

目 录

第一章 变压器概论

1.1 电力变压器在电力工业中的作用

1.1.1 电力变压器的发展史

1.1.2 电力变压器在国名经济中的作用

1.1.3 电力变压器的分类

1.2 变压器主要技术参数

1.2.1 额定电压

1.2.2 额定容量

1.2.3 额定电流

1.2.4 阻抗电压 U_k

1.2.5 负载损耗 P_k

1.2.6 空载电流 I_0

1.2.7 空载损耗 P_0

1.2.8 频率 f

1.2.9 相数

1.3 变压器铭牌

1.4 变压器型号

第二章 变压器的运行分析

2.1 空载运行

2.2 电压、电势、和励磁电流

2.3 铁心饱和的影响

2-4 变压器的空载运行及向量图

2-5 变压器空载时的等值电路

第三章 变压器的运行分析

3.1 变压器负载运行时电压和电流各种关系的分析

3.1.1 副边电压和电流的关系

3.1.2 原、副边电流的关系

3.1.3 负载运行时各量的综合关系

3.2 折合算法

3.3 变压器运行方程组

3.4 变压器的等值电路图

3.5 负载时的向量图

3.6 变压器的运行性能

3.6.1 变压器负载时副边端电压的变化

3.6.2 变压器的效率

第四章 三相变压器及联结组

4.1 单相变压器的三相组

4.1.1 单相变压器的联结

4.1.2 单相变压器的联结组标号

4.2 三相变压器的磁路和绕组

4.2.1 三相三柱式铁心变压器的磁路系统

4.2.2 三相绕组的联结

4.2.2.1 绕组的标注方式

4.2.2.2 三相绕组联结

4.2.2.3 三相变压器常用联结组

4.3 三相变压器空载运行时的电势波形

4.4 三相变压器的不对称运行问题

第五章 三绕组变压器

5.1 概述

5.2 三绕组变压器的工作原理

5.3 自耦变压器

第六章 变压器的并联运行

6.1 概述

6.1.1 变压器并联运行的理想工作状态

6.1.2 变压器并联运行的条例

6.2 并联运行时的负载分配

第七章 变压器的过渡过程

7.1 概述

7.2 过电流现象

7.2.1 空载合闸到电源

7.2.2 突然短路

7.3 过电压现象

第一章 变压器概论

1.1 电力变压器在电力工业中的作用

1.1.1 电力变压器的发展史

1882 年高拉德 (Gaulard) 和吉伯斯 (Gibbs) 的交流供电系统获
得英国专利。他们利用一种叫做 “ 第二发电机 ” (具有开口铁心 , 使
变压器的前身) 的设备来升高和降低电压。

1884 年 9 月 16 日 , 第一台利用闭合铁心 , 在铁心柱外有绕组的
变压器 , 由德利 (M. Dery) 伯拉锡 (O. Blathy) 和济别尔诺夫斯
基 (K. Zipernovsky) 在匈牙利干茨 (Ganz) 工厂制造出来的 , 这台
变压器是单相变压器 , 容量 1400VA , 电压比为 120/72V , 频率 40Hz
(见图 1-1) 并在他们的专利申请中首次使用 “ 变压器 ” 这一术语。
1885 年在布达佩斯展览会上展出了这台设备。

美国人威斯丁豪斯 (Westinghouse) 买了几台高拉德和吉伯斯的
交流电压变换设备及其专利 , 开始重新进行机械和电气设计。1886
年第一台用于交流照明系统的变压器投入使用并获得成功 , 随后这一
项技术得到迅速发展。

1890 年 AEG (原德国通用电气公司) 工厂的多里弗-多布罗夫斯
基 (M. O. Dolivo-Dobrowsky) 发明了三相变压器。



从 1886 年变压器用于照明得到实际使用以后，交流输电电压和容量增长很快。1949 年新中国成立以后，随着国民经济的快速发展，电力工业也同样得到了快速发展，特别是改革开放以来，电力工业的发展速度更比以前大有提高，见表 1-1。

