



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定

电机学

学习指导与习题解答

（第二版）

李启煌 叶晓红 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定

电机学

学习指导与习题解答

(第二版)

李启煌 叶晓红 编
叶水音 主审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

“十二五”职业教育国家规划教材
教育部职业教育与成人教育司
教育部教材委员会

内 容 提 要

本书为“十二五”职业教育国家规划教材。

本书是配合《“十二五”职业教育国家规划教材 电机学（第三版）》（叶水音主编）的使用而编写。本书对应《电机学（第三版）》的每章内容给出学习指导，并根据需要掌握的内容提出了基本的要求，同时对其重点、难点进行总结归纳；每章还根据内容的重点精选了一些典型的题目进行分析和解答作为范例。本书对应《电机学（第三版）》每章的习题作了详细解答，同时针对每篇还提供了较为典型的自测题卷（书后附有参考答案）。

本书可作为高职高专院校电力技术专业电机学课程的配套教材，也可作为中等职业教育相关专业的教师和学生的辅助用书，同时还可供电气技术人员学习参考。

图书在版编目（CIP）数据

电机学学习指导与习题解答/李启煌，叶晓红编.—2版.—北京：中国电力出版社，2015.1

“十二五”职业教育国家规划教材

ISBN 978-7-5123-6696-1

I. ①电… II. ①李…②叶… III. ①电机学-高等职业教育-教学参考资料 IV. ①TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 249992 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>）

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 4 月第一版

2015 年 1 月第二版 2015 年 1 月北京第二次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 8 印张 184 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

本书原版是《普通高等教育“十一五”国家级规划教材（高职高专教育）电机学（第二版）》（叶水音主编）配套使用的辅助教材，内容包括《电机学（第二版）》的全部习题和解答以及学习指导。为了配套《“十二五”职业教育国家规划教材 电机学（第三版）》（叶水音主编），对原版进行详细的勘误后出版了该书的第二版。

本书对《电机学（第三版）》中的全部习题作了详细解答。为了便于读者在学习检查解题方法和运算结果，本书的章节次序和习题编号均与原书相同。每章还根据教材内容的重点精选了一些典型的题目进行分析和解答；每章有学习指导，对各章需要掌握的学习内容提出了基本要求并对各章的重点难点进行了总结和归纳，目的是让读者在学习加深对教材内容的理解，提高分析和解决问题的能力，每一部分还留有自测题并附提示和答案。

本书由福建电力职业技术学院李启煌、叶晓红编写，其中李启煌副教授编写了第八～十二、二十一～二十五章，叶晓红高级讲师编写了第一～七、十三～二十章。叶水音高级讲师担任本书的主审。另外，本书在编写过程中还得到很多电力专业同仁的帮助，在此一并表示衷心的感谢。

限于编者水平，书中欠妥之处难免，敬请广大读者批评指正。

编 者

2014年11月

目 录

前言

第一篇 变 压 器

第一章	变压器的基本知识和结构	1
	一、学习指导	1
	二、典型题解析	1
	三、习题解答	1
第二章	变压器的运行原理	3
	一、学习指导	3
	二、典型题解析	3
	三、习题解答	3
第三章	三相变压器	10
	一、学习指导	10
	二、典型题解析	10
	三、习题解答	11
第四章	变压器的运行分析	14
	一、学习指导	14
	二、典型题解析	14
	三、习题解答	15
第五章	其他变压器	19
	一、学习指导	19
	二、典型题解析	19
	三、习题解答	20
	变压器自测题 1	21
	变压器自测题 2	23

第二篇 交流绕组及其电动势和磁动势

第六章	交流绕组及其电动势	26
	一、学习指导	26
	二、典型题解析	26
	三、习题解答	27
第七章	交流绕组磁动势	33
	一、学习指导	33
	二、典型题解析	33
	三、习题解答	34
	交流绕组自测题 1	39
	交流绕组自测题 2	40

