



高等院校电气工程及其自动化专业系列精品教材

电机学习题精解

(第三版)

孙旭东 杨乐梅 编著



科学出版社

高等院校电气工程及其自动化专业系列精品教材

电机学习题精解

(第三版)

孙旭东 杨乐梅 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是李发海、朱东起教授编著的《电机学》(第五版)的配套教学用书,是结合编者多年的教学实践编写而成的.书中对《电机学》中的所有思考题和习题都做了详细解答,并通过典型例题对解题思路与技巧进行了指导或提示,还对各章的主要知识点进行了归纳.这些内容对于读者深入理解和熟练掌握电机学的基本概念和基本分析方法,提高分析与解决电机实际问题的能力,都是有帮助的.

本书可作为高等学校电气工程及其自动化专业,以及其他强电类专业的补充教材或教学参考书,也可供报考电工类研究生的人员参考.

图书在版编目(CIP)数据

电机学习题精解/孙旭东,杨乐梅编著.—3版.—北京:科学出版社,2014.6

(高等院校电气工程及其自动化专业系列精品教材)

ISBN 978-7-03-040962-1

I. ①电… II. ①孙… ②杨… III. ①电机学-高等学校-题解
IV. ①TM3-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 121925 号

责任编辑:余 江 / 责任校对:彭 涛
责任印制:阎 磊 / 封面设计:迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

铭浩彩色印装有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001 年 6 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2007 年 6 月第 二 版 印张:20

2014 年 6 月第 三 版 字数:512 000

2014 年 6 月第十三次印刷

定价:42.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



第三版前言

本书是李发海、朱东起教授编著的《电机学》(第五版)(科学出版社,2013)的配套教学用书(本书中简称其为教材)。为了便于教学和读者阅读,各章次序和所用的名词、符号均与《电机学》(第五版)保持一致,非重点内容也用“*”表示。

根据《电机学》(第五版)的修订情况,本书在《电机学习题与题解》(第二版)的基础上,对内容做了相应的修改,包括若干思考题、习题的调整和解答内容的修改,力求使思考题与习题编排更为合理,解答更加确切、清晰。书中仍然对所有思考题和习题都做了解答。此外,为了便于读者自主学习,提高解题能力,增加了以下内容:①在绪论和各章中新增了“学习目标”和“基本知识点”两节内容,对绪论和各章的学习要求做了说明,对主要知识点进行了归纳;②在第一至二十三章中分别新增了“典型例题解析”一节,精选了一些与习题不重复的典型题目,并对其解题思路、方法与技巧以及所涉及的重要知识点给出了较详细的指导或提示。鉴于上述调整,本版书名改为《电机学习题精解》。

在第一版的前言中,我们已对编写本书的指导思想做了说明,并对如何使用本书给出了一些建议。这些内容至今仍然适用,在此不再赘述。希望读者在使用本书时,注重对电机学基本概念、基本理论与基本分析方法的理解和掌握,通过积极的思考、认真的练习与总结,来深化对电机学主要知识点及其内在联系的理解,进而提高学习能力和分析解决问题的能力。

本书由孙旭东、杨乐梅编著。杨乐梅撰写了各章的“学习目标”、“基本知识点”和“典型例题解析”部分;孙旭东撰写修订了各章的“思考题及其解答”和“习题及其解”部分,并负责全书内容的修改、补充和定稿工作。

本书第一版中第一、二、五篇原稿由冯大钧撰写,对本书有重要贡献。责任编辑余江对本书的体例和内容安排提出了宝贵建议。本书承蒙李发海教授、朱东起教授审阅。在此,特向他们表示衷心的感谢。

虽然经过了再版修订,但由于编者学识水平有限,书中仍难免有不妥之处,恳请广大读者批评指正和提出宝贵意见。

编著者

2014年4月

第一版前言

本书是根据李发海、朱东起编著的《电机学》(第三版)(科学出版社, 2001) 中的思考题和习题, 结合编者多年的教学实践编写而成的, 是《电机学》(第三版) 的配套教学用书。为了便于教学和读者阅读, 各章的编写次序和所用名词、符号均与《电机学》(第三版) 保持一致。

