

● 高等学校教学参考书

电机学

学习指导与习题解答

主 编 方瑞明

副主编 王建辉 马宏忠



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

● 高等学校教学参考书

电机学

学习指导与习题解答

Dianjixue Xuexi Zhidao yu Xiti Jieda

主 编 方瑞明

副主编 王建辉 马宏忠

主 审 胡虔生



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本书是马宏忠主编的《电机学》(高等教育出版社2009年出版)的配套学习指导书。全书包括绪论、变压器、交流电机的基本理论、异步电机、同步电机、直流电机、其他电机简介和MATLAB在电机分析计算中的应用八个部分。书中对教材各章的基本知识点及其内在联系进行了总结,对重点和难点内容进行了深入解析,对教材中大部分思考题、习题给出了详细解答,并补充了其他版本《电机学》中一些有代表性的习题。附录中还收录了5套电机学综合自测题及参考答案。本书的目的是帮助读者深入理解电机学基本概念、基本理论、基本分析方法,提高解题能力和应用电机理论解决实际问题的能力。全书讲述清晰,重点突出,深入浅出,富于启发,便于读者自学。

本书适合作为普通高等学校电气工程及其自动化专业以及其他相关专业的补充教材、教学参考书或自学辅导教材,也可供有关专业学生在复习和考研时使用。

图书在版编目(CIP)数据

电机学学习指导与习题解答/方瑞明主编. —北京:
高等教育出版社, 2010.7
ISBN 978-7-04-029499-6

I. ①电… II. ①方… 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(2010)第091424号

策划编辑 金春英 责任编辑 王莉莉 封面设计 于文燕
责任绘图 尹莉 版式设计 余杨 责任校对 姜国萍
责任印制 毛斯璐

出版发行 高等教育出版社
社址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京中科印刷有限公司

开 本 787×1092 1/16
印 张 11
字 数 270 000

购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landracom.com>
<http://www.landracom.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2010年7月第1版
印 次 2010年7月第1次印刷
定 价 17.80元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究
物料号 29499-00

前 言

本书是为“电机学”课程编写的学习指导书。为了便于教学使用和读者阅读,各章的编写次序和所用名词、符号均与马宏忠、方瑞明、王建辉主编并由高等教育出版社出版的高等学校教材《电机学》保持一致。

全书共分8章,内容包括绪论、变压器、交流电机的基本理论、异步电机、同步电机、直流电机、其他电机简介和MATLAB在电机分析计算中的应用等。各章又分别包括基本知识点、重点和难点、典型题解与习题答案、补充习题与解答等四大部分。第一部分为基本知识点,主要对该章内容进行简明扼要的叙述和归纳;第二部分为重点和难点,是该章内容的复习重点和目标;第三部分为典型题解与习题答案,为各章内容的典型例题,并对马宏忠、方瑞明、王建辉主编的《电机学》中的大部分思考题和习题进行了解答;第四部分为补充习题与解答,收录了一些其他版本《电机学》中具有代表性的习题,并进行了解答。附录中还收录了5套综合自测题及其参考答案,供读者进行自测模拟考试使用。

本书内容丰富,有助于学习和掌握“电机学”课程的基本概念、基本理论和基本分析方法,并有助于拓宽思路,加深理解。适合作为普通高等学校电气工程及其自动化专业以及其他相关专业的补充教材、教学参考书或自学辅导教材,也可供教学人员、自学人员和有关工程技术人员使用。

本书由河海大学马宏忠教授编写第一、二、四、八章,上海交通大学王建辉副教授编写第五章5.3节、5.4节,华侨大学方瑞明教授编写第三、六、七章、第五章5.1节、5.2节及附录部分,南京理工大学张俊芳副教授也参加了本书的部分编写工作。全书由方瑞明教授任主编并统稿。

在本书的编写过程中,华侨大学研究生肖雅丽、史金瑶与河海大学研究生钱雅云等为书稿的资料整理、修改和校对做了大量工作。东南大学胡虔生教授审阅了全书,并提出了许多建设性的宝贵意见。在此一并向他们表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免有缺点和错误,敬请广大读者批评指正,并提出宝贵意见。