第三篇 异步电机

第八章	异步电动机的基本结构和工作原理	42
	一、学习指导	42
	二、典型题解析	42
	三、习题解答	43
第九章	异步电动机的运行分析	44
	一、学习指导	44
	二、典型题解析	44
	三、习题解答	45
第十章	异步电动机的电力拖动	49
	一、学习指导	49
	二、典型题解析	49
	三、习题解答	50
第十一章	单相异步电动机	53
	一、学习指导	53
	二、典型题解析	53
	三、习题解答	53
第十二章	异步电动机的异常运行	55
	一、学习指导	55
	二、典型题解析	55

三、习题解答	55
异步电机自测题 1	56
异步电机自测题 2	57

第四篇 同 步 电 机

第十三章	同步发电机的基本工作原理和结构	60
	一、学习指导	60
	二、典型题解析	60
	三、习题解答	60
第十四章	对称负载时的电枢反应	62
	一、学习指导	62
	二、典型题解析	62
	三、习题解答	62
第十五章	同步发电机的电动势方程式、相量图、特性及参数	64
	一、学习指导	64
	二、典型题解析	64
	三、习题解答	65
第十六章	同步发电机并列运行	70
	一、学习指导	70
	二、典型题解析	70
	三、习题解答	71
第十七章	同步电动机	78
	一、学习指导	78
	二、典型题解析	78
	三、习题解答	78
第十八章	同步发电机的异常运行	80
	一、学习指导	80
	二、典型题解析	80
	三、习题解答	81
第十九章	同步发电机三相突然短路	83
	一、学习指导	83
	二、典型题解析	83
	三、习题解答	84

第二十章	同步发电机的励磁方式简介	87
	一、学习指导	87
	二、习题解答	87
	同步电机自测题 1	87
	同步电机自测题 2	89

第五篇 直 流 电 机

第二十一章	直流电机的基本原理和结构	92
	一、学习指导	92
	二、典型题解析	92
	三、习题解答	92
第二十二章	直流电机的电枢绕组	94
	一、学习指导	94
	二、典型题型及解析	94
	三、习题解答	94
第二十三章	电枢反应和换向	97
	一、学习指导	97
	二、典型题解析	97
	三、习题解答	97
第二十四章	直流发电机	99
	一、学习指导	99
	二、典型题解析	99
	三、习题解答	99
第二十五章	直流电动机	101
	一、学习指导	101
	二、典型题解析	101
	三、习题解答	101
	直流电机自测题 1	103
	直流电机自测题 2	104
附录	自测题参考答案	106
	第一篇 变压器自测题参考答案	106
	第二篇 交流绕组及其电动势和磁动势自测题参考答案	108
	第三篇 异步电机自测题参考答案	110
	第四篇 同步电机自测题参考答案	113
	第五篇 直流电机自测题参考答案	115

第一篇

变 压 器

第一章 变压器的基本知识和结构

一、学习指导

本章介绍了电力变压器的基本工作原理、分类、用途及结构，并说明变压器型号中各种符号所代表的意义，以及铭牌上额定数据的含义。

本章应着重注意的问题如下：

(1) 电力变压器是依据电磁感应定律进行交流电能传递的静止电器，是利用一、二次侧绕组匝数不等实现变压的；变压器带负载时既实现变压又实现变流，但一、二次侧的频率是相同的，且等于电源频率。

(2) 三相变压器铭牌上的额定电压 U_{1N} 、 U_{2N} 及额定电流 I_{1N} 、 I_{2N} 均指线值。

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

二、典型题解析

变压器主要结构部件是哪两部分？它们在变压器中起什么作用？

[答] 变压器中最主要结构部件是铁心和绕组，它们分别构成变压器磁路和电路；有了它们就可以进行电磁感应，实现变压并传递交流电能。

三、习题解答

1. 简述变压器的基本工作原理，为何能改变电压？

[答] 当一次绕组接到交流电源时，一次绕组中流过交流电流，并在铁心中产生交变磁通 ϕ ，其频率与电源电压频率相同。铁心中的磁通同时交链一、二次绕组，根据电磁感应定律，一、二次绕组中分别感应出同频率的电动势，由于 $N_1 \neq N_2$ ，故 $\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$ ，二次绕组有了电动势，便可向负载供电，实现了电能的传递。