电机学这门课程, 由于概念多, 理论性强, 与工程实际结合密切, 因此相对而言是比较难教难学的。要学好这门课程, 除了认真学习, 勤思多问外, 还必须做一定数量的思考题和习题。本书收入精心选择的题目共 500 个, 其中思考题 232 个、习题 268 个。这些题目是清华大学电机教研组经过几代人的努力探索, 不断实践的结晶, 它反映了电机学教学的基本要求。本书注重对基本功的考察, 对理解和掌握电机的基本原理与电机学的基本概念、基本分析方法有很大帮助。

当今正处于信息时代, 读者要学的知识显著增多, 要求读者对这些题目都能独立地解答出来是不现实的。为了提高学习效率, 节约时间, 应广大读者的要求, 我们首次对这些思考题和习题做了全面的解答, 有的题目还给出了两种解法。当然, 这只是我们向读者推荐的解题思路和方法。如果读者在这些解答的帮助下, 能够学会运用电机学的基本理论和基本分析方法解决实际电机问题, 或者因受到启发而钻研、探索出更简明、快捷的解题思路和方法, 那么就实现了我们编写本书的最大愿望。

读者在使用本书时, 先不要急于去看解答, 最好是在对题目进行了独立思考与分析, 或者独立解题之后, 再与书中的解答相对照。这样, 将更有助于加深读者对电机学概念和理论的理解, 提高运用所学知识的能力, 使本书更好地发挥其作用。

本书由孙旭东、冯大钧编写。冯大钧编写第一、二、五篇, 孙旭东编写第三、四篇, 并负责全书名词术语、符号的统一和文稿的整理工作。全书由李发海教授和朱东起教授审阅。由于这是一件全新的工作, 加之时间仓促和编者水平有限, 书中难免还会存在一些错误和不妥之处, 希望读者批评指正。读者对本书还有什么意见、建议和要求, 欢迎告诉我们, 以便再版时修改, 使其更臻完善。

来函请寄: 北京清华大学电机工程与应用电子技术系, 邮政编码 100084。

编著者

目 录

第三版前言

第一版前言

绪论	1
0.1 学习目标	1
0.2 基本知识点	1

第一篇 变 压 器

第一章 变压器的用途、分类与结构	3
1.1 学习目标	3
1.2 基本知识点	3
1.3 典型例题解析	4
1.4 思考题及其解答	4
1.5 习题及其解	5
第二章 变压器的运行分析	6
2.1 学习目标	6
2.2 基本知识点	6
2.3 典型例题解析	9
2.4 思考题及其解答	12
2.5 习题及其解	20
第三章 三相变压器	40
3.1 学习目标	40
3.2 基本知识点	40
3.3 典型例题解析	42
3.4 思考题及其解答	42
3.5 习题及其解	46
第四章 三绕组变压器和自耦变压器	52
4.1 学习目标	52
4.2 基本知识点	52
4.3 典型例题解析	53
4.4 思考题及其解答	55
4.5 习题及其解	56
* 第五章 变压器过渡过程中的过电流现象	65
5.1 学习目标	65
5.2 基本知识点	65
5.3 典型例题解析	65

5.4 思考题及其解答·····	66
5.5 习题及其解·····	66

第二篇 直流电机

第六章 直流电机的用途、基本工作原理与结构 ·····	68
6.1 学习目标·····	68
6.2 基本知识点·····	68
6.3 典型例题解析·····	69
6.4 思考题及其解答·····	69
6.5 习题及其解·····	69
第七章 直流电机的磁路和电枢绕组 ·····	71
7.1 学习目标·····	71
7.2 基本知识点·····	71
7.3 典型例题解析·····	72
7.4 思考题及其解答·····	73
7.5 习题及其解·····	75
第八章 直流发电机 ·····	77
8.1 学习目标·····	77
8.2 基本知识点·····	77
8.3 典型例题解析·····	78
8.4 思考题及其解答·····	80
8.5 习题及其解·····	82
第九章 直流电动机 ·····	87
9.1 学习目标·····	87
9.2 基本知识点·····	87
9.3 典型例题解析·····	89
9.4 思考题及其解答·····	91
9.5 习题及其解·····	93