表 1-1 新中国电力工业和变压器工业的发展

年份	发电机装机/万 kW	年发电量/亿 kWh	变压器年产量/万 kVA
1949	185	43	11.9
1995	21724	10069	13444
1996	23600	10794	14002
1997	25000	11350	12446
2000	31932	13685	18177
2001	33861	14839	20832
2002		16476	
2003		19086	
2004		21930	
2005	50841	24747	63115

目前,变压器的最高电压为 1000kV,最大容量为 $3 \times 1000\text{MVA}$,
这台变压器安装在日本变电站(见图 1-2),现已降压运行。

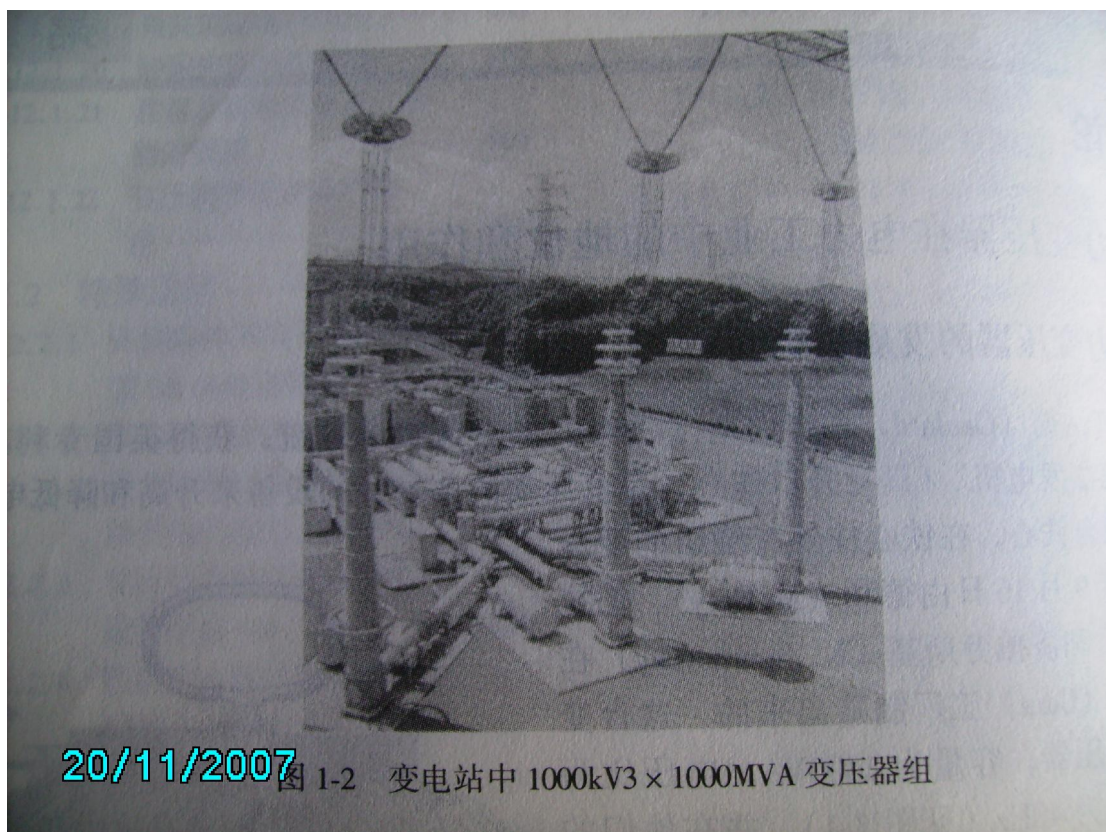


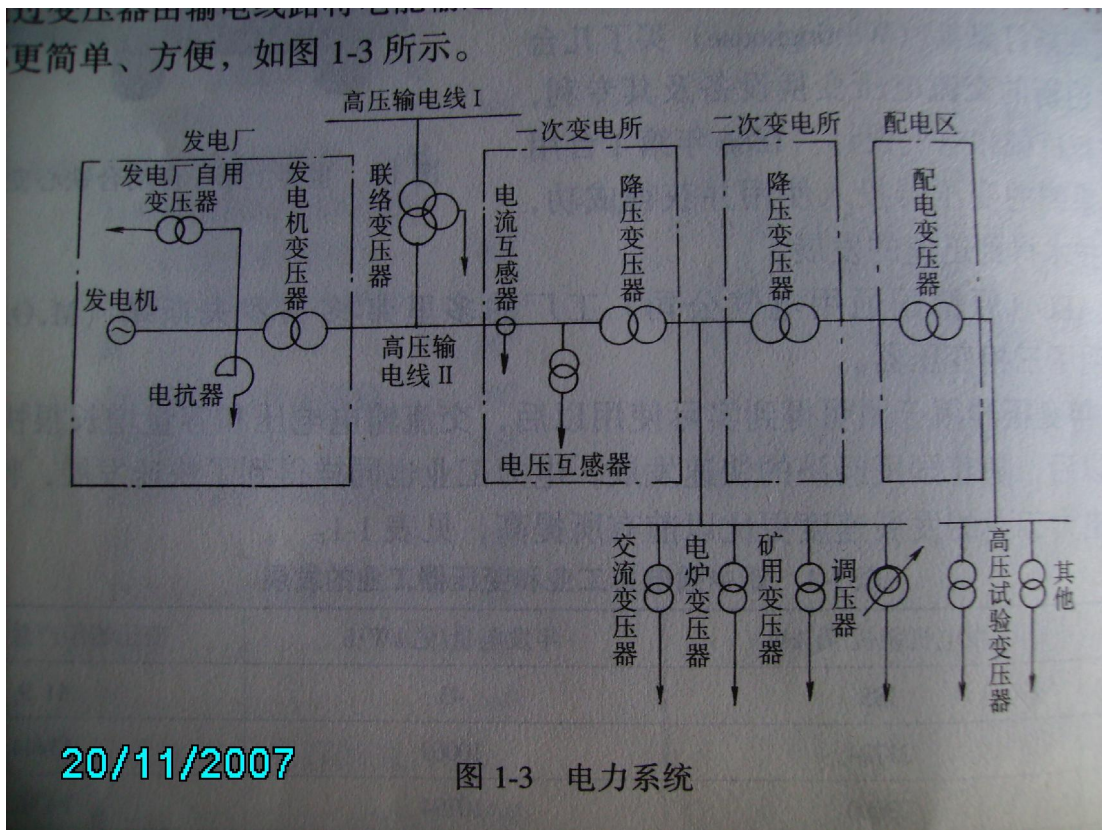
图 1-2 变电站中 1000kV $3 \times 1000\text{MVA}$ 变压器组

作业题：

- 1) 收集资料把表 1.1 种空白的格子填满。
- 2) 我国三峡工程发电机升压变压器的额定电压、额定容量是多少？

1.1.2 电力变压器在国名经济中的作用

由于电力作为能源,可以从能源产地将煤炭、石油、天然气或核能等转换成电力后,很方便地通过变压器由输电线路将电能输送到需要动力能源的地方。电力输送比其他形式的能源输送都更简单、方便,如图 1-3 所示。



因此，电力变压器给经济的发展，提供了可靠的、不间断的能源。可以说国名经济的可行各业和人民生活都离不开电力。

一般情况下，能源基地和需要动力能源的地方会有一定的距离，为了经济地远距离输送电力，必须将发电机电压提高到输电电压，而在电力用户处，再将输电电压降低到用户使用的电压，升高和降低电压的设备是变压器。

发电机发出的电压在 10.5 ~ 20kV 范围内，需要通过变压器变成更得高电压进行远距离传送，然后逐级降压，最终到用户需要的电压。一般大型动力设备电压 3 ~ 10kV，小型动力设备为 380，220 伏。