2. 变压器一、二次侧电压不相等时，电流是否相等？为什么？

[答] 不相等。因为变压器在传递电能的过程中，一、二次侧的电功率基本相等。当两侧电压不等时，两侧电流势必不等，高压侧的电流小，低压侧的电流大，故变压器在负载时改变电压的同时，也改变了电流。

3. 接在直流电源上的变压器能工作吗？为什么？

[答] 不能。因为变压器是根据电磁感应定律工作的。直流电源在变压器的一、二次绕

组中不能产生感应电动势，因此变压器接在直流电源上不能正常工作。

4. 变压器由几大部分组成？主要部件是什么？

[答] 变压器的结构由器身、油箱、保护装置、冷却装置四大部分组成。其主要部件是铁心和绕组。

5. 铁心的作用是什么？为什么要用厚 0.35~0.5mm、表面涂绝缘漆的硅钢片叠成？

[答] 铁心是变压器中耦合磁通的主磁路，它的主要作用是构成变压器的磁路系统。为了提高磁路的导磁性能和降低铁心内的磁滞及涡流损耗，要用厚 0.35~0.5mm、表面涂绝缘漆的硅钢片叠成。

6. 变压器油的作用是什么？

[答] 变压器油有两个作用：一是起到加强绝缘作用；二是起对流作用，加强散热。

7. 变压器分接开关的作用是什么？

[答] 变压器分接开关的作用是调节变压器输出电压。

8. 一台单相变压器， $S_N=50\text{kVA}$ ， $U_{1N}/U_{2N}=10/0.23\text{kV}$ ，试求一、二次侧额定电流。

[答] 一次侧额定电流 $I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}} = \frac{50 \times 10^3}{10 \times 10^3} = 5 \text{ (A)}$

二次侧额定电流 $I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}} = \frac{50 \times 10^3}{0.23 \times 10^3} = 217.39 \text{ (A)}$

9. 一台三相变压器， $S_N=1000\text{kVA}$ ， $U_{1N}/U_{2N}=35/6.3\text{kV}$ ，Yd (Y/Δ) 连接，试求一、二次侧额定电流及额定相电流。

[答] 一次侧额定电流 $I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{1000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 35 \times 10^3} = 16.49 \text{ (A)}$

一次侧额定相电流 $I_{1N\text{ph}} = I_{1N} = 16.49 \text{ (A)}$

二次侧额定电流 $I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{1000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 6.3 \times 10^3} = 91.64 \text{ (A)}$

二次侧额定相电流 $I_{2N\text{ph}} = \frac{I_{2N}}{\sqrt{3}} = \frac{91.64}{\sqrt{3}} = 52.91 \text{ (A)}$

第二章

变压器的运行原理

一、学习指导

本章主要介绍了单相双绕组电力变压器运行时的电磁关系、折算法、变压器的基本方程式、等值电路、相量图和标幺值，变压器的参数测定及变压器的运行特性等。这些内容是变压器的理论基础，十分重要，要注意概念的理解，原理搞清楚后，计算较简单。

本章应着重注意的问题：

- (1) 变压器中各物理量的正方向惯例。
- (2) 变压器绕组的折算。
- (3) 变压器空载、负载时的基本方程式、等值电路和相量图。
- (4) 变压器的运行特性。

二、典型题解析

根据 \dot{U}_1 的正方向，按变压器习惯正方向的规定，在图 2-1 (a) 中用箭头表示其物理量的正方向。

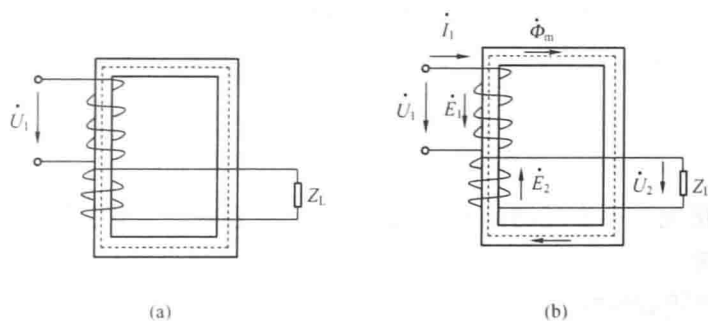


图 2-1 典型题图

[答] 该正方向如图 2-1 (b) 所示。该题为使读者掌握各物理量正方向的规定，更易理解变压器运行时的相量图。

三、习题解答

1. 试述主磁通和漏磁通两者之间的主要区别。

[答] (1) 主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 沿铁心主磁路闭合，同时交链一、二次绕组，占总磁通的绝大部分；而漏磁通仅占很小的一部分。