第三篇 交流电机的绕组电动势和磁动势

第十章 交流电机的绕组和电动势 ·····	108
10.1 学习目标·····	108
10.2 基本知识点·····	108
10.3 典型例题解析·····	110
10.4 思考题及其解答·····	112
10.5 习题及其解·····	115
第十一章 交流电枢绕组的磁动势 ·····	131
11.1 学习目标·····	131
11.2 基本知识点·····	131
11.3 典型例题解析·····	133

11.4	思考题及其解答	135
11.5	习题及其解	139

第四篇 同步电机

第十二章	同步电机的基本类型与结构	150
12.1	学习目标	150
12.2	基本知识点	150
12.3	典型例题解析	151
12.4	思考题及其解答	151
12.5	习题及其解	152
第十三章	同步电机的基本电磁关系	153
13.1	学习目标	153
13.2	基本知识点	153
13.3	典型例题解析	156
13.4	思考题及其解答	158
13.5	习题及其解	161
第十四章	同步发电机的运行特性	174
14.1	学习目标	174
14.2	基本知识点	174
14.3	典型例题解析	176
14.4	思考题及其解答	177
14.5	习题及其解	178
第十五章	同步发电机的并联运行	186
15.1	学习目标	186
15.2	基本知识点	186
15.3	典型例题解析	188
15.4	思考题及其解答	190
15.5	习题及其解	192
第十六章	同步电动机	205
16.1	学习目标	205
16.2	基本知识点	205
16.3	典型例题解析	206
16.4	思考题及其解答	208
16.5	习题及其解	210
* 第十七章	同步电机的非正常运行	223
17.1	学习目标	223
17.2	基本知识点	223
17.3	典型例题解析	224
17.4	思考题及其解答	225
17.5	习题及其解	227

第五篇 异步电机

第十八章 三相异步电动机的结构和基本工作原理	233
18.1 学习目标	233
18.2 基本知识点	233
18.3 典型例题解析	234
18.4 思考题及其解答	235
18.5 习题及其解	236
第十九章 三相异步电动机的运行原理	238
19.1 学习目标	238
19.2 基本知识点	238
19.3 典型例题解析	242
19.4 思考题及其解答	244
19.5 习题及其解	248
第二十章 三相异步电动机的功率、转矩与运行性能	257
20.1 学习目标	257
20.2 基本知识点	257
20.3 典型例题解析	259
20.4 思考题及其解答	261
20.5 习题及其解	265
第二十一章 三相异步电动机的启动	274
21.1 学习目标	274
21.2 基本知识点	274
21.3 典型例题解析	275
21.4 思考题及其解答	278
21.5 习题及其解	279
第二十二章 三相异步电动机的调速	284
22.1 学习目标	284
22.2 基本知识点	284
22.3 典型例题解析	285
22.4 思考题及其解答	287
22.5 习题及其解	287
* 第二十三章 三相异步电机的其他运行方式	294
23.1 学习目标	294
23.2 基本知识点	294
23.3 典型例题解析	294
23.4 思考题及其解答	296
23.5 习题及其解	296

* 第六篇 特种电机

第二十四章 自控式同步电动机	298
24.1 学习目标.....	298
24.2 基本知识点.....	298
24.3 思考题及其解答.....	299
第二十五章 永磁电机	301
25.1 学习目标.....	301
25.2 基本知识点.....	301
25.3 思考题及其解答.....	302
第二十六章 绕线型双馈异步电动机	304
26.1 学习目标.....	304
26.2 基本知识点.....	304
26.3 思考题及其解答.....	305
第二十七章 开关磁阻电机调速系统	307
27.1 学习目标.....	307
27.2 基本知识点.....	307
27.3 思考题及其解答.....	308
参考文献	310

