



普通高等教育“十二五”规划教材

电机学

学习指导与题解

初 壮 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

电机学

学习指导与题解

主编 初 壮
编写 李书权 李月玲
主审 胡虔生



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。

本书是曾令全教授主编、中国电力出版社出版的《电机学》、机械工业出版社出版的《电机学》等教材的配套教学用书。内容包括绪论、变压器、交流电机的绕组及其电动势和磁动势、异步电机、同步电机和直流电机。书中对教材各章的知识要点进行了总结；对不易掌握和理解的内容较多的章节，书中提供了学习指导；本书还对教材中出现的所有思考题和习题给出了解答。本书内容丰富，深入浅出，便于读者自学。

本书适合作高等院校电气工程及其自动化专业以及相关专业的电机学或相关课程的补充教材和自学辅导用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机学学习指导与题解/初壮主编. —北京: 中国电力出版社, 2014. 9

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-6066-2

I. ①电… II. ①初… 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 (2014) 第 135968 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 9 月第一版 2014 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 11 印张 263 千字

定价 24.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

电机学是电气工程及其自动化专业的专业基础课，强电类专业的多数后续课程都需要较好的电机学基础知识。近年来，普通高等学校的电气工程及其自动化专业普遍以“宽口径”作为重要建设理念，在加强新技术、新知识引入的同时不免要对原有的专业基础课与专业课进行缩减。电机学一直是一门难学难教的课程。如何在新形势下保证课程的教学效果与质量，完成课程的教学目标，是值得探讨和努力的。

为更好地开展有特色、有针对性的教学实践，近十年间东北电力大学电机学课程组先后出版了两个版本电机学教材，满足了不同层次、不同目标的教学需要。习题是电机学课程的重要内容，两个版本的教材中都编入了大量的思考题与计算题，以帮助学生从不同角度思考、理解课程内容。课时减少的同时又要尽量将后续课程需要的基础知识在课堂上进行讲授，必然要减少课内的用于解题及答疑的时间。这就需要学生在课后加强训练与思考。这部分学习活动以学生自学为主。教材中编入了众多经典的习题、思考题，但散见于众多的电机学教材和学习辅导书之中。为了提高学生学习的学习效率，我们觉得有必要针对上述自编教材编写辅助教材。

在使用自编教材进行教学的过程中，为把解答做得尽量地完善和正确，课程组负责人、《电机学》教材主编曾令全教授，建议我们把这些资源进行完善并出版，以更好服务于教学。近几年中，根据学生的反馈和师生之间的互动，我们对其中的问题不断进行修改。作者感谢曾令全教授在本书编写过程中给予的持续指导与支持。作者还要感谢东北电力大学电机学资深教师孙庆本教授，在教学和本书编写过程中给予的关心和指导。东南大学胡虔生教授对本书进行了认真细致的审阅。

由于编者讲授这门课程的时间并不是很长，且书稿又是在繁重的教学及科研等工作之余完成的，书中难免存在疏漏之处，恳请读者批评指正。

编 者

2014年6月

目 录

前言	
绪论	1
知识提要	1
学习指导	1
思考题解答	2
习题解答	2
第一篇 变 压 器	
第一章 变压器概述	6
知识提要	6
思考题解答	6
习题解答	7
第二章 变压器运行原理	8
知识提要	8
学习指导	8
思考题解答	10
习题解答	13
第三章 三相变压器	20
知识提要	20
学习指导	20
思考题解答	21
习题解答	24
第四章 变压器的瞬变过程	32
知识提要	32
学习指导	32
思考题解答	32
习题解答	33
第五章 特种变压器	35
知识提要	35
学习指导	35
思考题解答	36
习题解答	38

第二篇 交流电机的绕组及其电动势和磁动势

第六章 交流绕组的构成	42
知识提要	42
思考题解答	42
习题解答	43
第七章 交流绕组的感应电动势	46
知识提要	46
学习指导	46
思考题解答	46
习题解答	48
第八章 交流绕组的磁动势	52
知识提要	52
学习指导	52
思考题解答	52
习题解答	55

