

高等院校电气工程系列教材

电机学教程学习指导

戴文进 杨莉 编著

清华大学出版社

高等院校电气工程系列教材

电机学教程学习指导

戴文进 杨莉 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书为与前期出版的《电机学教程》配套的教学指导书,主要论述电机学的学习方法,全书共分 20 章,包括“内容提要”、“疑难剖析”、“拾遗补缺”、“习题解答”和“习题补充”等。

本书内容丰富、编排独特、构思新颖、指导得法,具有很好的学习指导价值。

本书可作为相应教材的配套参考书,也可供其他相关专业学生参考,还可供有关技术人员选用。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

电机学教程学习指导/戴文进,杨莉编著. --北京:清华大学出版社,2013

高等院校电气工程系列教材

ISBN 978-7-302-32058-6

I. ①电… II. ①戴… ②杨… III. ①电机学—高等学校—教学参考资料 IV. ①TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 078944 号

责任编辑:邹开颜

封面设计:傅瑞学

责任校对:赵丽敏

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:三河市君旺印装厂

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:17.5 字 数:421 千字

版 次:2013 年 6 月第 1 版 印 次:2013 年 6 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:31.00 元

产品编号:047436-01

此前笔者出版了《电机学教程》一书,深得读者喜爱,已被广泛采用。但电机学这门课程毕竟理论深奥、概念性强,学习中会遇到不少困难,因而读者纷纷要求出版一本与之配套的学习指导书籍,本书就是在这种情况下撰写出版的。

本书主要论述电机学这门课程的学习方法,书中对电机学各部分的内容都归纳出了“内容提要”、“疑难剖析”、“拾遗补缺”、“习题解答”和“习题补充”等内容,相信能对学生的学习和有很好的指导作用。

本书由南昌大学戴文进教授和杨莉副教授共同编著,戴文进教授撰写了第1、2、3、8、9、11、12、16、17、18、19章和第20章,杨莉撰写了其余的第4、5、6、7、10、13、14章和第15章。此外,戴文进教授的在校研究生王凯、陈向杰、赵杰、林卿生、杨华、王宝福、谢友慧、刘海静、邓志辉和王少夫等同学在本书的资料收集、文字录入、图表和曲线的绘制及扫描等方面做了大量工作,在此一并致谢。

本书作者虽都长期从事电机学的教学,且对电机学在理论上有一定的研究,但毕竟水平有限,故书中谬误之处在所难免,敬请读者不吝指正。

编者

2013年2月于南昌大学

第 1 章 变压器概览	1
1.1 内容提要	1
1.2 疑难剖析	2
1.3 习题解答	2
1.4 习题补充	4
第 2 章 变压器的运行分析	7
2.1 内容提要	7
2.2 疑难剖析	11
2.3 拾遗补缺	13
2.4 习题解答	13
2.5 习题补充	19
第 3 章 三相变压器	28
3.1 内容提要	28
3.2 疑难剖析	30
3.3 拾遗补缺	34
3.4 习题解答	36
3.5 习题补充	40
第 4 章 直流电机概览	51
4.1 内容提要	51
4.2 习题解答	51
4.3 习题补充	52
第 5 章 直流电机的运行分析	54
5.1 内容提要	54
5.2 习题解答	57
5.3 习题补充	61

第 6 章 直流电机的运行特性	69
6.1 内容提要	69
6.2 习题解答	73
6.3 习题补充	78
第 7 章 异步电机概览	91
7.1 内容提要	91
7.2 习题解答	91
7.3 习题补充	92
第 8 章 三相异步电动机的运行原理	94
8.1 内容提要	94
8.2 疑难剖析	103
8.3 拾遗补缺	103
8.4 习题解答	108
8.5 习题补充	114
第 9 章 三相异步电动机的运行特性	127
9.1 内容提要	127
9.2 习题解答	135
9.3 习题补充	140
第 10 章 同步电机概览	153
10.1 内容提要	153
10.2 习题解答	153
10.3 习题补充	155
第 11 章 同步发电机的运行分析	156
11.1 内容提要	156
11.2 拾遗补缺	168
11.3 习题解答	169
11.4 习题补充	179
第 12 章 同步发电机的并网运行	192
12.1 内容提要	192
12.2 习题解答	197
12.3 习题补充	207