编者

2009年10月

目 录

第一章 绪论	1	5.2 重点和难点	86
1.1 基本知识点	1	5.3 典型题解与习题答案	89
1.2 重点和难点	2	5.4 补充习题与解答	105
1.3 典型题解与习题答案	3	第六章 直流电机	108
1.4 补充习题与解答	6	6.1 基本知识点	108
第二章 变压器	8	6.2 重点和难点	111
2.1 基本知识点	8	6.3 典型题解与习题答案	114
2.2 重点和难点	14	6.4 补充习题与解答	124
2.3 典型题解与习题答案	16	第七章 其他电机简介	128
2.4 补充习题与解答	32	7.1 基本知识点	128
第三章 交流电机的基本理论	37	7.2 重点和难点	131
3.1 基本知识点	37	7.3 典型题解与习题答案	132
3.2 重点和难点	41	7.4 补充习题与解答	134
3.3 典型题解与习题答案	42	第八章 MATLAB 在电机分析计算中	
3.4 补充习题与解答	54	的应用	136
第四章 异步电机	58	8.1 基本知识点	136
4.1 基本知识点	58	8.2 重点和难点	137
4.2 重点和难点	62	8.3 典型题解与习题答案	138
4.3 典型题解与习题答案	63	8.4 补充习题与解答	138
4.4 补充习题与解答	75	附录 A 电机学综合自测题	139
第五章 同步电机	79	附录 B 电机学综合自测题参考答案	156
5.1 基本知识点	79	参考文献	170

第一章

绪 论

1.1 基本知识点

本章的学习重点是掌握与电机学相关的磁的知识,包括过去已学知识的总结、与电机相关的磁的知识的拓展与补充,注意电路与磁路参量的类比。其次是了解电机的应用、分类、发展等知识。

1. 电机的分类

电机的种类很多,分类方法也很多,从不同角度可以将电机划分为不同类型:(1)从能量角度可分为发电机、电动机、变压器。(2)从原理角度可分为变压器、直流电机、交流电机(异步电机、同步电机)。(3)从运行情况可分为旋转电机、直线电机、静止电机(变压器)。

2. 电机中的三大物理量

电机中主要涉及电、磁、机三大物理量。

3. 描述磁场的基本物理量

磁感应强度(B)、磁场强度(H)、磁导率(μ)、磁通(Φ)、磁阻(R_m)、磁压(U_m)、磁动势(F)、磁导(Λ_m)等。

4. 磁化曲线

$B-H$ 的非线性关系、剩磁、矫顽力、硬磁材料、软磁材料。

5. 磁路基础定律

安培环路定律: $\oint H \cdot dl = \sum \sum i$ (第一个 \sum 对应线圈数,第二个 \sum 对应一个线圈内匝数)

电磁感应定律(变压器电动势、速度电动势): $e = -\frac{d\Psi}{dt}$, $e = Blv$

磁路欧姆定律: $\Phi = \frac{F}{R_m}$

磁路的基尔霍夫第一定律: $\sum \Phi = 0$

磁路的基尔霍夫第二定律: $\oint H \cdot dl = \sum Ni$

6. 电磁力、电磁转矩

电磁力 F_e , 它的表达式为 $F_e = F = Bli$ 。

电磁转矩 $T, T = Fr$ 。

7. 铁心损耗与磁场能量

导磁材料位于交变磁场中被反复磁化,其 $B-H$ 关系便是磁滞回线。此时导磁材料中将引起能量损耗,称为铁心损耗。铁心损耗分为两部分:磁滞损耗和涡流损耗。要注意在恒定磁场中的静止导体内是不会引起能量损耗的。

8. 电感

自感、互感的定义及其与线圈匝数、磁路磁阻的关系。

9. 电机的可逆性

电机具有可逆性,因此,发电机和电动机是一种电机的两种不同运行方式。

10. 磁路基本计算

磁路中,气隙虽小,但所需的磁动势却很大。甚至可忽略铁心的磁压降。

11. 电路与磁路参量的类比

磁路与电路的比较如下表所示。

磁路	电路
磁通 Φ	电流 i
磁动势 F	电动势 e
磁阻 R_m	电阻 R
磁压降 HI	电压降 u
磁导 Λ_m	电导 G
欧姆定律 $\Phi = F/R_m$	欧姆定律 $i = u/R$
基尔霍夫第一定律 $\sum \Phi = 0$	基尔霍夫第一定律 $\sum i = 0$
基尔霍夫第二定律 $\sum F = \sum HI = \sum \Phi R_m$	基尔霍夫第二定律 $\sum e = \sum u = \sum iR$

12. 电机制造材料

电机所用的材料,一般包括四种:导电材料、导磁材料、绝缘材料、机械支撑材料。

1.2 重点和难点

1. 描述磁场的基本物理量
2. 磁路基本定律
3. 磁路基本计算
4. 电感与磁路参数的关系

1.3 典型题解与习题答案

1.3.1 典型题解

1-1 电机和变压器的磁路常用什么材料制成, 具有哪些主要特性?