(2) 漏磁通只单独与一次绕组或二次绕组交链，漏磁通的大部分不经过铁心，它沿非铁磁材料闭合，磁阻为常数，所以漏磁通与空载电流为线性关系。

(3) 主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 在一、二次绕组分别感应出电动势 \dot{E}_1 和 \dot{E}_2 。二次绕组电动势 \dot{E}_2 相当于

负载的电源,向负载输出功率,这说明通过主磁通的耦合作用,变压器实现了能量的传递;而漏磁通仅交链单侧绕组,只起漏抗压降的作用。漏电抗 $x_{1\sigma}$ 、 $x_{2\sigma}$ 表征了一、二次侧漏磁通的存在, x_m 表征了主磁通的存在。

2. 试述空载电流的大小、性质、波形。

[答] 空载电流的大小约为额定电流的 $1\% \sim 10\%$ 。

空载电流基本上属于感性无功性质的电流,通常称为励磁电流。

空载电流的波形取决于铁心主磁路的饱和程度。当变压器接额定电压时,铁心通常处在近于饱和的情况下工作,当 Φ_m 为正弦波时, I_0 为尖顶波。

3. x_1 、 x_2 、 x_m 各对应于什么磁通?它们是否为常数?为什么?

[答] x_1 、 x_2 分别对应于一、二次侧漏磁通,漏磁通沿非铁磁材料闭合,磁阻为常数,所以漏磁通与空载电流为线性关系。

x_m 对应于主磁通,因铁心具有饱和特性,主磁通磁路的磁阻不为常数,致使主磁通与励磁的空载电流之间为非线性关系。

4. 变压器空载时,一次绕组加额定电压,一次绕组电阻很小,为什么空载电流不大呢?如果一次绕组施加相同数值的直流电压,结果会怎样?为什么?

[答] 变压器空载时,虽然一次绕组电阻很小,但由于绕组中的反电动势几乎和额定电压相等,致使空载电流很小。如果一次绕组施加相同数值的直流电压,由于一次绕组没有感应反电动势,同时一次绕组电阻很小直流电流将很大,可能会烧毁绕组。

5. 为什么改变变压器的变比就能调压?若想提高一台降压变压器的二次侧电压,当调整高压侧的分接开关时,应使高压绕组的匝数增加还是减少?

[答] 变压器的变比 $k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$, 可看出改变变压器的变比就能调压。

因为 $U_1 N_2 = U_2 N_1$, 若想使二次侧电压 U_2 增加, U_1 、 N_2 不变,一次侧(高压)绕组 N_1 必须减少。

6. 在下述四种情况下,变压器的 Φ_m 、 x_m 、 I_0 、 p_{Fe} 各有何变化:

- (1) 电源电压增加;
- (2) 一次侧绕组匝数增加;
- (3) 铁心接缝变大;
- (4) 铁心叠片减少。

[答] (1) 电源电压增加,即一次侧电压 U_1 增加 \rightarrow 一次侧电动势 E_1 增加 \rightarrow 使主磁通 Φ_m 增加 \rightarrow 空载电流 I_0 增加 $\rightarrow p_{Fe}$ 增加。同时,主磁通 Φ_m 增加 \rightarrow 铁心饱和程度增加 \rightarrow 磁阻 r_m 增加 \rightarrow 励磁阻抗 $x_m = \omega \frac{N^2}{r_m}$ 减少。

(2) 一次侧绕组匝数增加,因为电源电压 U_1 不变,即电动势 E_1 不变,而 $E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$, 当 N_1 增加 $\rightarrow \Phi_m$ 将减少 $\rightarrow I_0$ 减少,由于 $\dot{E} = \dot{I}_0 Z_m$, 故 x_m 稍有增大;同时, Φ_m 减少 \rightarrow 使 I_0 减少, p_{Fe} 减少。