第 13 章 同步电动机与同步调相机	216
13.1 内容提要	216
13.2 习题解答	218
13.3 习题补充	223
第 14 章 中小型特种电机	227
14.1 内容提要	227
14.2 习题解答	231
14.3 习题补充	234
第 15 章 微电机	236
15.1 内容提要	236
15.2 习题解答	245
15.3 习题补充	250
第 16 章 基本电磁规律的对立统一	257
16.1 内容提要	257
16.2 习题解答	258
第 17 章 励磁系统方式的分类统一	260
17.1 内容提要	260
17.2 习题解答	260
第 18 章 功角平面分布的完美统一	261
18.1 内容提要	261
18.2 习题解答	262
第 19 章 静态稳定判据的集中统一	264
19.1 内容提要	264
19.2 习题解答	264
第 20 章 分析工具的高度统一	266
20.1 内容提要	266
20.2 习题解答	269
参考文献	271

1.1 内容提要

1.1.1 基本要求

1. 了解变压器的基本结构和分类；
2. 熟知变压器的额定值及其含义，并运用其计算变压器的额定电流；
3. 了解标么值的概念及其在电机学中的运用。

1.1.2 掌握要点

1. 标么值的概念与运用

标么值的概念与运用在 1.2 节介绍。

2. 变压器的铭牌数据

变压器的铭牌数据主要包括额定容量 S_N 、额定电压 U_N 、额定电流 I_N 和额定频率 f_N 等。此外，在变压器的铭牌上还标注有相数、接线图、额定运行效率、阻抗压降和温升。对于特大型变压器还标注变压器的总质量、铁芯和绕组的质量以及储油量，供安装和检修时参考。

3. 根据变压器的铭牌数据计算其额定电流

根据变压器铭牌上的额定数据，可运用以下公式计算变压器的额定电流。

(1) 对于单相变压器

原边额定电流

$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}}$$

副边额定电流

$$I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}}$$

(2) 对于三相变压器

原边额定线电流

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}}$$

副边额定线电流

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}}$$

应该指出的是,对于三相变压器而言,铭牌上所标注的额定电压为线电压,以上计算得出的电流亦为线电流,容量为三相之值。

1.2 疑难剖析

本章的疑难问题是标幺(读 yao)值。

按理说标幺值不应该成为疑难问题,可不少教科书却开辟单独章节连篇累牍地讲述这个问题,反倒将此问题复杂化了,以至于不少学生学了半天,因不解其意,竟将其念成“标么(me)值”。其实,标幺值并不是电机学中的一个什么新鲜的物理概念,而只是初等数学中的一个数学概念。标幺值与百分值一样,就是人们所熟知的相对值。

相对值运用的方便之处为人尽知。比如,有人说某台电机此时的工作电流是 5 A,由于人们并不知道它的容量是多大,因此没人能知晓这台电机工作的状况:如若是一台微型电机,也许它早就烧坏了;如若是一台大型电机,也许只是处于空载。但如若告诉你其工作电流是 5%,你就一定知道它的工作状况了。

只是由于百分值的后面总跟着一个讨厌的百分号(%),这在电机学的大量运算中着实不方便。而百分值后之所以总跟着百分号,就是因为其概念是以“一百”作为基数,看实际值占其中的多少;如若以“一”作为基数,再来看实际值占其中的多少,就不会出现那个百分号了,而这就是所谓的标幺值。这么一说就很清楚了,标幺值就是将实际值标在基数“一”上的值,其结果是一个十进制的小数(只是有时并不为纯小数而已)。