绪 论

电机在国民经济中起着非常重要的作用。电机的基本工作原理是建立在电磁感应定律、电磁力定律、全电流定律等基本的电磁定律基础上的，掌握这些基本定律是研究电机基本理论的基础。

0.1 学习目标

基本要求：

- (1) 理解电机学中电机的定义。
- (2) 掌握常用的电机分类方法。
- (3) 熟练掌握电机学中常用的电工定律，包括电路的基尔霍夫定律、磁路欧姆定律、全电流定律、电磁感应定律、电磁力定律和能量守恒定律等。

0.2 基本知识

1. 电机及其分类

(1) 电机：电机学所述的电机，是指利用电磁感应作用，实现电能与机械能之间的转换或电能与电能之间的变换的电磁装置。

(2) 电机的分类

常用的电机分类方法如下：

- ①按能量传递、转换的功能及用途分为：变压器、发电机、电动机、控制电机。
- ②按结构特点和电源性质分为：变压器（是静止电机）、旋转电机（包含基本原理相同的直线电机）；旋转电机又可分为：直流电机、交流电机（按转速特点又分为同步电机、异步电机）。

2. 电机学中常用的电工定律

(1) 电路定律

- ①基尔霍夫电流定律：在电路任意一个节点处，电流的代数和恒等于零，即 $\sum i = 0$ 。
- ②基尔霍夫电压定律：在电路中，任何一个回路内所有电压降的代数和恒等于所有电动势的代数和，即 $\sum u = \sum e$ 。