答: 电机和变压器的铁心常采用硅钢片制成, 磁路的其他部分常用导磁性能较好的钢板和铸钢制成。这些材料的主要特性是导磁性能好, 磁滞回线面积小, 磁滞损耗小。对于硅钢片, 由于在钢中加入了硅元素, 增加了电阻, 减少了涡流损耗, 所以硅钢片的电阻系数较一般钢高。

1-2 公式 $e = -\frac{d\Psi}{dt}$, $e = -N \frac{d\Phi}{dt}$, $e = -L \frac{di}{dt}$ 都是电磁感应定律的不同写法, 它们之间有什么差别? 哪一种写法最有普遍性? 从一种写法改为另一种写法需要什么附加条件?

答: $e = -\frac{d\Psi}{dt}$ 是电磁感应定律的普遍表达式, 另两种写法都需有一定的附加条件。当所有磁通交链全部匝数时, 便可简化为 $e = -N \frac{d\Phi}{dt}$ 。当为线性电感时 (即非铁磁材料线圈时), 电磁感应定律可进一步简化为 $e = -L \frac{di}{dt}$ 。

1-3 一台电机在同一时间决不能既是发电机又是电动机, 为什么说发电机作用和电动机作用同时存在于一台电机中?

答: 任一台电机无论是发电机或是电动机, 在正常运行时, 其导体与磁场间总是存在相对运动, 这时导体中将产生感应电动势, 这就是发电机作用。同时电机导体中总是有电流流过, 该载流导体与磁场作用便产生电磁力或电磁转矩, 这就是电动机作用。只要电机运行, 这两种作用总是同时存在, 而与电机的运行状态无关。

1-4 试比较磁路和电路的相似点和不同点。

答: 参照主教材^[1]中表 1-3-2 可说明磁路和电路的相似性。

磁路与电路的相似之处只是形式上的, 与电路比较, 磁路有以下特点:

(1) 电流表示带电质点运动, 它通过电阻时的功率损耗为 $I^2 R$; 磁通不代表质点运动, 也不代表功率损耗。

(2) 自然界存在着良好的对电流绝缘的材料, 但尚未发现对磁通绝缘的材料。磁路中没有断路情况, 即不存在有磁动势无磁通的现象。

(3) 空气也是导磁的, 磁路中存在着漏磁现象。

(4) 含有铁磁材料的磁路几乎都是非线性的。一般地讲, 磁路问题是非线性的问题, 磁阻的概念和磁路欧姆定律只有在磁路中各段的材料都是线性的或可以作为线性处理的情况下才能适用。在精确的磁路计算中不用磁阻概念和磁路欧姆定律, 而是直接用全电流定律和各段材料的 $B-H$ 曲线。

1-5 有一闭合铁心磁路, 铁心的截面积 $A = 9 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, 磁路的平均长度 $l = 0.3 \text{ m}$, 铁心的磁导率 $\mu_{\text{Fe}} = 5000\mu_0$, 套在铁心上的励磁绕组为 500 匝。试求在铁心中产生 1T 的磁通密度时, 所需的励磁磁动势和励磁电流。

解 用安培环路定律来求解。

$$\text{磁场强度} \quad H = \frac{B}{\mu_{\text{Fe}}} = \frac{1}{5000 \times 4\pi \times 10^{-7}} \text{ A/m} = 159 \text{ A/m}$$

$$\text{磁动势} \quad F = Hl = 159 \times 0.3 \text{ A} = 47.7 \text{ A}$$

$$\text{励磁电流} \quad I = \frac{F}{N} = \frac{47.7}{500} \text{ A} = 0.0954 \text{ A}$$

1-6 若在题 1-5 的磁路中,开一个长度 $\delta = 5 \times 10^{-4} \text{ m}$ 的气隙,问铁心中激励 1T 的磁通密度时,所需的励磁磁动势和励磁电流各为多少? 已知铁心截面积 $A_{\text{Fe}} = 3 \times 3 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, $\mu_{\text{Fe}} = 5000\mu_0$ 。考虑到气隙磁场的边缘效应,在计算气隙的有效面积时,通常在长、宽方向各增加 δ 值。