与之类似,百分值就是标在基数“一百”上的值,从这个意义上讲,百分值可称为“标百值”。

那么,为什么要叫“标幺值”呢?其实,人们在电信领域中早就用到了这个“么”字。由于辨音上的方便,人们将电报电话中的“0”、“1”、“2”和“7”,分别读成“洞”、“么”、“两”和“拐”。而“1”又为什么要读成“么”呢?这是因为在人的认知中,“1”是早期定义的自然数中最小的数(后来扩展到了 0),而“么”字在我国民间就是“小”的意思。至今在湖南、江西和四川等地的农村,还有将“小妹”称为“么妹”的习惯。

本书讲到此,读者应该对标幺值有一个正确的认识了。

在此将采用标幺值的优点综述如下:

- (1) 标幺值与百分值一样属一种相对值,因而其具有相对值运用的一切优点;
- (2) 不论电机的容量的大小,若用标幺值表示其参数及性能数据,其值一般均处于一个很狭窄的范围之内,便于对其的正确性进行判断;
- (3) 当采用标幺值后,电机的匝比便为 1,这样便可免除原副边各参数和物理量的折算过程,此时各参数和物理量的标幺值是一样的,可大大简化运算过程。

1.3 习题解答

1-1 为什么在电力系统中广泛应用变压器?试举几个在工业企业及其他行业中运用变压器的例子。

答 发电机发出的电压不可能太高,一般只有 $10.5\sim 20\text{ kV}$,要想将发出的大功率电能直接送到很远的用电区去,几乎是不可能的。这是因为,低电压大电流输电,除了在输电线路路上产生很大损耗外,线路上产生的压降也足以使电能送不出去。为此,需要用升压变压器将发电机端电压升高到较高的输电电压(当输电的功率一定时,电压升高,电流就减小),输送过程产生的损耗将降低,能比较经济地将电能送出去。一般地,当输电距离越远,输送的功率越大,要求的输电电压也越高。例如,输电距离为 $200\sim 400\text{ km}$,输送容量为 $200\sim 300\text{ GW}$ 的输电线,输电电压一般需要 220 kV ,输电距离在 1000 km 以上,则要求有更高的输电电压。

当电能送到用电地区,要用降压变压器将电压降低为配电电压,然后送到用电分区,最后再经配电变压器将电压降到用户所需要的电压等级,供用户使用。大型动力设备,采用 6 kV 或 10 kV ;小型动力设备和照明用电则为 $380\text{ V}/220\text{ V}$ 。为了将两个不同电压等级的电力系统彼此联系起来,常常用到三绕组变压器。此外,还有各种专门用途的变压器,如整流变压器、电炉变压器等。由此可见,变压器的用途十分广泛,其品种、规格也很多。简单的输配电系统如图 1-1 所示。

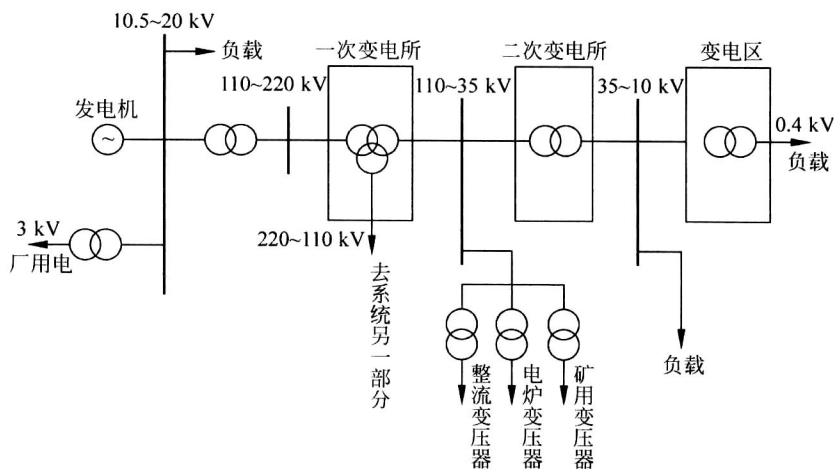


图 1-1 简单的输配电系统图

1-2 变压器有哪些主要部件？各部件起什么作用？

答 变压器的主要部件是高磁导率的闭合铁芯和套在铁芯上的一、二次绕组。铁芯构成了变压器磁路部分,绕组构成了变压器的电路部分。一、二次绕组通过铁芯磁路相耦合,从而可以利用电磁感应作用来实现对交流电能的变换。