电力输送的距离越远，输送的功率越大，要求输电电压越高，各级不同电压等级的输送距离和输送功率见下表：

表 1-2 各电压等级的输送距离和输送功率

系统电压 (kV)	输送距离 (km)	输送功率 (万 kW)
0.4	0.6 及以下	100

3	1 ~ 3	0.01 ~ 0.1
10	6 ~ 20	0.02 ~ 0.2
35	20 ~ 50	0.2 ~ 1
110	50 ~ 150	1 ~ 5
220	200 ~ 400	10 ~ 50
330	500	20 ~ 100
500	800	150
750	1000 以上	200 ~ 500
1000	2000 以上	500 以上

小结：

定义——变压器是一种静止电器，由绕在共同铁心上的两个或两个以上的线圈组成，它们通过交变磁场联系着。

功能——把某种等级的电压与电流转变成同频率的另一种等级的电压与电流。

1.1.3 电力变压器的分类

变压器——电力变压器，用于电力系统；

——特种变压器，用于各种工业。

1. 按功能分类——升压变，降压变，联络变，配电变，厂用变。

2. 按容量分类

——小型变压器：5 ~ 630 kVA。

——中型变压器：630 ~ 6300kVA。

——大型变压：电压 110 kV 及以下，容量 8000 ~ 63000 kVA。

——特大型变压器：电压 220 kV 及以上，容量 31500 kVA 及以上。

3. 按变压器绕组结构分类——双绕组变，三绕组变，多绕组变，自

耦变，分裂变。

4. 按变压器铁心结构分类——心式变压器，壳式变压器，卷铁心变压器。

5. 按油箱结构形式分类——桶式油箱变压器，钟罩式油箱变压器，全密封变压器

6. 按相数分类——单相变压器，三相变压器，多相变压器。

7. 按冷却介质分类

——油浸变压器（自冷，水冷，风冷，强迫水冷，强迫风冷）

——干式变压器，这种变压器没有油，线圈和铁心通过空气冷却。

——充气变压器，器身放在密封的铁箱内，箱内充以特种气体，如SF₆气体。

8. 按线圈使用的导线材料分类——铜线变压器，铝线变压器，电缆绕组变压器，超导变压器。

9. 按铁心使用的导磁材料分类——电工钢片变压器，非晶合金变压器

10. 按调压方式分类

——无励磁调压，当二次侧不带负载，一次侧与电网脱离的调压方式。

——有载调压，在带二次负载下进行调压。

11. 按中性点绝缘水平分类——全绝缘变压器，分级绝缘变压器。

12. 特种变压器

n 整流变，用于把交流电能变换为直流电能的场合。

——牵引变压器（地铁）

——励磁变压器

- n 变频变压器
- n 电炉变，用于把电能转换为热能的场合。
- n 试验变，供高压试验用的变压器。
- n 矿用变压器，供矿井下使用的变压器。
- n 船用变压器，供船舶上用的变压器。
- n 中频变压器。
- n 大电流变压器。
- n 牵引变压器，为铁道电机车供电用的变压器。
- n 电机车变压器，用于电机车头上的变压器。

1.2 变压器主要技术参数

1.2.1 额定电压

指变压器长时间运行时所能承受的工作电压（额定电压，指线电压），以 kV 表示。变压器的额定电压应与所连接的输电线路电压相等，我国输电线路电压等级有（kV）：

0.38 3 6 10 15 (20) 35 63 110 220 330 500 1000

输变电线路电压等级是线路终端电压值，因此连接线路终端变压器一侧的额定电压与上列数值相同。输变电线路始端的电压考虑了线路的压降将比终端电压为高，35 kV 以下电压等级的始端电压比电压等级要高 5%，而 35 kV 以上的要求高 10%，因此变压器额定电压也相应提高。

