

9-1 概述	260
9-2 异步电动机的构造	260
9-3 旋转磁场	266
9-4 异步电动机的作用原理	270
9-5 异步电动机的定子电路和转子电路	272
9-6 异步电动机的损失,效率和能量图	281
9-7 异步电动机的电磁转矩和机械特性	283
9-8 异步电动机的起动	288
9-9 异步电动机的调速和反转	293
9-10 异步电动机的工作特性	297
9-11 异步电动机的额定值	298
9-12 单相异步电动机	300
9-13 异步执行电动机	304
9-14 异步电动机的维护	305
9-15 我国异步电动机制造事业的发展及国产异步电动机的型号	308
习题	309

第十章 同步电机

10-1 概述.....	311
10-2 同步电机的构造.....	311
10-3 同步发电机的作用原理、矢量图和特性曲线.....	312
10-4 同步电动机的作用原理、矢量图和特性曲线.....	316
10-5 改变励磁电流对同步电动机功率因数的影响.....	320
10-6 同步电动机的起动.....	322
10-7 同步电机的额定值.....	323
10-8 反应式同步电动机.....	324
10-9 我国同步电机制造事业的发展及国产同步电机的型号.....	326
习题.....	327

第十一章 直流电机

11-1 概述.....	328
11-2 直流电机的基本作用原理.....	328
11-3 直流电机的构造.....	329
11-4 直流电机的电枢绕组.....	330
11-5 直流电机的电枢电动势、电磁转矩和电磁功率.....	335
11-6 电枢反应.....	338
11-7 电流的换向及其改善.....	340
11-8 直流电机按励磁方式的分类.....	343
11-9 他励发电机.....	344
11-10 并励发电机.....	346
11-11 复励发电机.....	349
11-12 并励电动机的作用原理及其运用特性.....	350
11-13 并励电动机的起动、反转和调速.....	352
11-14 串励电动机.....	360
11-15 复励电动机.....	363
11-16 直流电机的损耗和效率.....	364
11-17 直流电机的额定值.....	365
11-18 交磁放大机.....	365
11-19 直流电机的维护.....	367
11-20 我国直流电机制造事业的发展 and 国产直流电机的型号.....	367
习题.....	368

第十二章 电动机的选择与继电接触控制

12-1 概述.....	370
12-2 电动机的发热和冷却.....	371

12-3 电动机运行情况的分类.....	374
12-4 电动机容量的选择.....	375
12-5 电动机种类和结构型式的选择.....	384
12-6 电动机的控制和保护电器.....	387
12-7 电动机的继电接触控制线路.....	399
习题.....	407
附录 12-1 电器的维护.....	409
附录 12-2 几种系列电动机的产品目录.....	410

第十三章 供电

13-1 发电和输电概念.....	414
13-2 工业企业配电.....	415
13-3 导线截面的选择.....	418
13-4 熔断器的选择.....	422
13-5 安全用电.....	425
13-6 触电和急救.....	427

第八章 变压器

8-1. 概 述

变压器是一种静止的电器，用来把某一种电压的交流电能转换成同频率的另一种电压的交流电能。

为了充分利用自然资源(燃料和水力)来产生电能，发电厂往往远离用电中心，于是输电距离大为增加。但是，经济的远距离输电只有在高电压情况下才有可能，因为电压愈高，则输送同样功率的电流愈小，输电导线的截面也就愈小，因而节省了输电线的材料。我国某些地区已建立 220 千伏的高压输电系统。

但从安全用电和制造成本来看，这样高的电压是不允许由发电机直接产生的；同时，也不允许为受电设备(如电动机、电灯等)直接使用。因此，必须在电能的生产、输送、分配和使用过程中，根据我们的需要把电压升高或降低。利用变压器就可以既经济又方便地完成这一任务，所以变压器是现代输电和配电系统中不可缺少的环节。

除了上述输电系统中用的电力变压器外，还有许多供特殊用途的变压器，例如自耦变压器、仪用互感器、电焊变压器以及电子装置用的各种变压器等。虽然变压器的种类很多，用途也不同，但是它们的作用原理都是基于电磁感应现象。