第三篇 异步电机

第九章 异步电机概述	60
知识提要	60
思考题解答	60
习题解答	61
第十章 三相异步电动机的运行分析	63
知识提要	63
学习指导	63
思考题解答	64
习题解答	68
第十一章 三相异步电动机的功率、转矩和特性	71
知识提要	71
学习指导	71
思考题解答	71
习题解答	74
第十二章 三相异步电动机的起动、调速与制动	80
知识提要	80
学习指导	80
思考题解答	81
习题解答	84
第十三章 三相异步电动机在不对称电压下运行及单相异步电动机	88
知识提要	88

思考题解答	88
第十四章 特种异步电机	90
知识提要	90
思考题解答	90

第四篇 同 步 电 机

第十五章 同步电机概述	92
知识提要	92
学习指导	92
思考题解答	92
习题解答	93
第十六章 同步发电机的运行原理	95
知识提要	95
学习指导	95
思考题解答	96
习题解答	100
第十七章 同步发电机的运行特性	103
知识提要	103
思考题解答	103
习题解答	105
第十八章 同步发电机的并联运行	111
知识提要	111
学习指导	111
思考题解答	112
习题解答	117
第十九章 同步电动机及同步补偿机	127
知识提要	127
思考题解答	127
习题解答	129
第二十章 同步发电机的不对称运行	133
知识提要	133
学习指导	133
思考题解答	133
习题解答	136
第二十一章 同步发电机的突然短路	139
知识提要	139
学习指导	139
思考题解答	139
习题解答	143

第二十二章 同步电机的振荡	146
知识提要	146
思考题解答	146
习题解答	147

第五篇 直 流 电 机

第二十三章 直流电机概述	150
知识提要	150
思考题解答	150
习题解答	151
第二十四章 直流电机的绕组和电枢反应	153
知识提要	153
思考题解答	153
习题解答	154
第二十五章 直流发电机	156
知识提要	156
思考题解答	156
习题解答	158
第二十六章 直流电动机	160
知识提要	160
思考题解答	160
习题解答	162
第二十七章 直流电机的换向	166
知识提要	166
思考题解答	166
参考文献	168

绪 论

知识提要

1. 制造电机需要使用导电材料、绝缘材料、机械支撑材料及导磁材料。

导磁材料具有高导磁性、磁饱和性和交变磁场下的磁滞特性。铁磁材料处于交变磁场中会产生磁滞损耗和涡流损耗，铁磁损耗与所处磁场的最大磁感应强度、磁场交变频率及铁磁材料的质量等因素有关。

2. 电磁感应定律揭示了如何在磁场中的导体上获得感应电动势（及感应电流），电磁力定律表明磁场中的导体会受到电磁力的作用。

3. 安培环路定律揭示了空间磁场的磁场强度与建立空间磁场的电流之间的关系。

4. 借助于磁路、磁通、磁导、磁动势和电路的概念，分析电机时常把电磁场问题转化成磁路、电路的问题，采用电流、磁通等宏观量描述问题，使分析简化，并可满足工程上所要求的准确性。

学习指导

1. 铁磁材料的性质及其对磁路磁导（或磁阻）的影响

一段磁路如果主要以铁磁材料为主，则在相同磁动势作用下，通过这段磁路的磁通要比非铁磁材料为主时大得多。这是铁磁材料的高导磁性所产生的后果：铁磁材料磁导率高，所以磁路磁导大（或者说磁阻小），故磁通较大。

磁路主要以铁磁材料构成，但含有气隙的磁路在磁动势较小时，磁通较小，气隙的磁阻远大于铁磁材料，磁压降的绝大部分都落在气隙上，气隙对磁路的影响是主要的，可忽略铁磁材料特性的影响，磁阻为常数。在磁动势较大时，磁通较大，铁磁材料会产生磁饱和现象，随着磁动势的增大，铁磁材料磁导率下降，磁路磁导下降，亦即磁阻会增大，此时需要考虑铁磁材料的特性的影响。

2. 带铁芯线圈的电路电感与磁路磁导的关系

带铁芯线圈的铁芯部分可看作是一段磁路，将其磁导记为 Λ_m ；线圈部分在电路中以电感呈现，记为 L_m 。如果线圈匝数为 N ，流过交流电流 i ，则磁动势为 Ni ，忽略漏磁通，则铁芯中的磁通为

$$\phi = Ni \cdot \Lambda_m$$

由电感定义，知其为线圈所交链的磁链 ψ 和流过线圈电流的比值，即

$$L_m = \frac{\psi}{i} = \frac{N\phi}{i} = \frac{N}{i} Ni \cdot \Lambda_m = N^2 \cdot \Lambda_m$$