(2) 磁路定律

- ①磁路的欧姆定律：磁路中的磁通等于作用在磁路上的磁动势除以磁路的磁阻，即

$$\Phi = \frac{F}{R_m}$$

式中， F 是作用在磁路上的磁动势，若磁路上有多个载流线圈产生磁动势，则 $F = \sum Ni$ ；

$R_m = \frac{l}{\mu S}$ 是磁路的磁阻 (μ 、 l 、 S 分别为磁路的磁导率、长度和截面积)。

②磁路的节点定律：在磁路的节点上，磁通的代数和等于零，即 $\sum \Phi = 0$ 。

③全电流定律（安培环路定律）：磁场中沿任何一个闭合环路磁场强度的线积分等于穿过该环路的所有电流的代数和，即

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum Ni$$

式中，当电流方向与积分路径方向符合右手螺旋关系时，电流取正号。

在电机的磁路计算中，上式可简化为 $\sum Hl = \sum Ni$ 。

(3) 电磁感应定律

①电磁感应定律：当线圈中的磁链（磁通）交变时，线圈中将产生感应电动势。当规定感应电动势的正方向与磁链的正方向符合右手螺旋关系时，该电动势可表示为

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

②变压器电动势：线圈和磁场相对静止，由于线圈中的磁链随时间变化而感应的电动势称为变压器电动势。

③运动电动势：由于线圈和磁场之间存在相对运动，导致线圈中磁链发生变化而产生的感应电动势称为运动电动势，也称切割电动势，该电动势可表示为

$$e = Blv$$

其方向用右手定则确定。

(4) 电磁力定律

载流导体在磁场中受到电磁力的作用。当导体和磁场互相垂直时，电磁力的大小为

$$f = Bli$$

其方向用左手定则确定。

(5) 能量守恒定律

电机的能量传递和转换过程遵守能量守恒定律，即

$$\text{输入能量} = \text{输出能量} + \text{内部损耗}$$

在分析电机时，能量守恒定律通常以功率平衡关系的形式来表示。

第一篇 变 压 器

第一章 变压器的用途、分类与结构

1.1 学 习 目 标

本章介绍变压器的用途、分类、电力变压器的主要结构和铭牌上各额定值的含义。

基本要求：

- (1) 了解电力变压器的主要结构。
- (2) 掌握变压器的基本工作原理。
- (3) 掌握变压器额定值的含义及其关系。

1.2 基本知识点

1. 变压器的主要功能和用途

(1) 变压器是一种静止的电器，它利用电磁感应原理，把一种等级的电压和电流的交流电能变换为同频率的另一种等级的电压和电流的交流电能。

(2) 变压器应用非常广泛，在电力系统中，电力变压器是核心设备之一，主要用于升压或降压，以实现大功率电能的远距离经济传输和电能的合理分配与使用。

2. 变压器的分类

- (1) 按用途分为：电力变压器、特种变压器。
- (2) 按绕组数目分为：双绕组变压器、三绕组变压器、自耦变压器。
- (3) 按相数分为：单相变压器、三相变压器。
- (4) 按冷却方式分为：干式变压器、油浸式变压器。

3. 电力变压器的主要结构

变压器主要由两个或两个以上的绕组绕在同一个铁心上组成。接到交流电源的绕组称为一次绕组；接到负载的绕组称为二次绕组。

铁心和绕组是变压器的主要部分，统称为变压器器身。油浸式电力变压器除了器身，还有油箱、冷却装置、保护装置和出线装置等部件。

4. 变压器的主要额定值

- (1) 额定容量 S_N (VA 或 kVA)：指变压器在额定运行工况下的视在功率。
- (2) 额定电压 U_{1N}/U_{2N} (V 或 kV)：一次绕组的额定电压 U_{1N} 是指正常运行时，一次绕

组应施加的电源(电网)电压有效值;二次绕组的额定电压 U_{2N} 是指变压器一次绕组加额定电压时,二次绕组的空载电压有效值。

(3) 额定电流 I_{1N}/I_{2N} (A): I_{1N} 、 I_{2N} 是指变压器额定运行时,一、二次绕组允许通过的电流有效值。

(4) 额定频率 f (Hz): 我国电网频率 $f=50\text{Hz}$ 。有些国家的电网频率 $f=60\text{Hz}$ 。

注意 对于三相变压器,额定容量 S_N 指的是三相总容量,额定电压 U_{1N} 、 U_{2N} 均指线电压,额定电流 I_{1N} 、 I_{2N} 均指线电流。

单相双绕组变压器的额定容量为 $S_N=U_{1N}I_{1N}=U_{2N}I_{2N}$;

三相双绕组变压器的额定容量为 $S_N=\sqrt{3}U_{1N}I_{1N}=\sqrt{3}U_{2N}I_{2N}$ 。

1.3 典型例题解析

例 1.1 一台三相变压器,一、二次绕组分别为三角形、星形联结,额定容量 $S_N=100\text{kVA}$,额定电压 $U_{1N}/U_{2N}=10.5/0.4\text{kV}$,求该变压器的:(1)一、二次侧额定电流;(2)一、二次侧的额定相电压和额定相电流。

思路与技巧 三相变压器的额定电压和额定电流均为线值,其额定电压和额定相电压、额定电流和额定相电流的关系与绕组的联结方式有关,详见下面的解答。

解:(1) 一次侧额定电流
$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{100}{\sqrt{3} \times 10.5} = 5.499 \text{ (A)}$$

二次侧额定电流
$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{100}{\sqrt{3} \times 0.4} = 144.3 \text{ (A)}$$

(2) 一次绕组为三角形联结,因此,一次侧额定相电压、额定相电流分别为

$$U_{1N\phi} = U_{1N} = 10.5 \text{ (kV)}, \quad I_{1N\phi} = \frac{I_{1N}}{\sqrt{3}} = \frac{5.499}{\sqrt{3}} = 3.175 \text{ (A)}$$

二次绕组为星形联结,因此,二次侧额定相电压、额定相电流分别为

$$U_{2N\phi} = \frac{U_{2N}}{\sqrt{3}} = \frac{0.4 \times 10^3}{\sqrt{3}} = 231 \text{ (V)}, \quad I_{2N\phi} = I_{2N} = 144.3 \text{ (A)}$$

1.4 思考题及其解答

1-1 电力变压器的主要功能是什么?它是通过什么作用来实现其功能的?