8-2. 变压器的作用原理

最简单的变压器是由一闭合铁心和绕在铁心上的匝数不同的二个绕组构成的，如图 8-1 所示。其中一个绕组与电源相联接，称

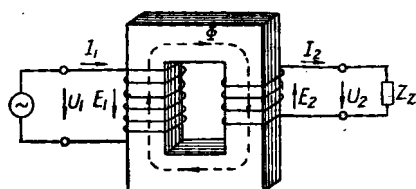


图 8-1. 变压器的作用原理图。

为原绕组；另一绕组与负载相联接，称为副绕组。如果变压器原绕组的端电压（称为原电压） U_1 小于副绕组的端电压（称为副电压） U_2 ，则

称为升压变压器；反之，若 $U_1 > U_2$ ，则称为降压变压器。电压较高的绕组称为高压绕组，电压较低的绕组称为低压绕组。

当原绕组两端接上交变电压 U_1 时，其中便有交变电流 I_1 通过，并在铁心中产生交变磁通 Φ ，磁通 Φ 不仅与原绕组相环链，而且也与副绕组相环链，这样就在原、副绕组间建立起磁的联系。

像交流铁心线圈电路一样，当原电压 U_1 按正弦律变化时，铁心中的磁通 Φ 及由它_在原、副绕组中所感应的电动势也将按正弦律变化；电动势的有效值为

$$E_1 = 4.44f N_1 \Phi_m \quad (8-1)$$

和
$$E_2 = 4.44f N_2 \Phi_m. \quad (8-2)$$

式中 f 和 Φ_m 分别为交变磁通 Φ 的频率和幅值； N_1 和 N_2 为原、副绕组的匝数。

从式(8-1)和(8-2)可得

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = k, \quad (8-3)$$

比值 k 称为变比。

由于变压器原、副绕组的阻抗电压降一般都很小，所以 $U_1 \approx E_1$ ，和 $U_2 \approx E_2$ （见 8-3、8-4 节）。这样，

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = k. \quad (8-4)$$

从式(8-4)可见，当原、副绕组的匝数 N_1 和 N_2 不同时，变压器

可以把某一电压的交流电转换成同频率的另一电压的交流电，此时电能自原绕组输入，通过交变磁场，借电磁感应的作用传递给副绕组而输送给负载。

例 8-1. 某变压器的高压绕组的匝数 $N_1=2100$ 匝，低压绕组的匝数 $N_2=140$ 匝，如把高压绕组（作原绕组）接在 $U_1=3300$ 伏的电网上，则在低压绕组（作副绕组）端的电压 U_2 约为多少伏？

解： 变压器的变比

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{2100}{140} = 15.$$

如忽略变压器绕组的阻抗电压降，则按式 (8-4)

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = k,$$

可得

$$U_2 \approx \frac{U_1}{k} = \frac{3300}{15} = 220 \text{ 伏}.$$

8-3. 变压器的空载运行

当变压器的原绕组两端加上额定电压而副绕组两端开路（不接负载）时，称为变压器的空载运行，如图 8-2 所示。变压器在空载运行时的情况，与交流铁心线圈电路一样。

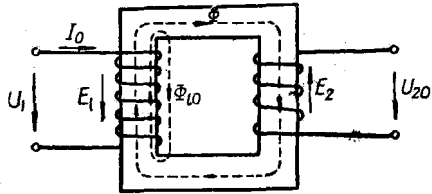


图 8-2. 变压器的空载运行。

此时，在接有电压 U_1 的原绕组内有电流 I_0 通过，这个电流称为空载电流。变压器的空载电流一般是额定电流的 3—8%。在磁通势 $N_1 I_0$ 的作用下，铁心中将产生磁通，其中绝大部分磁通与原、副绕组都相环链，这部分磁通称为主磁通 Φ ；另有很小一部分磁通只与原绕组相环链，这部分磁通称为原绕组漏磁通 Φ_{10} 。

在实际上由于考虑到电压降的关系，仍然分别制成升压变压器和降压变压器。通常在铭牌上只标出高压绕组的额定电压对低压绕组的额定电压之比，例如6000/230伏。

变压器空载运行时的矢量图(如图 8-3 所示)与交流铁心线圈电路的矢量图一样，只多了副绕组电动势 E_2 的矢量。图中矢量 $\overline{I_{021}}$ 是夸大了画的。