可见铁芯线圈的电感与线圈匝数的平方成正比，与线圈铁芯磁路的磁导成正比。

交流电路中，铁芯线圈的电抗为 $x_m = \omega L_m = \omega N^2 \Lambda_m = 2\pi f N^2 \Lambda_m$ 。可见，交流电路正弦

稳态分析中的线圈电抗与磁路磁导成正比，磁导越大，电抗越大；磁阻越大，电抗越小。



思考题解答

0-1 电机的磁路常采用什么材料制成？这些材料各有哪些主要特性？

电机磁路通常采用硅钢片等铁磁材料制成。铁磁材料具有高导磁性、磁饱和性和交变磁场下的磁滞特性。

0-2 磁滞损耗和涡流损耗是什么原因引起的？铁磁损耗与哪些物理量有关？

铁磁材料处于交变磁场中，其中的磁畴因总是试图随着外磁场方向排列而不断翻转，磁畴转动消耗能量而引起损耗，这种损耗即为磁滞损耗。铁磁材料本身为导体，当其处于交变磁场中，会产生感应电动势并形成感应电流，这些电流围绕磁通呈旋涡状流动，称为涡流。涡流在铁磁材料电阻上产生的损耗即为涡流损耗。

铁磁损耗与铁磁材料所处交变磁场的频率 f 、磁感应强度及铁磁材料的质量 G 有关系，可用下式近似表示 $p_{Fe} = C_{1/50} \left(\frac{f}{50}\right)^\beta B_m^2 G$ 。这里， $C_{1/50}$ 为铁损耗系数； β 为频率指数，其值在 $[1.2, 1.6]$ 范围内； B_m 为交变磁场磁通密度最大值。可见，对于一个确定的磁路（铁损耗系数与质量保持不变），如果 f 增大，或者 B_m 增大，都会使铁磁损耗增加。

0-3 磁路的磁阻如何计算？磁路的饱和程度对磁阻影响如何？

一段长度为 l 、磁导率为 μ 、截面积为 A 的均匀磁路，其磁阻为 $R_m = \frac{l}{\mu A}$ 。如果磁路饱和，在饱和程度增加时，磁导率 μ 会下降，磁阻 R_m 会增大。

0-4 变压器电动势、运动电动势产生的原因有什么不同？其大小与哪些因素有关？

变压器电动势、运动电动势产生原因的不同之处在于，变压器电动势是由于线圈所处磁场的磁通随时间变化而产生的，运动电动势是由于线圈与磁场间存在相对运动而产生的。

变压器电动势的大小与线圈匝数及线圈交链的磁通随时间的变化率成正比；运动电动势的大小与恒定磁场的磁感应强度、线圈运动速度、导体有效长度成正比。

0-5 试说明电机学中常用的基本定律有哪几个？

电机学的常用定律主要包括安培环路定律、磁路欧姆定律、电磁感应定律与电磁力定律，此外还会用到磁路基尔霍夫第一定律和磁路基尔霍夫第二定律，以及基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律。

其中，安培环路定律用来描述磁场强度与建立磁场的电流之间的关系；电磁感应定律用来描述变化磁场中导体的感应电动势与变化磁场之间的关系；电磁力定律用来描述磁场中的载流导体受到的电磁力与磁感应强度、导体电流之间的关系。



习题解答

0-1 在图 0-1 中，若一次绕组外加正弦电压 u_1 ，绕组电阻为 r_1 ，流过绕组的电流为 i_1 时，问：

(1) 绕组内为什么会感应出电动势?