(3) 铁心接缝变大,磁阻 r_m 增加,由于 U_1 不变, Φ_m 基本不变, p_{Fe} 基本不变, r_m 增加 $\rightarrow F_0$ 增加 $\rightarrow I_0$ 增加。同时, r_m 增加 \rightarrow 励磁阻抗 x_m 减少。

(4) U_1 不变, Φ_m 基本不变时,当铁心叠片减少,即铁心截面 S 减少,磁阻 $r_m = \frac{l}{\mu S}$ 增加

→ F_0 增加 → I_0 增加, B_m 增加 → p_{Fe} 增加。同时, Φ_m 不变 → B_m 增加 → 磁导率 μ 下降 → 励磁阻抗 x_m 减少。

7. 变压器中的主磁通是否随负载变化? 为什么?

[答] 主磁通随负载变化而稍有变化。主磁通与外施电压近似成正比 ($U_1 \approx E_1 = 4.44fN_1\Phi_m$), 即电压决定磁通, 当电源电压不变时, Φ_m 近似不变。带上负载时, 一次侧电流由空载时的 I_0 变为 I_1 , $\dot{U}_1 = -\dot{E} + \dot{I}_1 Z_1$, 由于 Z_1 很小, 所以 I_1 的增加, E_1 稍降, Φ_m 稍有降低。

8. 试用磁动势平衡关系分析为什么变压器一次侧电流随二次侧电流的变化而变化?

[答] 磁动势平衡方程式 $\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_0$

改写成电流形式 $\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_0 N_1$

两边同时除以 N_1 $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \left(\frac{N_2}{N_1}\right)\dot{I}_2 = \dot{I}_0 - \frac{1}{k}\dot{I}_2$

可以看出, 当一次侧电压不变时, 励磁电流 \dot{I}_0 不变, 变压器一次侧电流 \dot{I}_1 随二次侧电流 \dot{I}_2 的变化而变化。

9. 为什么可以把变压器的空载损耗近似地看作是铁损耗, 而把短路试验时的损耗近似地看作铜损耗?

[答] 从变压器空载时的等值电路中可知, 因为 $r_m \gg r_1$, $x_m \gg x_1$, $I_0^2 r_1$ 很小, 而 $U_0 = U_N$ 磁通为额定, 铁损耗也为额定值, 故铁损耗远远大于铜损耗, 因此可以把变压器的空载损耗近似看作铁损耗。

变压器短路试验时, 由于二次侧短路, 因此无功功率输出, 输入功率全部变成功率损耗, 即短路损耗。短路损耗包括 p_{Fe} 和 p_{Cu} 。由于短路试验时, 外加试验电压很低, Φ_m 大大低于正常运行数值, p_{Fe} 很小, 可以忽略不计, 因而认为短路损耗就是铜损耗 p_{Cu} 。

10. 在低压侧做空载试验与在高压侧做空载实验求得的参数有什么不同? 在高压侧做短路试验与在低压侧做短路试验求得的参数有什么不同?

[答] 变压器的空载试验一般是在低压侧进行, 故测得的励磁参数是折算到低压侧的数值, 如需要折算到高压侧, 应将所测参数乘以 k^2 , 若在高压侧做, 就不需折算。同理, 短路试验一般是在高压侧做的, 故测得的励磁参数是折算到高压侧的数值, 如需要折算到低压侧, 应将所测参数除以 k^2 。

11. 变压器二次侧分别带电阻性、电感性或电容性负载时, 二次侧电压有何不同? 二次侧电压在什么情况下才会高于空载电压?

[答] 由 $\Delta U = \beta(r_k^* \cos\varphi_2 + x_k^* \sin\varphi_2)$ 可知, 变压器的电压变化率, 与变压器漏阻抗的标么值的大小、负载的大小及负载的性质有关。当变压器带纯电阻性负载时, $\varphi_2 = 0$, $\sin\varphi_2 = 0$, 实际变压器中, $x_k^* \gg r_k^*$, 所以 ΔU 很小。当变压器带电容性负载时, φ_2 为正值, ΔU 为正值, 说明带感性负载后, 二次侧实际电压 U_2 低于二次侧额定电压 U_{2N} 。当变压器带电容性负载时, φ_2 为负值, $\sin\varphi_2$ 为负值, 当 $|x_k^* \sin\varphi_2| > r_k^* \cos\varphi_2$ 时, ΔU 为负值, 说明带电容性负载后, 二次侧实际电压 U_2 高于二次侧额定电压 U_{2N} 。