1-3 简述变压器铁芯结构和绕组结构的形式。

答 变压器的铁芯用双面涂绝缘漆的硅钢片叠压而成,铁芯结构可以分为铁芯柱和铁轭,单相变压器有两个铁芯柱,三相变压器有三个铁芯柱。变压器的铁芯材料有芯式结构和壳式结构两种基本形式。

变压器绕组的基本形式有同心式和交叠式两种,芯式变压器常用同心式绕组、壳式变压器常用交叠式绕组。

1-4 铁芯的作用是什么？为什么要用厚 0.35 mm 、双面涂漆的硅钢片制造而成？

答 铁芯是变压器的主磁路,又是它的机械骨架。为了提高磁路的导磁性能,减少铁芯中的磁滞、涡流损耗,铁芯一般用高磁导率的厚 0.35 mm、双面涂漆的硅钢片叠压而成。

1-5 有一台单相变压器,额定容量 $S_N = 50 \text{ kV} \cdot \text{A}$,额定电压 $U_{1N}/U_{2N} = 220/36 \text{ V}$,求一、二次侧的额定电流。

解 一、二次侧额定电流分别为

$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}} = \frac{50\,000}{220} = 227.27(\text{A})$$

$$I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}} = \frac{50\,000}{36} = 1388.89(\text{A})$$

1-6 有一台三相电力变压器,容量为 $S_N = 5000 \text{ kV} \cdot \text{A}$,一、二次绕组分别采用星形和三角形接法, $U_{1N}/U_{2N} = 10/6.3 \text{ kV}$,求:

- (1) 变压器一、二次侧的额定电压和额定电流;
- (2) 变压器一、二次绕组的额定相电压和额定相电流。

解 (1) 由已知条件,一、二次侧额定线电压分别为

$$U_{1N} = 10 \text{ kV}, \quad U_{2N} = 6.3 \text{ kV}$$

一次绕组额定线电流为

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{5000}{\sqrt{3} \times 10} = 288.7(\text{A})$$

二次绕组额定线电流为

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{5000}{\sqrt{3} \times 6.3} = 458.2(\text{A})$$

- (2) 一次绕组为星形连接,一次侧额定相电压为(下标 ϕ 表示相值,下同)

$$U_{1N\phi} = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}} = \frac{10}{\sqrt{3}} = 5.774(\text{kV})$$

一次绕组额定相电流

$$I_{1N\phi} = I_{1N} = 288.7 \text{ A}$$

二次绕组为三角形连接,二次侧额定相电压

$$U_{2N\phi} = U_{2N} = 6.3 \text{ kV}$$

二次绕组额定相电流

$$I_{2N\phi} = \frac{I_{2N}}{\sqrt{3}} = \frac{458.2}{\sqrt{3}} = 264.5(\text{A})$$

1.4 习题补充

1-1 电力变压器的主要用途有哪些?为什么电力系统中变压器的安装容量比发电机的安装容量大?

答 电力变压器按它的用途主要有:(1)升压变压器;(2)降压变压器;(3)配电变压器;(4)联络变压器;(5)厂用电变压器。因为发电机发出的电能要经过变压器升压、降压和配电后才传送到用户,所以变压器安装容量是发电机安装容量的 6~8 倍。

1-2 变压器原、副方的额定电压的含义是什么?