(2) 标出磁通, 一、二次绕组感应电动势的正方向。

(3) 当电流 i_1 增加时, 分别标出两侧绕组的感应电动势的实际方向。

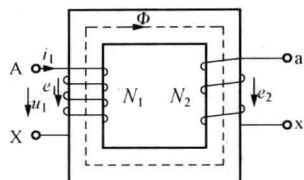


图 0-1 习题 0-1 图

解 (1) 一次绕组外加正弦电压 u_1 , 流过绕组的电流 i_1 为正弦交流电流, 它会在变压器铁芯中产生正弦交变的磁通。一、二次绕组位于上述交变磁通所在磁场, 即磁场相对于绕组而言为一变化磁场, 故绕组内会产生感应电动势。

(2) 这里采用电流与磁通为右手螺旋关系, 电流正方向为由电动势低电位流向电动势高电位, 则磁通, 一、二次绕组感应电动势正方向如图 0-1 所示。

(3) 当电流 i_1 方向如图 0-1 且增加时, 产生感应电动势对应的感应电流应有阻止这一电流 (i_1) 增加的趋势, 故其方向与 i_1 反向, 此时感应电动势方向分别为 $X \rightarrow A$, $x \rightarrow a$ 。

0-2 试画出图 0-2 所示磁场中载流导体的受力方向。

解 根据左手定则, 受力方向如图 0-2 所示。

0-3 螺线管中磁通与电动势的正方向如图 0-3 所示, 当磁通变化时, 分别写出它们之间的关系式。

解 (1) 图中电动势 (电流) 方向与磁通为左手螺旋关系, 故

$$e = N \frac{d\phi}{dt}$$

(2) 图中电动势 (电流) 方向与磁通为右手螺旋关系, 故

$$e = -N \frac{d\phi}{dt}$$

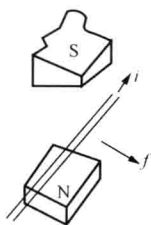


图 0-2 习题 0-2 图

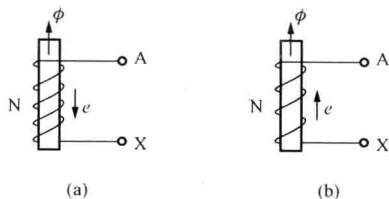


图 0-3 习题 0-3 图

0-4 在图 0-4 所示磁路中, 两个线圈都接在直流电源上, 已知 I_1 、 I_2 、 N_1 、 N_2 , 回答下列问题:

(1) 总磁动势 F 是多少?

(2) 若 I_2 反向, 总磁动势 F 又是多少?

(3) 电流方向仍如图所示, 若在 a 、 b 处切开形成一空气隙, 总磁动势 F 是多少? 此时铁芯磁压降大还是空气隙磁压降大? 并比较铁芯和气隙中 B 、 H 的大小。

解 (1) $F = N_1 I_1 - N_2 I_2$

(2) $F = N_1 I_1 + N_2 I_2$

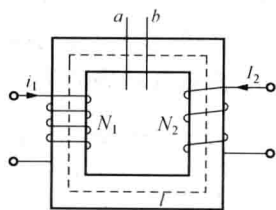


图 0-4 习题 0-4 图

(3) 总磁动势与(1)中相同,即为 $F = N_1 I_1 - N_2 I_2$ 。此时空气隙磁压降大,这是因为,虽然气隙很短,但其导磁率远小于铁芯导磁率,使其磁阻远大于铁芯磁路磁阻,而这两部分磁通相同,故可知空气隙磁压降大。

铁芯、气隙流通同一磁通,截面积相同,故由 $B = \frac{\phi}{S}$ 知磁感应强度 B 相同。又由 $B =$

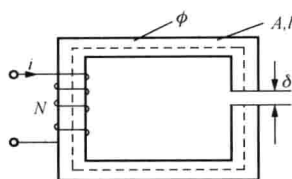


图 0-5 习题 0-5 图

μH , $\mu_{\text{气隙}} \ll \mu_{\text{铁芯}}$, 故 $H_{\text{气隙}} > H_{\text{铁芯}}$ 。

0-5 在图 0-5 中,铁芯用硅钢片 DR510-50 叠成,截面积 $A = 12.25 \times 10^{-4} \text{m}^2$,铁芯的平均长度 $l = 0.4 \text{m}$,气隙长度 $\delta = 0.5 \times 10^{-3} \text{m}$,线圈匝数 $N = 600$ 匝。试求:产生磁通 $\phi = 10.9 \times 10^{-4} \text{Wb}$ 时所需要的励磁电流(DR510-50 磁化曲线表见表 0-1)。

表 0-1 50Hz, 0.5mm, DR510-50 硅钢片磁化曲线表(部分)