解 用磁路的基尔霍夫第二定律来求解。

铁心内的磁场强度

$$H_{\text{Fe}} = \frac{B_{\text{Fe}}}{\mu_{\text{Fe}}} = \frac{1}{5000 \times 4\pi \times 10^{-7}} \text{ A/m} = 159 \text{ A/m}$$

气隙磁场强度

$$H_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} = \frac{\Phi_{\delta}}{A_{\delta}\mu_0} \approx \frac{\Phi_{\text{Fe}}}{A_{\delta}\mu_0} = \frac{B_{\text{Fe}}A_{\text{Fe}}}{A_{\delta}\mu_0}$$

$$= \frac{1 \times (3 \times 3 \times 10^{-4})}{(3.05 \times 10^{-2})^2 \times 4\pi \times 10^{-7}} \text{ A/m} = 77 \times 10^4 \text{ A/m}$$

$$H_{\text{Fe}}l_{\text{Fe}} = 159 \times 0.2995 \text{ A} = 47.6 \text{ A}$$

$$H_{\delta}l_{\delta} = 77 \times 10^4 \times 5 \times 10^{-4} \text{ A} = 385 \text{ A}$$

$$F = H_{\text{Fe}}l_{\text{Fe}} + H_{\delta}l_{\delta} = 432.6 \text{ A}$$

$$I = \frac{F}{N} = \frac{432.6}{500} \text{ A} = 0.865 \text{ A}$$

由此可见,气隙虽然很短,仅 $5 \times 10^{-4} \text{ m}$,但其磁位降却占整个磁路的 89%。

1.3.2 教材习题提示与参考答案

1-1 一铁环的平均半径为 40 cm,铁环的横截面积为一直径等于 5 cm 的圆形,在铁环上绕有线圈,当线圈中的电流为 5 A 时,在铁心中产生的磁通为 0.004 Wb,试求线圈应有的匝数。铁环所用的材料为铸钢,其磁化曲线数据见主教材表 1-3-1。

解 铁环的横截面积

$$A = \frac{1}{4}\pi d^2 = \frac{1}{4} \times 3.14 \times 5^2 \text{ cm}^2 = 1.96 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

铁心中的平均磁通密度

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{0.004}{1.96 \times 10^{-3}} \text{ T} = 2.04 \text{ T}$$

由主教材表 1-3-1 作出磁化曲线(延长),从图中可看出磁场强度

$$H = 360 \text{ A/cm}$$

磁路平均长度

$$l = 2\pi R = 2 \times 3.14 \times 0.4 \text{ m} = 2.51 \text{ m}$$

线圈匝数

$$N = \frac{Hl}{I} = \frac{36000 \times 2.51}{5} \text{匝} = 18072 \text{匝}$$

1-2 在图 1-1 所示的磁路中,线圈 N_1 和 N_2 中通入直流电流 I_1 、 I_2 。试问:

- (1) 电流方向如图中所示时,该磁路上的总磁动势为多少?
- (2) N_2 中电流 I_2 反向,总磁动势又为多少?
- (3) 若在图中 a、b 处切开,形成一空气隙 δ ,总磁动势又为多少?
- (4) 比较 (1)、(3) 两种情况下铁心中 B 、 H 的相对大小,及 (3) 中铁心和气隙中 H 的相对大小。

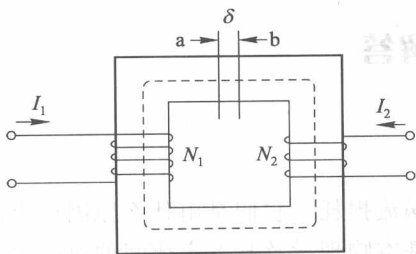


图 1-1 习题 1-2 图

解 (1) 由右手螺旋定则可判断,电流 I_1 产生的磁场为顺时针方向, I_2 产生的磁场为逆时针方向,则总的磁动势

$$F = F_1 - F_2 = N_1 I_1 - N_2 I_2 \quad (F \text{ 值若为正,则其磁场为顺时针方向,反之,则为逆时针方向})$$