答 变压器一次额定电压 U_{1N} 是指规定加到一次侧的电压,二次额定电压 U_{2N} 是指变压器一次侧加额定电压、二次侧空载时的端电压。

1-3 一台三相变压器,额定电压 $U_{1N}/U_{2N} = 10/3.15$ kV,额定电流 $I_{1N}/I_{2N} = 57.74/183.3$ A,求该变压器的额定容量。

解 额定容量

$$S_N = \sqrt{3}U_{1N}I_{1N} = \sqrt{3} \times 10 \times 57.74 = 1000(\text{kV} \cdot \text{A})$$

或

$$S_N = \sqrt{3}U_{2N}I_{2N} = \sqrt{3} \times 3.15 \times 183.3 = 1000(\text{kV} \cdot \text{A})$$

提示:变压器的一、二次额定容量相等。三相变压器的额定容量 S_N 是指三相总容量。三相变压器的额定电压、额定电流均是指线值。

1-4 有一台 D-50/10 单相变压器, $S_N = 50$ kV·A, $U_{1N}/U_{2N} = 10\,500/230$ V,试求变压器原、副线圈的额定电流?

解 一次绕组的额定电流

$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}} = \frac{50 \times 10^3}{10\,500} = 4.76(\text{A})$$

二次绕组的额定电流

$$I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}} = \frac{50 \times 10^3}{230} = 217.39(\text{A})$$

1-5 一台三相降压变压器的额定容量 $S_N = 3200$ kV·A,额定电压 $U_{1N}/U_{2N} = 35/10.5$ kV,一、二次绕组分别为星形、三角形连接,求:(1)该变压器一、二次侧的额定线电压、额定相电压以及额定线电流、额定相电流;(2)若负载的功率因数为 0.85(滞后),则该变压器额定运行时能带多少有功负载,发出的无功功率又是多少(忽略负载运行时的二次电压的变化)?

解 (1) 一次侧的额定线电压就是一次额定电压,即 $U_{1N} = 35$ kV。

由于一次绕组为星形连接,因此一次侧的额定相电压为

$$U_{1N\phi} = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}} = \frac{35}{\sqrt{3}} = 20.21(\text{kV})$$

一次侧的额定线电流和相电流为

$$I_{1N} = I_{1N\phi} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{3200}{\sqrt{3} \times 35} = 52.79(\text{A})$$

二次侧的额定线电压就是二次额定电压,即 $U_{2N} = 10.5$ kV。

由于二次绕组为三角形连接,因此二次侧额定相电压 $U_{2N\phi} = U_{2N} = 10.5$ kV。二次侧的额定线电流为

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{3200}{\sqrt{3} \times 10.5} = 176(\text{A})$$

二次侧额定相电流为

$$I_{2N\phi} = \frac{I_{2N}}{\sqrt{3}} = \frac{176}{\sqrt{3}} = 101.6(\text{A})$$

(2) 若负载的功率因数为 $\cos \varphi = 0.85$, 不计负载运行时二次电压的变化, 则额定运行时变压器发出的有功功率为

$$P_N = S_N \cos \varphi = 3200 \times 0.85 = 2720(\text{kW})$$

发出的无功功率为

$$Q_N = S_N \sin \varphi = 3200 \times 0.5268 = 1686(\text{kvar})$$

提示: 注意三相变压器在不同连接方式下的相电压与线电压关系、相电流与线电流关系, 以及它们的额定值与额定容量的关系。

1-6 有一台 SSP-125 000/220 三相电力变压器, YN, d 接线, $U_{1N}/U_{2N} = 220/10.5 \text{ kV}$, 求:

- (1) 变压器额定电压和额定电流;
- (2) 变压器原、副线圈的额定相电流和额定相电流。

解 (1) 一、二次侧额定电压

$$U_{1N} = 220 \text{ kV}, \quad U_{2N} = 10.5 \text{ kV}$$

一次侧额定电流(线电流)

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{125\,000}{\sqrt{3} \times 220} = 328.04(\text{A})$$

二次侧额定电流(线电流)