从以上分析可知, 当变压器二次侧带电容负载时, 二次侧电压才会有可能高于空载电压。

12. 变压器的电压变化率与哪些因素有关? 从运行的角度分析电压变化率大小的利弊。

[答] 变压器的电压变化率与变压器的参数和负载性质、负载的大小有关。电压变化率的大小表明了变压器运行时二次侧电压的稳定性。变压器在运行时, 二次侧电压将随负载的变化而变化, 如果电压变化范围太大, 将给用户带来不利影响。因此从运行的角度分析电压变化率小些好, 但 ΔU 小, Z_k 就小, 变压器发生短路时的短路电流较大。

13. 变压器的运行效率在什么情况下达到最大? 若使变压器运行在较高效率, 负载系数应在多大范围?

[答] 当铜损耗(可变损耗)等于铁损耗(不变损耗)时, 变压器的效率最高。若使变压器运行在较高效率, 负载系数应在 0.5~0.6 范围之间。

14. 一台三相变压器, Yy 连接, $S_N = 200\text{kVA}$, $U_{1N}/U_{2N} = 10\,000/400\text{V}$, 一次侧接额定电压, 二次侧接三相对称星形接法负载, 每相负载阻抗 $Z_L = 0.96 + j0.48\Omega$, 变压器每相短路阻抗 $Z_k = 0.15 + j0.35\Omega$ 。试用简化等值电路, 求该变压器负载运行时:

- (1) 一、二次侧电流的实际值和标么值;
- (2) 二次侧电压的实际值和标么值;
- (3) 输入的有功功率、无功功率和视在功率;
- (4) 输出的有功功率、无功功率和视在功率。

[解] (1) 一次侧电流额定值 $I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{200 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 10\,000} = 11.55 \text{ (A)}$

二次侧电流额定值 $I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{200 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 400} = 288.66 \text{ (A)}$

变比 $k = \frac{U_{1N\text{ph}}}{U_{2N\text{ph}}} = \frac{\frac{10\,000}{\sqrt{3}}}{\frac{400}{\sqrt{3}}} = 25$

折算到一次侧的负载阻抗

$$Z'_L = k^2 Z_L = 25^2 \times (0.96 + j0.48) = 670.82 \angle 26.57^\circ (\Omega)$$

变压器总阻抗

$$Z = Z'_L + Z_k = 600 + j300 + 0.15 + j0.35 = 600.15 + j300.35 = 671.11 \angle 26.59^\circ (\Omega)$$

一、二次侧电流的实际值

$$I_1 = I'_2 = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}Z} = \frac{10\,000}{\sqrt{3} \times 671.11} = 8.6 \text{ (A)}$$

$$I_2 = kI'_2 = 25 \times 8.6 = 215 \text{ (A)}$$

一、二次侧电流的标么值

$$I_1^* = \frac{I_1}{I_{1N}} = \frac{8.6}{11.55} = 0.74$$

$$I_2^* = \frac{I_2}{I_{2N}} = \frac{215}{288.68} = 0.74$$

(2) $U_2 = kI_1 Z_L = 25 \times 8.6 \times \sqrt{0.96^2 + 0.48^2} = 230.76 \text{ (V)}$

$$U_2^* = \frac{U_2}{U_{2Nph}} = \frac{230.76}{\frac{400}{\sqrt{3}}} = 0.999$$

$$(3) \text{ 输入的有功功率 } P_1 = 3I_1^2(r_k + k^2 r_L) = 3 \times 8.6^2 \times (0.15 + 25^2 \times 0.96) = 133.16(\text{kW})$$

$$\text{输入的无功功率 } Q_1 = 3I_1^2(x_k + k^2 x_L) = 3 \times 8.6^2 \times (0.35 + 25^2 \times 0.48) = 66.64(\text{kvar})$$

$$\text{输入的视在功率 } S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} = \sqrt{133.16^2 + 66.64^2} = 148.9(\text{kVA})$$

$$(4) \text{ 输出的有功功率 } P_2 = 3I_2^2 r_L = 3 \times 215^2 \times 0.96 = 133.12(\text{kW})$$

$$\text{输出的无功功率 } Q_2 = 3I_2^2 x_L = 3 \times 215^2 \times 0.48 = 66.56(\text{kVA})$$

$$\text{输出的视在功率 } S_2 = \sqrt{P_2^2 + Q_2^2} = \sqrt{133.12^2 + 66.56^2} = 148.83(\text{kVA})$$