变压器在空载时自电源输入的功率 P_0 消耗在铁损失 P_{Fe} 和原绕组的铜损失 $I_0^2 R_1$ 上。而空载时的铜损失 $I_0^2 R_1$ 很小，仅为额定负载时铜损失的(0.25—2)%，相对于铁损失来说可忽略不计。所以输入功率可认为等于铁损失，即

$$P_0 = U_1 I_0 \cos \varphi_0 \approx P_{Fe}. \quad (8-11)$$

8-4. 变压器的负载运行

当变压器负载运行时，原绕组两端加上额定电压，副绕组两端和负载相联接，如图 8-4 所示。此时在副绕组电动势 E_2 的作用下，副绕组和负载所组成的电路(称为副电路)内就有电流 I_2 (称为副电流)通过，这个电流所产生的磁通势 $N_2 I_2$ 和原绕组的磁通势作用在同一

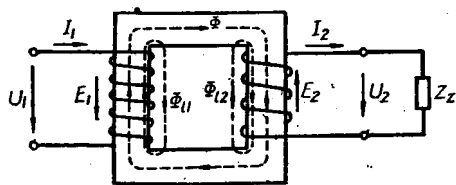


图 8-4. 变压器的负载运行。

磁路内，使主磁通改变，并使原绕组电动势发生变化。此时，原绕组中的空载电流已不再能继续维持原电路的电压平衡而自动改变，这个已改变的原电流以 I_1 表示。

此时原电路的电压平衡方程式为

$$\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 - \bar{E}_{11} + \bar{I}_1 R_1, \quad (8-12)$$

式中 E_{11} 为磁通势 $N_1 I_1$ 所产生的漏磁通 Φ_{11} 在原绕组中感应的电动势, E_{11} 可用一漏抗电压降 $I_1 X_1$ 来表示。这样

$$\begin{aligned}\bar{U}_1 &= -\bar{E}_1 + \bar{I}_1 \bar{X}_1 + \bar{I}_1 \bar{R}_1 \\ &= -\bar{E}_1 + \bar{I}_1 \bar{z}_1.\end{aligned}\quad (8-13)$$

由于原绕组的阻抗 z_1 很小, 原绕组内的阻抗电压降 $I_1 z_1$ 相对于外加电压 U_1 来说可忽略不计, 因此

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m. \quad (8-14)$$

我们知道, 变压器在空载运行时, 铁心中的主磁通 Φ 是由原绕组磁通势 $N_1 I_0$ 产生的, 而在负载运行时, 铁心中的主磁通 Φ 是由原绕组磁通势 $N_1 I_1$ 和副绕组磁通势 $N_2 I_2$ 共同产生的。但从式 (8-14) 可知, 当外加电压 U_1 及其频率 f 不变时, 则主磁通的幅值 Φ_m 基本上保持不变 (实际上从空载到满载有很小的变动)。所以, 有负载时的合成磁通势和空载时的磁通势应相等, 即

$$\overline{N_1 I_1} + \overline{N_2 I_2} = \overline{N_1 I_0}. \quad (8-15)$$

上式称为变压器在负载运行时的磁通势平衡方程式。

若把式 (8-15) 中的 $\overline{N_2 I_2}$ 移至等式右边, 两边除以 N_1 , 则得

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + \left(-\frac{N_2}{N_1} \bar{I}_2 \right) = \bar{I}_0 + \left(-\frac{1}{k} \bar{I}_2 \right). \quad (8-16)$$

令

$$-\frac{1}{k} \bar{I}_2 = \bar{I}_1',$$

则

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + \bar{I}_1'. \quad (8-17)$$

式 (8-17) 说明原电路中的电流 $\bar{I}_1$ 由两个分量组成: 其中 $\bar{I}_0$ 是用来产生主磁通 Φ , 称为励磁分量, 而 $\bar{I}_1'$ 是用来抵偿副电路中的电流