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{125\,000}{\sqrt{3} \times 230} = 6873.22(\text{A})$$

(2) 由于采用 YN, d 接线, 故

一次绕组的额定相电压

$$U_{1N\phi} = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127.02(\text{kV})$$

一次绕组的额定相电流

$$I_{1N\phi} = I_{1N} = 328.04(\text{A})$$

二次绕组的额定相电压

$$U_{2N\phi} = U_{2N} = 10.5(\text{kV})$$

二次绕组的额定相电流

$$I_{2N\phi} = \frac{I_{2N}}{\sqrt{3}} = \frac{6873.22}{\sqrt{3}} = 3968.26(\text{A})$$

2.1 内容提要

2.1.1 基本要求

1. 熟知变压器空载运行时内部各电磁量的关系；
2. 熟知变压器空载运行时励磁电流的概念，掌握空载运行时的变比、电压平衡方程、等值电路和相量图；
3. 熟知变压器负载运行时内部各电磁量的关系；
4. 掌握负载运行时原副边的折合算法；
5. 熟练掌握变压器负载运行时的电压平衡方程、等值电路和相量图；
6. 熟练掌握变压器的空载和短路实验，以及运用其实验结果求取变压器等值电路参数的方法；
7. 熟知变压器运行时的特性指标，熟练掌握变压器的电压变化率和效率这两个特性指标的计算方法。

2.1.2 掌握要点

1. 变压器的基本工作原理

变压器是将一个数值的交流电压变换为另一数值的交流电压的交流电能变换装置，以电磁场作为原副边绕组间的能量传递媒介，基本工作原理是电磁感应定律。

2. 变压器的主磁通

变压器的磁路中存在着主磁通，其主要功能是实现原副边绕组之间的能量传递。

变压器的主磁通同时交链原副边绕组，在原副边绕组中产生感应电动势 E_1 和 E_2 ：

$$E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m \quad (2-1)$$

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

写成相量形式则：

$$\dot{E}_1 = -j \frac{1}{\sqrt{2}} \omega N_1 \dot{\Phi}_m = -j 4.44 f N_1 \dot{\Phi}_m$$

$$\dot{E}_2 = -j \frac{1}{\sqrt{2}} \omega N_2 \dot{\Phi}_m = -j 4.44 f N_2 \dot{\Phi}_m$$

由于原副边绕组的匝数不同,因而在传递能量的同时实现了电压的变换。其原理如下:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{4.44fN_1\Phi_m}{4.44fN_2\Phi_m} = \frac{N_1}{N_2} = k$$

式中 k 为电压变比,决定于原副绕组匝数之比。

变压器空载运行时,空载电流很小,一般为额定电流的 5% 左右,由此引起的漏阻抗压降很小。若忽略由空载电流所引起的电阻压降和漏磁电动势,则有

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1 \quad (2-3)$$

因而变比又可写成如下形式:

$$k = \frac{U_1}{U_2}$$

即变压器的变比可理解为变压器原边电压与副边空载时的端点电压之比。换言之,只要 $N_1 \neq N_2$,便有, $U_1 \neq U_2$,从而可达到了改变电压之目的。

3. 变压器的漏磁通

变压器的磁路中还存在着漏磁通,漏磁通不参与原副边绕组之间的能量的传递,但影响变压器的性能。分别与原边绕组或副边绕组交链,在变压器内部产生电压降,在电机学理论中用漏电抗来表征其作用。下面以原边为例推导如下:

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j \frac{1}{\sqrt{2}} \omega N_1 \dot{\Phi}_{1\sigma} = -j \frac{1}{\sqrt{2}} \omega \dot{\Psi}_{1\sigma} = -j \frac{1}{\sqrt{2}} \omega L_{1\sigma} \dot{I}_0 = -j \dot{I}_0 X_{1\sigma}$$