15. 一台三相变压器 $S_N = 100\text{kVA}$, $U_{1N}/U_{2N} = 6/0.4\text{kV}$, Yy 连接, 室温 25°C 时空载、短路试验数据见表 2-1。试求:

- (1) 折算到高压侧的励磁阻抗的实际值、标么值;
- (2) 短路阻抗的实际值、标么值;
- (3) 作出 T 形等值电路 (设 $r_1 = r'_2$, $x_1 = x'_2$);
- (4) 阻抗电压及其两个分量, 额定负载损耗;
- (5) 额定负载及 $\cos\varphi_2 = 0.8$ (滞后) 时的 ΔU 、 U_2 、 η ;
- (6) $\cos\varphi_2 = 0.8$ (滞后) 时的最大效率 η_{\max} 。

表 2-1 实 验 数 据

实验名称	线电流 (A)	线电压 (V)	三相功率 (W)	备注
空载试验	9.37	400	616	电源加在低压侧
短路试验	9.4	251.9	1920	电源加在高压侧

[解] (1) 折算到高压侧的励磁阻抗的实际值、标么值:

1) 高、低压侧额定相值及变比为

$$U_{1Nph} = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}} = \frac{6 \times 10^3}{\sqrt{3}} = 3464.10(\text{V})$$

$$I_{1Nph} = I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{100 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 6 \times 10^3} = 9.62(\text{A})$$

$$U_{2Nph} = \frac{U_{2N}}{\sqrt{3}} = \frac{0.4 \times 10^3}{\sqrt{3}} = 230.94(\text{V})$$

$$I_{2Nph} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{100 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 0.4 \times 10^3} = 144.34(\text{A})$$

$$k = \frac{U_{1Nph}}{U_{2Nph}} = \frac{6 \times 10^3}{\sqrt{3}} \bigg/ \frac{0.4 \times 10^3}{\sqrt{3}} = 15$$

2) 把空载试验数据化为一相的值为

$$U_0 = U_{2Nph} = 230.94(\text{V})$$

$$I_0 = 9.37(\text{A})$$

$$p_0 = \frac{616}{3} = 205.33(\text{W})$$

3) 把短路试验数据化为一相的值为

$$U_k = \frac{251.9}{\sqrt{3}} = 145.43(\text{V})$$

$$I_k = I_{1\text{Nph}} = 9.4(\text{A})$$

$$p_k = \frac{1920}{3} = 640(\text{W})$$

折算到高压侧的励磁阻抗的实际值为

$$Z'_m = k^2 \frac{U_0}{I_0} = 15^2 \times \frac{230.94}{9.37} = 5545.5(\Omega)$$

$$r'_m = k^2 \frac{p_0}{I_0^2} = 15^2 \times \frac{205.33}{9.37^2} = 526.2(\Omega)$$

$$x'_m = \sqrt{Z'^2_m - r'^2_m} = \sqrt{5545.5^2 - 526.2^2} = 5520.47(\Omega)$$

高压侧阻抗基值为

$$Z_{1j} = \frac{U_{1\text{Nph}}}{I_{1\text{Nph}}} = \frac{3464.10}{9.62} = 360.09(\Omega)$$