$\bar{I}_2$ 对磁路的影响, 称为负载分量。副电流愈大, 则原电路中负载分量也愈大, 它们的比值 I_2/I_1 , 始终等于变比 k 。

如前所述, 空载电流 I_0 仅占额定电流的百分之几, 因此在额定负载时空载电流可忽略不计, 于是可以认为

$$\bar{I}_1 \approx -\frac{1}{k} \bar{I}_2 = \bar{I}_1' \quad (8-18)$$

从上式可见, I_1 和 I_2 在相位上几乎相差 180° , 在有效值的大小上 I_1 约等于 I_2 的 $1/k$ 。

副电路的电压平衡方程式为

$$\bar{U}_2 = \bar{E}_2 + \bar{E}_{12} - \bar{I}_2 \bar{R}_2, \quad (8-19)$$

式中 E_{12} 为磁通势 $N_2 I_2$ 所产生的漏磁通 Φ_{12} 在副绕组中感应的电动势。 E_{12} 也可用一漏抗电压降来表示, 即

$$-\bar{E}_{12} = \bar{I}_2 \bar{X}_2. \quad (8-20)$$

所以

$$\begin{aligned} \bar{U}_2 &= \bar{E}_2 - \bar{I}_2 \bar{X}_2 - \bar{I}_2 \bar{R}_2 \\ &= \bar{E}_2 - \bar{I}_2 \bar{z}_2, \end{aligned} \quad (8-21)$$

式中 $\bar{I}_2 \bar{z}_2 = \bar{I}_2 \bar{R}_2 + \bar{I}_2 \bar{X}_2$ 为副绕组的阻抗电压降。如负载阻抗为

$$z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2},$$

则

$$\bar{U}_2 = \bar{E}_2 - \bar{I}_2 \bar{z}_2 = \bar{I}_2 \bar{z}_2. \quad (8-22)$$

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{(R_2 + R_z)^2 + (X_2 + X_z)^2}}, \quad (8-23)$$

I_2 与 E_2 的相位差为

$$\Psi_2 = \operatorname{tg}^{-1} \frac{X_2 + X_z}{R_2 + R_z}. \quad (8-24)$$

图 8-5 所示为变压器在电感性负载时的矢量图。

从矢量图上可以看出, 当外加电压 U_1 不变时, 随着副电流 I_2

的增加, 由于绕组内部阻抗电压降的增加, 将使副电压 U_2 发生变化。

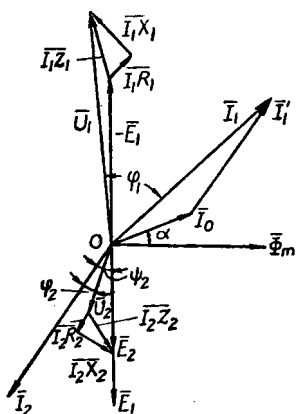


图 8-5. 变压器在电感性负载时的矢量图。

当 $U_1 = \text{常数}$ 时, $U_2 = f(I_2)$ 的关系曲线称为变压器的外特性。

可以证明, 在有电感性负载或电阻性负载时, 变压器的外特性曲线是

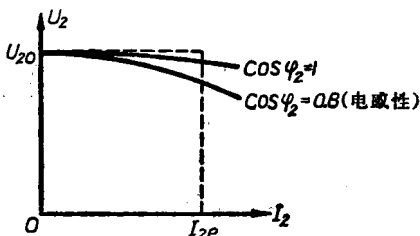


图 8-6. 变压器的外特性曲线。

下降的(图 8-6)。它表明变压器的副电压随着负载的增加而降低。在负载电流大小相同时, 电感性负载的功率因数愈低, 则电压下降愈大。

外特性变化的程度, 可用电压变动率 Δu 来表示。所谓电压变动率就是: 从空载到额定负载 ($I_2 = I_{2e}$) 时, 副电压变化的数值 ($U_{20} - U_2$) 对空载副电压 U_{20} 的百分比, 即

$$\Delta u = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \times 100\% \quad (8-25)$$

电力变压器的电压变动率一般是 2—3%。电压变动率不大的原因是由于变压器的电阻和漏电抗都很小。

8-5. 变压器的损失和效率

变压器在运行时产生两种损失, 即铁损失 P_{Fe} 和铜损失 P_{Cu} 。铁损失 P_{Fe} 包括磁滞损失 P_{cz} 和涡流损失 P_{wl} 两部分, 即

$$P_{Fe} = P_{cz} + P_{wl} = k_{cz} f B_m^2 + k_{wl} f^2 B_m^2.$$