B/T	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.7	210	213	216	220	224	228	232	236	240	245
0.8	250	255	260	265	270	276	281	287	293	299
0.9	306	313	319	326	333	341	349	357	365	374

注 表中磁场强度单位为 A/m。

解 磁通 ϕ 对应的磁通密度

$$B = \frac{\phi}{A} = \frac{10.9 \times 10^{-4}}{12.25 \times 10^{-4}} = 0.89 \text{T}$$

气隙磁导率为 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$, 气隙中磁场强度为

$$H_{\delta} = \frac{B}{\mu_0} = \frac{0.89}{4\pi \times 10^{-7}} = 708\,077 \text{A/m}$$

查表 0-1 知 $B = 0.89 \text{T}$ 时

$$H_{\text{Fe}} = 299 \text{A/m}$$

此时磁路上总的磁压降为

$$H_{\delta} \delta + H_{\text{Fe}} l = 708\,077 \times 0.5 \times 10^{-3} + 299 \times 0.4 = 473.6 \text{A}$$

由于 $NI = H_{\delta} \delta + H_{\text{Fe}} l$ 有

$$I = \frac{H_{\delta} \delta + H_{\text{Fe}} l}{N} = \frac{473.6}{600} = 0.789 \text{A}$$

0-6 设有 100 匝长方形线圈,如图 0-6 所示,线圈的尺寸为 $a = 0.1 \text{m}$, $b = 0.2 \text{m}$,线圈在均匀磁场中围绕着连接长边中点的轴线以均匀转速 $n = 1000 \text{r/min}$ 旋转,均匀磁场的磁通密度 $B = 0.8 \text{Wb/m}^2$ 。试写出线圈中感应电动势的时间表达式,算出感应电动势的最大值和有效值,并说明出现最大值时的位置。

解 根据电磁感应原理,真正切割磁力线的为长度为 a 的两条边,当这两条边运动的线速度方向与磁力线方向垂直时,感应电动势值最大,此时线速度

$$v = \omega r = \frac{1000}{60} \cdot 2\pi \cdot \frac{b}{2}$$

感应电动势最大值为

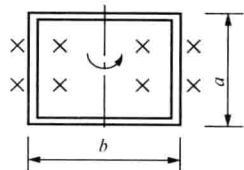


图 0-6 习题 0-6 图

$$E_m = 2NBav = 2 \times 100 \times 0.8 \times \frac{1000}{60} \cdot 2\pi \times \frac{0.2}{2} = 167.6\text{V}$$

记右侧导体运动方向与磁场方向夹角为

$$\alpha = \omega t = \frac{1000}{60} \cdot 2\pi t = 105t$$

瞬时表达式为 $e = 167.6 \sin 105t$ ，有效值为 $E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 118.5\text{V}$ 。

第一篇 变 压 器

第一章 变 压 器 概 述



知识提要

1. 油浸式变压器有油箱、铁芯、绕组、变压器油、绝缘套管、散热器等几个主要部分。
2. 铁芯采用薄硅钢片叠压而成，其目的是为了减小涡流损耗。变压器油有绝缘和散热的作用。
3. 三相变压器的额定电压指的是额定线电压，额定电流指的是额定线电流。
4. 线电压与相电压、线电流与相电流之间的关系由三相绕组的连接关系确定。



思考题解答

1-1 电力变压器在电力系统中有那些应用？为什么电力系统中变压器的安装容量大于发电机安装容量？

升压变压器、降压变压器、配电变压器是电力变压器主要形式。从发电厂生产电能至负载消耗电能的过程中，需要进行多次电压变换进行传输，这包括发电厂中通过升压变压器把发电机端电压提升至输电电压等级，远距离传输至负载中心，进而通过降压变压器把电压转换成二次输电电压或配电电压，最后经配电变压器把电能输送至最终负载。故电力系统中变压器的安装容量大于发电机安装容量。

1-2 变压器的铁芯作用是什么？为什么要用 0.35mm、表面涂绝缘漆的硅钢片制造铁芯？

变压器是一种输电设备，电能流入变压器一次绕组通过电磁感应传递至二次绕组。其中，交变磁场是电能传输的场所和媒介。变压器铁芯的作用是定形磁场，并在有限的空间内获得足够大的磁场。