答: 电力变压器的主要功能是用来改变电压,即升压或降压。它是通过电磁感应作用来实现其功能的。绕在同一铁心上的一、二次绕组,与同一交变的磁通相链,绕组中产生的感应电动势与其匝数成正比。

1-2 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分主要有: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几倍。

1-3 变压器的铁心为什么要用涂有绝缘漆的薄硅钢片叠成? 若在铁心磁回路中出现较大的间隙, 对变压器会有何影响?

答: 铁心中交变的磁通会在铁心中引起铁损耗. 用涂绝缘漆的薄硅钢片叠成铁心, 可以大大减小铁损耗. 若在铁心磁回路中出现较大的间隙, 则主磁通所经过的铁心磁回路的磁阻就比较大, 产生同样的主磁通所需的励磁磁动势和励磁电流就大大增加, 即变压器的空载电流会大大增加.

1-4 变压器的主要额定值有哪些? 一台单相变压器的额定电压为 220/110V, 额定频率为 50Hz, 试说明其意义. 若这台变压器的额定电流为 4.55/9.1A, 问在什么情况下称其运行在额定状态?

答: 变压器的主要额定值有: ①额定视在功率或称额定容量 S_N (kVA); ②额定线电压 U_{1N}/U_{2N} (kV); ③额定线电流 I_{1N}/I_{2N} (A); ④额定频率 f_N (Hz).

一台单相变压器的额定电压为 220/110V, 额定频率为 50Hz, 这说明: ①该变压器高压绕组若接在 50Hz、220V 电源上, 则低压绕组空载电压为 110V, 是降压变压器; ②若该变压器低压绕组接在 50Hz、110V 电源上, 则高压绕组空载电压为 220V, 是升压变压器.

当这台变压器一次绕组加额定电压, 二次侧加负载, 使高压绕组电流为 4.55A、低压绕组电流为 9.1A 时, 称其运行在额定状态.

1.5 习题及其解

1-1 一台三相变压器的额定容量为 $S_N=3200$ kVA, 电压为 35/10.5kV, 一、二次绕组分别为星形、三角形联结, 求:

(1) 这台变压器一、二次侧的额定线电压、相电压及额定线电流、相电流;

(2) 若负载的功率因数为 0.85 (滞后), 则这台变压器额定运行时能带多少有功负载? 输出的无功功率又是多少?

解: (1) 一次额定线电压 $U_{1N}=35$ kV

$$\text{一次额定相电压 } U_{1N\phi} = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}} = \frac{35}{\sqrt{3}} = 20.2 \text{ (kV)}$$

$$\text{一次额定线电流 } I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{3200}{\sqrt{3} \times 35} = 52.8 \text{ (A)}$$

$$\text{一次额定相电流 } I_{1N\phi} = I_{1N} = 52.8 \text{ A}$$

$$\text{二次额定线电压 } U_{2N} = 10.5 \text{ kV}$$

$$\text{二次额定相电压 } U_{2N\phi} = U_{2N} = 10.5 \text{ kV}$$

$$\text{二次额定线电流 } I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{3200}{\sqrt{3} \times 10.5} = 176 \text{ (A)}$$

$$\text{二次额定相电流 } I_{2N\phi} = \frac{I_{1N}}{\sqrt{3}} = 101.6 \text{ A}$$

$$(2) \text{ 能带有功负载 } P = S_N \cos \varphi = 3200 \times 0.85 = 2720 \text{ (kW)}$$

$$\text{输出无功功率 } Q = S_N \sin \varphi = 3200 \times 0.527 = 1686 \text{ (kvar)}$$

(2) 主磁通和漏磁通

①主磁通 Φ_m : 沿铁心闭合, 与一、二次绕组同时交链, 在一、二次绕组中分别感应电动势 E_1 和 E_2 , 将电磁功率从一次绕组传递到二次绕组, 是传递能量的媒介。