(2) 若 N_2 中电流 I_2 反向,同(1),由右手螺旋定则可知,这时 I_1 、 I_2 产生的磁场方向均为顺时针方向,则总的磁动势

$$F = F_1 + F_2 = N_1 I_1 + N_2 I_2 \quad (F \text{ 的磁场为顺时针方向})$$

(3) 若在 a、b 处切开,形成一空气隙 δ ,总磁动势不变,同(1)

$$F = F_1 - F_2 = N_1 I_1 - N_2 I_2$$

(4) 由于 $F_{(1)} = F_{(3)}$, 而 $R_{m(1)} \ll R_{m(3)}$, 所以 $\Phi_{(1)} \gg \Phi_{(3)}$, $B_{(1)} \gg B_{(3)}$, $H_{(1)} \gg H_{(3)}$ 。

在(3)中, $B_{Fe} = B_{\delta}$, 由于 $\mu_{Fe} \gg \mu_0$, 所以

$$H_{Fe} = B_{Fe} / \mu_{Fe} \ll H_{\delta} = B_{\delta} / \mu_0$$

1-3 两根输电线在空间相距 2 m, 当两输电线通入电流均为 100 A 时, 求每根输电线单位长度上所受的电磁力, 并画出两线中电流同向及反向时两种情况下的受力方向。

解 由 $\oint H dl = H \cdot 2\pi R = I$, $B = \mu_0 H$ 得, 每根输电线单位长度上所受的电磁力

$$F = BI = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} I = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 100^2 \times 1}{2\pi \times 2} \text{ N} \cdot \text{m} = 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}$$

当电流同向时, 电磁力为吸力; 当电流反向时, 电磁力为斥力, 如图 1-2 所示。

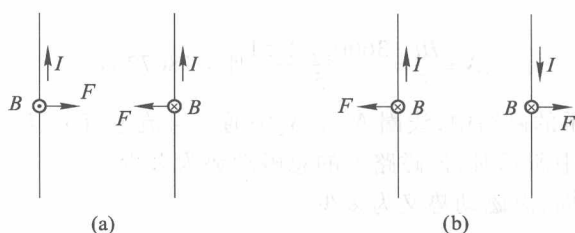


图 1-2 习题 1-3 图

1.4 补充习题与解答

1.4.1 补充习题

1-1 什么是磁滞损耗和涡流损耗？它们是由什么原因产生的？其大小与哪些因素有关？

1-2 试总结出电与磁的基本物理量及基本定律间的对应关系。

1-3 图 1-3(a) 为硅钢片叠成的磁路 (尺寸的单位: mm), 图 1-3(b) 所示为硅钢片的磁化曲线, 励磁线圈有 1000 匝。求当铁心中磁通为 1×10^{-3} Wb 时, 励磁线圈中的电流为多少?

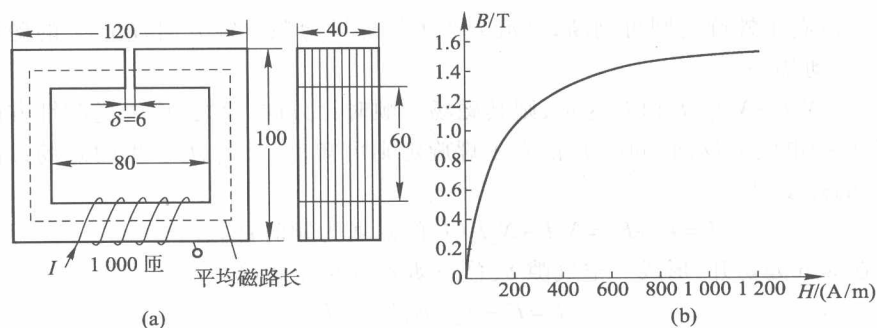


图 1-3 补充习题 1-3 图

1.4.2 补充习题解答

1-1 答: 铁磁材料在交变磁场的作用下反复磁化过程中, 磁畴之间不停地互相摩擦消耗能量, 因而引起损耗, 这种损耗称为磁滞损耗。磁滞损耗与磁通的交变频率成正比, 与磁通密度幅值的 α 次方成正比, 即磁滞损耗 $p \propto f \cdot B_m^\alpha$ 。在 $B_m = 1.0 \sim 1.9$ T 时, $\alpha \approx 2$ 。当交变磁通穿过铁心或导体时, 将在其中产生感应电动势和电流, 这些电流围绕磁通呈漩涡状流动, 称为涡流。涡流引起的损耗称为涡流损耗。涡流损耗与磁通交变频率的平方成正比, 与磁通幅值的平方成正比, 与涡流回路的等效电阻成反比。对于硅钢片铁心, 涡流损耗还与硅钢片的厚度的平方成正比, 即