采用硅钢片制造铁芯，首先，因为硅钢片采用铁磁材料制造而成，具有较高的导磁率，保证了在有限空间内获得足够大的磁场，用来转换电能；其次，因为硅钢片添加了硅元素，其电阻率很高，可较好抑制变压器铁芯在流过交变磁通时产生的涡流；第三，采用 0.35mm、表面涂有绝缘漆的硅钢片可以使涡流限制在每片硅钢片之内，进一步减小了涡流损耗。

1-3 油浸式变压器都有哪些主要部件？变压器油起什么作用？

油浸式变压器主要部件有铁芯、绕组、油箱、变压器油绝缘套管、散热器等。变压器油主要作用是绝缘和散热。

1-4 变压器有哪些额定值？二次侧额定电压的意义是什么？

变压器的额定值包括额定频率、额定容量、一次额定电压、二次额定电压、一次额定电

流、二次额定电流。二次额定电压是指当变压器一次侧外施额定一次电压时二次侧的空载电压。

1-5 变压器是依据什么原理工作的？能否用来改变直流电压？

变压器依据电磁感应原理工作。因为直流电压不能产生交变电流，也就不能产生交变磁通，不会在二次绕组产生感应电动势，故变压器无法改变直流电压。

习题解答

1-1 一台单相变压器， $S_N = 50\text{kVA}$ ， $U_{1N}/U_{2N} = 10\text{kV}/0.23\text{kV}$ 。试求一、二次绕组的额定电流。

解 一次绕组额定电流

$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}} = \frac{50}{10} = 5\text{A}$$

二次绕组额定电流

$$I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}} = \frac{50}{0.23} = 217.4\text{A}$$

1-2 一台三相变压器， $S_N = 1000\text{kVA}$ ， $U_{1N}/U_{2N} = 35\text{kV}/6.3\text{kV}$ ，一、二次绕组分别为Y、 Δ 形联结。试求一、二次绕组的额定电压和额定电流及额定运行情况下的一、二次绕组的相电压和相电流。

解 一次绕组额定电压为 $U_{1N} = 35\text{kV}$ ，额定电流为

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{1000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 35 \times 10^3} = 16.5\text{A}$$

二次绕组额定电压为 $U_{2N} = 6.3\text{kV}$ ，额定电流为

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{1000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 6.3 \times 10^3} = 91.6\text{A}$$

额定运行时一次绕组相电压为（Y接）

$$U_{1N \cdot \text{ph}} = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}} = \frac{35}{\sqrt{3}} = 20.21\text{kV}$$

一次绕组相电流为

$$I_{1N \cdot \text{ph}} = I_{1N} = 16.5\text{A}$$

二次绕组为 Δ 接，相电流为

$$I_{2N \cdot \text{ph}} = \frac{I_{2N}}{\sqrt{3}} = \frac{91.6}{\sqrt{3}} = 52.89\text{A}$$

二次绕组空载时相电压为

$$U_{2N \cdot \text{ph}} = U_{2N} = 6.3\text{kV}$$

第二章 变压器运行原理

知识提要

1. 变压器的 T 形等效电路是对变压器较为准确的电路等效。但有时采用悬臂形等效电路或简化等效电路可以更快地得到结果。

T 形等效电路的参数可以根据空载试验、短路试验数据求取。

2. 物理量的标么值等于有名值与基准值的比值。标么值是一个相对值。

3. 变压器正常运行（无论空载，还是负载）时，可认为一次绕组电压与一次绕组感应电动势基本相等，即有

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f_1 N_1 \Phi_m$$

分析问题时，常常可认为电源电压大小 U_1 近似地与主磁通大小 Φ_m 成正比。

4. 较小的电压降落、较低的有功功率损耗是对电能传输过程的必然要求。对变压器而言，衡量这两方面性能的指标分别是电压变化率和效率，它们的近似估算公式分别为

$$\Delta U(\%) = (r_k^* \cos\varphi_2 + x_k^* \sin\varphi_2) \times 100\%$$

$$\eta = \left(1 - \frac{p_0 + \beta^2 p_{kN}}{\beta S_N \cos\varphi + p_0 + \beta^2 p_{kN}}\right) \times 100\%$$