式中 $X_{1\sigma}$ 为原边绕组的漏电抗, $X_{1\sigma} = \omega L_{1\sigma}$ 。

4. 变压器的原副边绕组中的电动势平衡

在变压器的原副边绕组中均存在着各自的电动势平衡关系:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(R_1 + jX_{1\sigma})$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 + \dot{I}_2(R_2 + jX_{2\sigma})$$

5. 原副边绕组之间的磁动势平衡

在原副边两绕组之间存在着磁动势平衡关系。当副边带上负载后,其绕组中便有电流流过。由该电流产生的副边绕组的磁动势 $\dot{F}_2 = \dot{I}_2 N_2$ 此时也同时作用在铁芯磁路上。

据式(2-3)可得

$$U_1 \approx E_1 = 4.44fN_1\Phi_m$$

由上式可见,若端电压一定,则变压器运行时不管负载如何变化,其磁通 Φ_m 是基本不变的。

这也就是说,此时原副边两绕组的磁动势之和仍然等于空载时的磁动势 $\dot{I}_m N_1$,并基本保持不变,即

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_m N_1 \quad (2-4)$$

根据变压器运行时的相量图可知, \dot{I}_1 与 \dot{I}_2 的相位几乎是相反的,因此 $\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2$ 要基本维持一个定值, \dot{I}_1 就必然随着 \dot{I}_2 的变化而变化。也就是说,当变压器副边的负载增大也即 I_2 增大时, I_1 就必然随之增大,因为只有这样才能维持磁动势的平衡,这就是变压器运

行时的磁动势平衡关系。式(2-4)称为磁动势平衡方程式。

6. 磁动势平衡的物理意义

磁动势平衡的物理意义是：由于要维持磁动势平衡，当变压器副边的负载发生变化时，变压器原边的电流必然会跟随副边电流的变化而变化。这就是为什么变压器的原副边之间根本就没有电的联系，而当副边电流发生变化时，原边电流也会跟随变化的原因所在。正是原边电流跟着副边电流变化，比如说副边的负载增大，原边电流也就跟着副边电流的增大而增大，从而原边从电网的输入功率增加，从而为副边提供更大的功率，以维持副边增大的输出。如若没有变压器原副边之间的磁动势平衡，其原边是无法知晓副边输出的变化的，也就无法相应地提供更大的输入，以维持原副边之间的功率平衡，保障变压器的正常运行，这就是磁动势平衡的意义所在。

7. 磁动势平衡的电流表达式

将式(2-4)除以 N_1 并移项可得磁动势平衡的电流表达式：

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_m - \dot{I}_2 \frac{N_2}{N_1} = \dot{I}_m + \dot{I}_{1L}$$

式中 \dot{I}_{1L} 为原边电流的负载分量， $\dot{I}_{1L} = -\dot{I}_2 \frac{N_1}{N_2}$ 。

8. 电流表达式的物理意义

当变压器的副边有负载电流时，原边电流 \dot{I}_1 中含有两个分量。其中， \dot{I}_m 基本与空载时的一样，也是用以产生主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 。而负载分量 \dot{I}_{1L} 即为副边带上负载后，原边电流 \dot{I}_1 中出现的分量。

换言之，当副边绕组流过电流 \dot{I}_2 ，原边绕组便自动流入负载分量电流 \dot{I}_{1L} ，以满足 $\dot{I}_{1L}N_1 + \dot{I}_2N_2 = 0$ 。这就是为什么变压器的原副边之间根本就没有电的联系，而当副边电流发生变化时，原边电流也会跟随变化的原因所在。

这就是磁动势平衡电流表达式的物理意义。

9. 励磁电流中的高次谐波

在铁芯饱和时，为了得到正弦变化的磁通，励磁电流中必须含有高次谐波，尤其是三次谐波。在变压器分析中常采用等效正弦波电流来等值替代，考虑铁耗后，等效励磁电流超前主磁通一个角度 α_{Fe} 。