涡流损耗 $p \propto \frac{j^2 B_m^2 d^2}{r_w}$ (式中, d 为硅钢片的厚度, r_w 为涡流回路等效电阻)。

1-2 答:参照主教材表 1-3-2。

1-3 解:(1) 铁心部分

设铁心的叠片因数(叠片净厚度与总厚度之比)为 0.94,则铁心的净面积

$$A_{Fe} = 20 \times 10^{-3} \times 40 \times 10^{-3} \times 0.94 \text{ m}^2 = 0.752 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

铁心磁路的平均长度

$$l_{Fe} = [2 \times (100 + 80) - 6] \text{ mm} = 354 \text{ mm} = 0.354 \text{ m}$$

铁心中的平均磁通密度

$$B_{Fe} = \frac{\Phi}{A_{Fe}} = 1.33 \text{ T}$$

由磁化曲线查得相应的铁心磁场强度 $H_{Fe} = 560 \text{ A/m}$ 。

铁心段磁路所需的磁动势

$$F_{Fe} = H_{Fe} l_{Fe} = 198 \text{ A}$$

(2) 气隙部分

不计气隙处磁通的扩散现象,则气隙磁通与铁心中的磁通相同。

因为气隙部分的面积

$$A_{\delta} = 20 \times 10^{-3} \times 40 \times 10^{-3} \text{ m}^2 = 0.8 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

所以气隙部分的感应强度、磁场强度和气隙部分所需的磁动势分别为

$$B_{\delta} = \frac{\Phi}{A_{\delta}} = 1.25 \text{ T}$$

$$H_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} = 0.994 \times 10^6 \text{ A/m}$$

$$F_{\delta} = H_{\delta} l_{\delta} = 5964 \text{ A}$$

(3) 总体

所需的总磁动势

$$F = F_{Fe} + F_{\delta} = 6162 \text{ A}$$

线圈所需的励磁电流

$$I = F/N = 6.162 \text{ A}$$

所以,气隙虽小,但所需的磁动势很大,甚至可忽略铁心的磁压降。

第二章

变 压 器

2.1 基本知识点

1. 变压器的工作原理与结构

(1) 变压器的工作原理

在一次绕组上外施交流电压,便有交流电流流入,在铁心中产生交变磁通。该磁通交链二次绕组并在其中感应出电动势,当二次绕组接负载时,便有电能输出,从而实现能量的传递。

(2) 结构

变压器的基本结构可以分为三部分:铁心、绕组、油箱及其附件。

2. 变压器的额定值

变压器的额定值主要有额定电压(U_{1N} 、 U_{2N})、额定电流(I_{1N} 、 I_{2N})、额定容量(S_N)、额定频率(f_N)等。

$$\text{单相变压器: } I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}}, I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}}$$

$$\text{三相变压器: } I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{1N}}, I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{2N}}$$

注1:工程上往往容量单位用 $\text{kV} \cdot \text{A}$,电压单位用 V ,或容量单位用 $\text{MV} \cdot \text{A}$,电压单位用 kV ,则上述关系式后分别乘 10^3 。

注2:对于三相变压器而言,额定电压、额定电流均为线电压、线电流。

3. 变压器空载运行

(1) 基本电磁关系

一次侧中的电流全部用于励磁(产生磁场)。

基本电磁关系为

$$u_1 \rightarrow i_0 \left\{ \begin{array}{l} \rightarrow F_0 = N_1 i_0 \left\{ \begin{array}{l} \rightarrow \Phi \rightarrow \begin{cases} e_1 \\ e_2 \rightarrow u_2 \end{cases} \\ \rightarrow \Phi_{1\sigma} \rightarrow e_{1\sigma} \end{array} \right. \\ \rightarrow i_0 R_1 \end{array} \right.$$

(2) 一次、二次绕组中的感应电动势

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = 4.44fN_1\Phi_m \quad E_2 = \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = 4.44fN_2\Phi_m$$