②漏磁通: 主要经非铁磁性材料闭合, 仅与产生它的绕组相交链, 只起漏电抗压降的作用, 不直接参与能量传递。

(3) 磁动势平衡方程式

变压器负载运行时, 产生主磁通的励磁磁动势 F_0 是一、二次绕组合成磁动势 $F_1 + F_2$,

$$F_1 + F_2 = F_0 \quad \text{或} \quad I_1 N_1 + I_2 N_2 = I_0 N_1$$

式中, I_1 、 I_2 分别为一、二次绕组的相电流; I_0 为每相励磁电流。

(4) 感应电动势和变比

①主磁通 Φ_m 在一、二次绕组中感应的电动势分别为 $E_1 = -j4.44fN_1\Phi_m$ 和 $E_2 = -j4.44fN_2\Phi_m$, 式中, N_1 、 N_2 分别为一、二次绕组的匝数。

②一、二次绕组相电动势之比, 称为变压器的变比, 用 k 表示, 即 $k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$ 。

③ F_1 、 F_2 分别产生只与一、二次绕组相交链的一、二次绕组漏磁通 Φ_{s1} 、 Φ_{s2} ; 漏磁通 Φ_{s1} 、 Φ_{s2} 分别在一、二次绕组中感应漏电动势 E_{s1} 、 E_{s2} 。

(5) 电动势平衡方程式

按照规定的正方向, 将 E_{s1} 、 E_{s2} 分别表示成一、二次绕组漏电抗 X_1 、 X_2 上的电压降, 即 $E_{s1} = -jI_1X_1$, $E_{s2} = -jI_2X_2$ 。则一、二次绕组的电动势平衡方程式分别为

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(R_1 + jX_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1Z_1, \quad \dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2(R_2 + jX_2) = \dot{E}_2 - \dot{I}_2Z_2$$

可将 $\dot{E}_1$ 表示成 $\dot{I}_0$ 在励磁阻抗 Z_m 上的电压降, 即 $\dot{E}_1 = -\dot{I}_0Z_m = -\dot{I}_0(R_m + jX_m)$ 。其中, 励磁电阻 R_m 是反映铁损耗的等效电阻; 励磁电抗 X_m 是反映铁心导磁性能的等效电抗。

注意 ①漏磁通主要经非铁磁性材料闭合, 所经磁路可视为线性的, 因此, 与漏磁通相对应的漏电抗 X_1 、 X_2 均为常数。

②由于主磁通 Φ_m 沿非线性的铁心磁路闭合, 其磁导率与其饱和程度有关, 因此与主磁通相对应的等效参数 R_m 和 X_m 都不是常数, 它们随铁心饱和程度的增大而减小。变压器正常运行时, 一次侧外加额定电压 $U_1 = U_{1N}$, 当负载变化时 (从空载到满载), 由于 $I_1 |Z_1| \ll U_1$, 因此可认为 E_1 基本不变, 即 Φ_m 和铁心饱和程度基本不变, 则 R_m 和 X_m 可视为常数。

③变压器的空载运行可视为负载运行的一种特例。空载运行时, $I_2 = 0$, $I_1 = I_0$, 将这些关系代入到以上两式中, 可得到空载运行时的电动势平衡方程式。

(6) 变压原理

变压器正常运行时, 忽略漏阻抗压降的影响, 有 $\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$ 。因此, 只要一、二次绕组的匝数 N_1 和 N_2 不相等, 一、二次电压就不相等, 从而实现了变电压的目的。

2. 折合算法

(1) 折合的目的、依据

目的: 为了得到反映变压器内部电磁关系的等效电路, 以简化分析和计算。

依据: 变压器的二次绕组是通过其磁动势 F_2 影响一次绕组的, 因此, 在保持 F_2 (包括幅值和相位) 不变的条件下, 可将二次绕组的匝数视为与一次绕组的相同, 即把二次绕组折