10. 等效电路中的励磁阻抗 $R_m + jX_m$

实际的变压器中既有电路也有磁路，为了分析方便，因而引入了励磁阻抗 $R_m + jX_m$ （加上此前引出的漏电抗 $X_{1\sigma}$ 、 $X_{2\sigma}$ ）等参数，再将副边的各物理量折算至原边，便得到原副边具有电的直接联系的等效电路。

11. 变压器运行分析的三套工具

基本方程式、等效电路和相量图是分析变压器运行的三套分析工具。其中，基本方程式是变压器电磁关系的一组数学表达式，等效电路则是等效于实际变压器的一个电路图，相量图则是原副边的各物理量相位关系的示图。三者本质一致，作用相辅相成。在

实际应用时,定性分析时采用基本方程式,分析相位关系时采用相量图,定量计算时采用等效电路。

变压器的这三套工具在配套教材中已有详述,本书的绪论中也有总览,在此不再复述。

12. 根据空载和短路实验数据求取等效电路的参数

(1) 按图 2-1 所示的短路实验的接线图实验,根据所测取的实验数据便可求得变压器的阻抗、电阻和电抗:

$$|Z_k| = \frac{U_k}{I_k}, \quad R_k = \frac{p_k}{I_k^2}, \quad X_k = \sqrt{|Z_k|^2 - R_k^2}$$

由上式得出的电阻和阻抗还需计算折算到标准温度 75°C 时的值:

$$R_{k(75^\circ\text{C})} = R_k \frac{234.5 + 75}{234.5 + \theta}, \quad |Z_{k(75^\circ\text{C})}| = \sqrt{R_{k(75^\circ\text{C})}^2 + X_k^2}$$

(2) 按图 2-2 所示的空载实验的接线图实验,根据所测取的实验数据便可求得变压器的变比、励磁阻抗、励磁电阻、励磁电抗:

$$k = \frac{U_0}{U_{20}}, \quad |Z_m| \approx \frac{U_0}{I_0}, \quad R_m \approx \frac{p_0}{I_0^2}, \quad X_m = \sqrt{|Z_m|^2 - R_m^2}$$

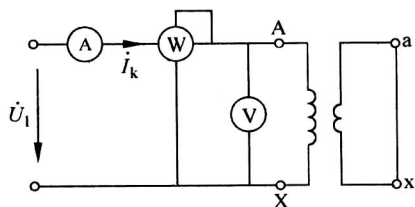


图 2-1 短路实验接线图

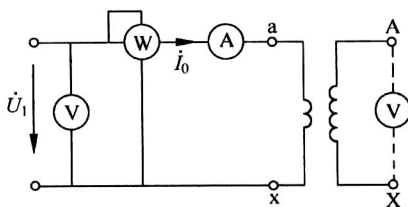


图 2-2 空载实验接线图

13. 变压器的主要性能指标

变压器的主要性能指标有两个:电压变化率 ΔU 和效率 η 。

(1) 必须熟练掌握的有关计算公式

① 电压变化率 $\Delta U\%$ 的计算公式

定义表达式:

$$\begin{aligned} \Delta U\% &= \frac{U_{20} - U_2}{U_{2N}} \times 100\% = \frac{kU_{20} - kU_2}{kU_{2N}} \times 100\% \\ &= \frac{U_{1N} - U_2'}{U_{1N}} \times 100\% = (1 - U_2^*) \times 100\% \end{aligned}$$

参数表达式:

$$\Delta U\% = \beta(R_k^* \cos \varphi_2 + X_k^* \sin \varphi_2) \times 100\%$$

② 效率 η 及产生最大效率时的负载系数 β_m

$$\eta = \left[1 - \frac{\sum p}{p_2 + \sum p} \right] \times 100\% = \left(1 - \frac{p_0 + \beta^2 p_{kN}}{\beta S_N \cos \varphi_2 + p_0 + \beta^2 p_{kN}} \right) \times 100\%$$

$$\beta_m = \sqrt{\frac{p_0}{p_{kN}}}$$