(3) 变比

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$$

(4) 基本方程

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1$$

$$\dot{U}_{20} = \dot{E}_2$$

$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_m Z_m = \dot{I}_0 Z_m$$

(5) 等效电路与相量图

变压器空载运行的等效电路与相量图见图 2-1。

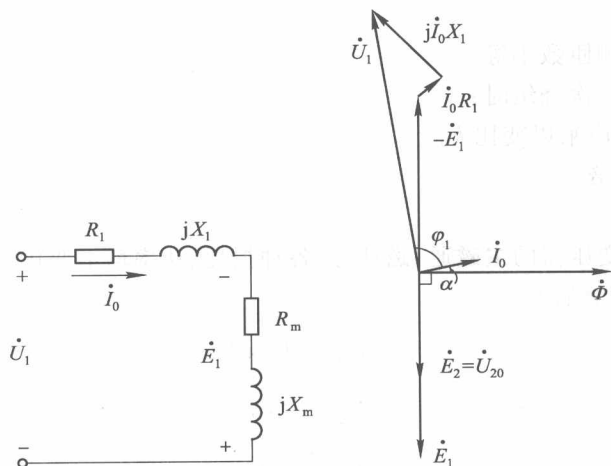


图 2-1 变压器空载运行的等效电路与相量图

注:基本方程式、等效电路和相量图是分析变压器内部电磁关系的三种方法,三者是一致的。在实际使用中,通常定性分析采用相量图,定量计算采用等效电路。

(6) 空载电流 i_0 与磁通 ϕ 的关系

由于变压器磁路的非线性,当磁通 ϕ 为正弦波时,空载电流 i_0 为尖顶波;当磁通 ϕ 为平顶波时,空载电流 i_0 为正弦波。

(7) 励磁电流的组成

励磁电流 \dot{I}_m 可以分解为无功性质的磁化电流 \dot{I}_μ 和有功性质的铁损耗电流 \dot{I}_{Fe} , 即有公式 $\dot{I}_m = \dot{I}_\mu + \dot{I}_{Fe}$ 成立。

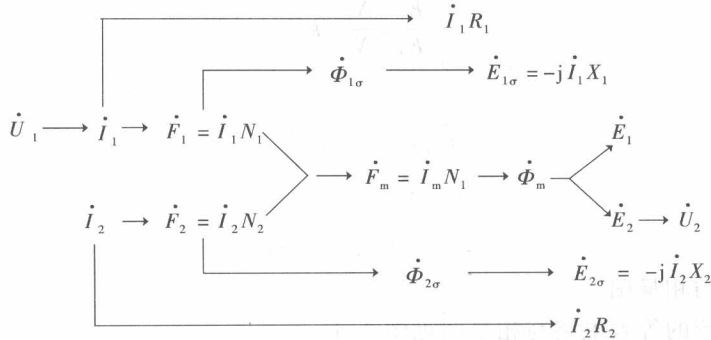
空载电流很小,空载损耗主要是铁损耗。铁损耗由磁滞损耗和涡流损耗两部分组成。

4. 变压器负载运行(归算后)

(1) 双边励磁

变压器空载时主磁场由一次电流产生(单边励磁),负载运行时由一次、二次电流共同激励产生(双边励磁),但总磁场应基本不变。

(2) 电磁关系



(3) 归算问题

原因:一次、二次侧匝数不等。

二次绕组归算到一次绕组时:

- 电动势和电压应乘以变比 k 。
- 电流乘以 $1/k$ 倍。
- 阻抗乘以 k^2 。

注意:归算前后,变压器的磁通、磁动势、各种损耗、功率均不变化。

(4) 基本方程(归算后)

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

$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2$$

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_0$$

$$\dot{E}_1 = \dot{E}'_2 = -\dot{I}_m Z_m$$

(5) 等效电路(T形)(见图 2-2)

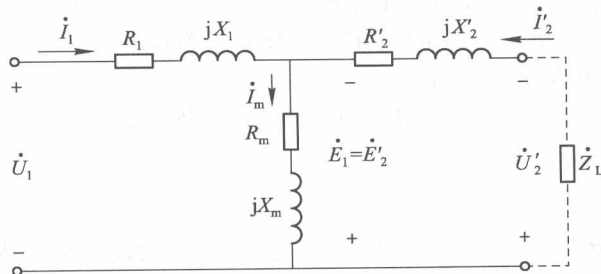


图 2-2 变压器负载运行 T 形等效电路

(6) 相量图(见图 2-3)