变压器获得最大效率的条件是可变损耗 $\beta^2 p_{kN}$ 与不变损耗 p_{Fe} ($=p_0$) 相等，此时负载系数为

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

学习指导

本章学习重点：一是变压器 T 形等效电路及其参数的试验测定；二是标么值的基本概念及应用。

1. 标么制中三相电路与单相电路基准值关系

电气工程学科常用标么值表示各种物理量。恰当地选择基准值，可使各种关系式有更简洁的表达形式，简化计算。读者可在包括电机学在内的多门课程中逐渐体会标么值的优点。初学标么值应注意以下 3 点：

(1) 电压 U 、电流 I 、容量（或功率） S 、阻抗 Z 这四类物理量受到物理规律约束，所以选取基准值时只能独立选择其中两类，另外两类应根据物理规律约束确定。如对单相电路，应按如下关系确定基准值

$$S_B = U_B I_B, \quad Z_B = \frac{U_B}{I_B}$$

(2) 三相电路中，线电压有线电压的基准值 U_B ，相电压有相电压的基准值 $U_{B,ph}$ ；线电流、相电流亦如此。相电压、相电流基准值也就是单相电路的电压、电流基准值。三相电路

与单相电路的物理量基准值应满足物理规律约束，即对 Y 接三相电路，有

$$U_B = \sqrt{3}U_{B,ph}, \quad I_B = I_{B,ph}$$

对 D 接三相电路，有

$$U_B = U_{B,ph}, \quad I_B = \sqrt{3}I_{B,ph}$$

无论 Y 接，还是 D 接，功率基准值为

$$S_B = \sqrt{3}U_B I_B = 3U_{B,ph} I_{B,ph}$$

(3) 三相电路、单相电路的阻抗基准值是相同的，定义为 $Z_B = \frac{U_{B,ph}}{I_{B,ph}}$ ，注意一定是相电压基准值与相电流基准值之比。

2. 主磁通与漏磁通

(1) 主磁通。主磁通是指变压器中同时交链一次绕组和二次绕组的磁通，它是由一次侧磁动势和二次侧磁动势共同建立的，“双边共同激励”是其特点。主磁通经过的主磁路完全由铁磁材料构成，磁导很大，且绕组匝数较多，所以只需很小的励磁电流即可产生很大的磁通，因此，尽管负载时一次绕组电流可能远大于空载电流，但只有很小一部分（其数值约等于空载电流）用于建立主磁通。

因正常运行情况下绕组电阻及漏抗上的压降很小，所以，可认为变压器一次绕组电压与一次绕组感应电动势相等，从而认为变压器主磁通与一次绕组电压成正比。

一次绕组电压保持不变，则主磁通基本不变。这说明，二次侧磁动势对一次侧磁动势有去磁（削弱）作用，从而维持主磁通不变。通过这一作用，实现一、二次侧之间的功率交换。

(2) 漏磁通。漏磁通是指只交链一次侧或二次侧的磁通，一次绕组漏磁通是一次绕组磁动势建立的，与二次绕组磁动势无关；二次绕组漏磁通由二次绕组磁动势建立，与一次绕组磁动势无关。

漏磁通经过的漏磁路以非铁磁性材料为主，磁导率为常数，所以漏磁路磁导也是常数，当电流增大、磁动势增加时，漏磁通增大，漏磁通与电流成正比。漏磁链与电流的比值为漏电感，它是一个常数。

从电路上看，漏电抗不变，电流增大，漏抗上的压降增大。因此，漏磁通只有产生压降的作用。

3. “近似”的观点

“近似”的观点在建立电机的电路模型、分析电机的运行状态等很多时候会用到。这是工程上为满足工程应用要求常用的分析处理问题的方法。如果尽可能地考虑所有影响因素，尽可能地采用最为准确的模型，常常会导致问题无法求解，或求解需要大量的计算资源。而采用“近似”的观点，忽略次要因素，可以突出问题的主要矛盾，很多时候会使问题更加清晰、明朗，易于分析。另一方面，在抓住问题的主要矛盾分析问题得到结论后，再计入之前所忽略因素的影响，对先前得到的结论进行修正，也是工程上分析、处理问题的常用手段之一。

本章用“近似”的观点处理了以下问题：

关于单相励磁电流波形的讨论是在主磁通为正弦波的前提下展开的。主磁通为正弦波，