则

$$Z_m^* = \frac{Z'_m}{Z_{1j}} = \frac{5545.5}{360.09} = 15.4$$

$$r_m^* = \frac{r'_m}{Z_{1j}} = \frac{526.2}{360.09} = 1.46$$

$$x_m^* = \sqrt{Z_m^{*2} - r_m^{*2}} = \sqrt{15.4^2 - 1.46^2} = 15.33$$

(2) 短路阻抗的实际值、标么值

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k} = \frac{145.43}{9.4} = 15.47(\Omega)$$

$$r_k = \frac{p_k}{I_k^2} = \frac{640}{9.4^2} = 7.24(\Omega)$$

$$x_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2} = \sqrt{15.47^2 - 7.24^2} = 13.67(\Omega)$$

$$Z_k^* = \frac{Z_k}{Z_{1j}} = \frac{15.47}{360.09} = 0.043$$

$$r_k^* = \frac{r_k}{Z_{1j}} = \frac{7.24}{360.09} = 0.02$$

$$x_k^* = \frac{x_k}{Z_{1j}} = \frac{13.67}{360.09} = 0.038$$

(3) T形等值电路如图 2-2 所示。

$$r_1^* = r_2^* = \frac{1}{2} r_k^* = 0.01$$

$$x_1^* = x_2^* = \frac{1}{2} x_k^* = 0.019$$

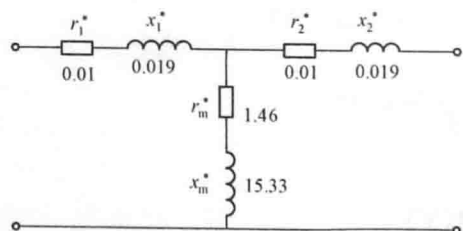


图 2-2 变压器 T 形等值电路

$$\begin{aligned}
 (4) \text{ 因为 } r_{k(75^\circ\text{C})} &= \frac{235 + 75}{235 + \theta} r_k \\
 &= \frac{235 + 75}{235 + 25} \times 7.24 \\
 &= 8.63(\Omega)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Z_{k(75^\circ\text{C})} &= \sqrt{r_{k(75^\circ\text{C})}^2 + x_k^2} \\
 &= \sqrt{8.63^2 + 13.67^2} = 16.17(\Omega)
 \end{aligned}$$

所以，阻抗电压及两个分量为

$$U_k = \frac{I_{1\text{Nph}} Z_{k(75^\circ\text{C})}}{U_{1\text{Nph}}} \times 100\% = \frac{9.62 \times 16.17}{3464.10} \times 100\% = 4.49\%$$

$$U_{kr} = \frac{I_{1\text{Nph}} r_{k(75^\circ\text{C})}}{U_{1\text{Nph}}} \times 100\% = \frac{9.62 \times 8.63}{3464.10} \times 100\% = 2.4\%$$

$$U_{kx} = \frac{I_{1\text{Nph}} X_k}{U_{1\text{Nph}}} \times 100\% = \frac{9.62 \times 13.67}{3464.10} \times 100\% = 3.8\%$$

三相额定负载总损耗为

$$p_{kN} = 3I_{1\text{Nph}}^2 r_{k(75^\circ\text{C})} = 3 \times 9.62^2 \times 8.63 = 2395.97(\text{W})$$

(5) 因为额定负载时 $\beta = 1$ ，所以

$$\Delta U = \beta(r_k^* \cos\varphi_2 + x_k^* \sin\varphi_2) = 1 \times (0.02 \times 0.8 + 0.038 \times 0.6) = 3.88\%$$

$$U_2 = U_{2N} - \Delta U U_{2N} = 0.4 - 0.388 \times 0.4 = 0.245(\text{kV})$$

$$\begin{aligned}
 \eta &= \frac{\beta S_N \cos\varphi_2}{\beta S_N \cos\varphi + p_0 + \beta^2 p_{kN}} = \frac{1 \times 100 \times 10^3 \times 0.8}{1 \times 100 \times 10^3 \times 0.8 + 616 + 1^2 \times 2395.97} \\
 &= 96.37\%
 \end{aligned}$$

$$(6) \quad \beta_0 = \sqrt{\frac{p_0}{p_{kN}}} = \sqrt{\frac{616}{2395.97}} = 0.507$$

$$\eta_{\max} = \frac{\beta_0 S_N \cos\varphi_2}{\beta_0 S_N \cos\varphi + 2p_0} = \frac{0.507 \times 100 \times 10^3 \times 0.8}{0.507 \times 100 \times 10^3 \times 0.8 + 2 \times 616} = 97.05\%$$