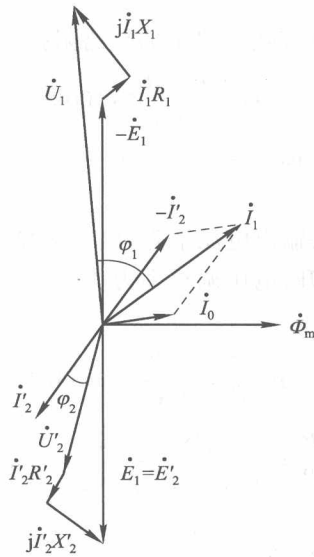


图 2-3 变压器负载运行相量图

5. 标么值

标么值 = 某物理量的实际值 / 该物理量的基值。标么值是一个相对值，没有单位。使用标么值可简化计算。

6. 变压器参数测定

(1) 空载试验

目的：测定变压器的励磁电阻 R_m 、励磁电抗 X_m 。

测试方法：若在低压侧进行，将高压侧开路，调整外施电压等于额定电压，记录下此时每相的电流 I_0 和空载损耗 p_0 ，则有

$$Z_0 = U_0 / I_0$$

$$R_0 = p_0 / I_0^2 \approx R_m$$

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} \approx X_m$$

(2) 短路试验

目的：测定变压器的短路电阻 R_k 和短路电抗 X_k 。

测试方法：在高压侧进行，使低压侧短路，将高压侧电压从 0 开始增加，直至高压侧电流为额定电流。此时一次电压远小于额定电压，记录下每相的短路电压 U_k 和短路电流 I_k 以及短路损耗 p_k ，则有

$$Z_k = U_k / I_k$$

$$R_k = p_k / I_k^2$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}$$

由于电阻阻值随温度变化，所以室温下测得的值往往要归算到 75 °C 时的值。

7. 电压调整率 ΔU

原因:变压器绕组有阻抗存在(等效电路中的短路阻抗)。

$$\text{定义式} \quad \Delta U = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \times 100\%$$

从相量图得表达式 $\Delta U = (u_{kr} \cos \varphi_2 + u_{kx} \sin \varphi_2) \times 100\%$, 其中电感性负载 φ_2 取正, 电容性 φ_2 取负。

注意:接一般负载时电流增大,输出电压下降,电压调整率为正;但如果变压器带容性负载,有可能电流增大,输出电压反而上升,电压调整率为负。

8. 变压器的效率 η

$$\text{从定义得到表达式} \quad \eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum P} \times 100\%$$

$$\text{参数表达式} \quad \eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\beta S_N \cos \varphi_2}{\beta S_N \cos \varphi_2 + \beta^2 p_{kN} + p_0} \times 100\%$$

当效率达到最大时,有负载系数 $\beta_m = \sqrt{\frac{p_0}{p_{kN}}}$ 。

9. 变压器的损耗与效率

变压器运行时将产生损耗,变压器的损耗分为铜损耗 p_{Cu} 和铁损耗 p_{Fe} 两类。

变压器的空载损耗近似等于铁损耗(因为空载电流很小,空载时的铜损耗可忽略不计)。

变压器的短路损耗近似等于铜损耗(因为短路电压很小,短路时磁场很弱,铁损耗很小,可忽略)。

10. 三相变压器

(1) 三相心式变压器与三相组式变压器

三相心式变压器:各相磁路彼此相关,各次谐波磁通均能流通。

三相组式变压器:各相磁路彼此独立,对基波,各相铁心柱互成回路,但对 $3k$ 次谐波磁通,不能流通。

(2) 联结组与时钟表示法

联结组:Y 和 Δ 两大类。

时钟表示法:一次线电动势看作时钟的长针(分针),二次线电动势看作时钟的短针(时针)。

我国国家标准规定五种标准联结组:①Yyn0;②Yd11;③YNd11;④YNy0;⑤Yy0,其中最常用的为前三种。

11. 三相变压器绕组连接及磁路系统对电动势波形的影响

(1) 一次侧 YN 联结,没问题(三次谐波电流可以流通,励磁电流为尖顶波,磁通为正弦波,电动势为正弦波)。

(2) 三相组式变压器不能接成 Yy 运行。

(3) 三相心式变压器可以接成 Yy,但其容量限制在 $1800 \text{ kV} \cdot \text{A}$ 以下。

(4) 大容量变压器尽量接成 Yd 联结或 Dy 联结。

12. 变压器并联运行

(1) 并联运行条件与如何满足并联运行的条件