线路的始端电压值为：

0.4 3.15 6.3 10.5 15.75 38.5 69 121 242 363 550 1100

高压额定电压等于线路始端电压的变压器为升压变压器，等于线路终端电压的变压器为降压变压器。

某一个电压等级所有设备及线路构成一个系统，并规定了设备最高电压，作为设备电气绝缘设计的依据。

电压等级为 3 ~ 500kV 的电力变压器设备最高电压：

3.5 6.9 11.5 17.5 40.5 69 126 252 363 550

某些特种变压器使用的额定电压还与他所带的负载的额定电压相匹配，另有规定。

1.2.2 额定容量

指变压器在铭牌规定的额定电压、额定电流下连续运行时能输送的容量，kVA 表示。

其计算公式如下：

单相电力变压器 $S_r = U_r I_r$

三相电力变压器 $S_r = 3 \cdot U_r I_r$

式中： U_r ——电力变压器二次侧的额定电压，kV。

I_r ——电力变压器二次侧的额定电流，A。

S_r ——额定容量（视在功率），kVA。

国家标准规定我国变压器容量按 R10 系列组合，即按¹⁰ 10=1.2589256... 1.26 倍递增：10 20 30 40 50 63 80 100 125 160 200 315 400 500 630 800 1000 ... 等。

1.2.3 额定电流

指变压器在额定电压、额定容量下允许长期通过的电流（额定电流，指线电流）。其计算公式如下：

单相电力变压器 $I_r = S_r / U_r$

三相电力变压器

$$I_r = S_r / \sqrt{3} \cdot U_r$$

1.2.4 阻抗电压 U_k

阻抗电压曾经叫做短路电压、断路阻抗。把变压器二次绕组短路，在一次绕组上慢慢地升高电压，当二次绕组的短路电流等于额定值时，此时在一次侧所施加的电压 U_{kI} ，叫做阻抗电压。通常以阻抗电压 U_k 的百分值表示：

$$U_k \% = (U_{kI} / U_{rI}) 100\%$$

他是变压器的重要参数之一，对变压器并联运行、故障短路电流、动、热稳定性、端电压变化率等运行性能起重大影响、作用。

1.2.5 负载损耗 P_k

把变压器二次绕组短路，在一次绕组额定分接头位置上通入额定频率的额定电压，此时变压器所消耗的功率 P_k 称为负载损耗。它包括两部分：

- (1) 直流电阻损耗 ($I^2 R_0$)，取决于绕组的直流电阻值。
- (2) 附加损耗，是由于漏磁在绕组中造成的涡流、环流引起的损耗和在金属结构件中产生的杂散损耗之和。

1.2.6 空载电流 I_0

当变压器二次侧空载（开路）时，在额定电压、额定频率下，一次绕组中通过的电流 I_0 称为空载电流。因为空载电流仅起励磁作用，所以又称为励磁电流，一般以额定电流的百分数表示，即

$$I_0 \% = (I_0 / I_{rI}) 100\%$$

式中： I_0 ——空载电流，A。（ I_0 %称为空载电流百分数）

I_{rI} ——一次额定电流，A。

1.2.7 空载损耗 P_0

变压器在空载状态下所消耗的有功功率，即空载电流的有功分量

所吸取的有功功率。

1.2.8 频率 f

变压器的工作频率,对于电力系统而言各个国家和电力公司的频率有所不同,我国和欧洲大陆国家为 50Hz,英、美、日本、朝韩等使用 60Hz。

1.2.9 相数

通常分为三相、单相两种变压器。特大型变压器受运输的限制,往往做成单相变压器,从怎加倍用变压器来说,单相涉及经济,但从一台三相变压器和三台单相变压器比较,则三相变压器更为经济。

1.3 变压器铭牌

国家标准 GB/T 1094.1—1996《电力变压器 第一部分 总则》对铭牌必须标注的项目作了详细的规定。

作业:

- 1) 查阅 GB/T 1094.1—1996《电力变压器 第一部分 总则》。
- 2) 到车间或展示厅看一下具体的铭牌,记下它的项目,与标准对比一下。

1.4 变压器型号

按 JB/T 3837—1996《变压器类产品型号编制方法》的规定,变压器型号采用汉语拼音大写字母(采用代表对象第一个、第二个汉字或某一个汉字的第一个拼音字母,必要时,也可采用其他的拼音字母)

或其他合适字母来表示产品的主要特征 ,用阿拉伯数字表示产品性能水平代号或设计代号和规格代号。

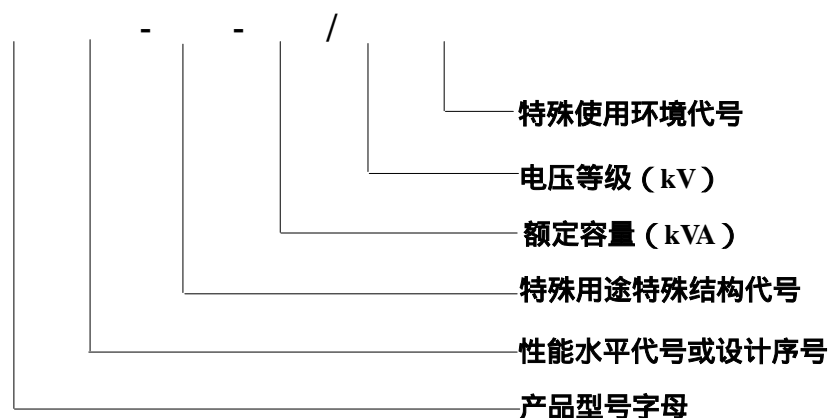


图 1-5 电力变压器产品型号组成

电力变压器产品型号可由多个字母组成，排列次序如下：

1. 线圈耦合方式—— 一般不标，O 自耦
2. 相数—— D 单相，S 三相
3. 冷却方式—— 油浸自冷不标，F 油浸风冷，S 油浸水冷
4. 循环方式—— 自然循环不标，P 强迫循环
5. 绕组数—— 双绕组不标，S 三绕组，F 双分裂
6. 导线材质—— 铜线不标，铝线用 L
7. 调压方式—— 无励磁不标，Z 为有载
8. 产品的设计序号或性能代号
9. 额定容量 (kVA)
10. 高压绕组的电压等级 (kV)
11. 防护代号，TH---湿热，TA---干热

例：OSFPSZ-----25000/220

自耦三相强迫风冷三绕组铜线有载调压额定容量为 25000kVA 的高压绕组电压等级为 220kV 的电力变压器。

特种变压器产品型号：

HSJ：三相油浸电弧钢炉用变压器
PDJ：单相油浸工频感应炉用变压器
DDG：单相干式低电压大电流变压器
ZSG：三相干式整流变压器
TDJY：单相油浸移圈调压器
TDGC：单相干式接触调压器
SO：三相自耦调压器
DGS：船用变压器
SG：三相干式变压器
KL：矿用变压器

作业

1) 阅读 JB/T 3837—1996 《变压器类产品型号编制方法》。

2) 说明下列产品型号的意义：

SG10-630/10, SG(H)B10-800/20, SCB2000/20, SCRBH-500/10, KBSG2-T-1250/6,
SRN(F)-M-125/10, S11-M·D-800/10, SFZ11-31500/110。

1.5 变压器使用条件

国家标准 GB/T1094.1—1996 《电力变压器 第一部分 总则》

(等同于 IEC76-1—1993) 规定：

1.5.1 正常使用条件

a. 海拔

海拔不超过 1000m。

b. 环境温度和冷却介质温度

最高气温 +40 ；

最热月平均温度 +30 ；

最高年平均温度 +20 ；

最低气温 -25 (适用于户外式变压器)；

最低气温 -5 (适用于户内式变压器)；

水冷却器入水口处的冷却水最高温度 $+25$ 。

c. 电源电压的波形

电源电压的波形近似于正弦波。

(畸变波形中谐波总含量不超过大于 5%，欧次谐波含量不大于 1%。)

d. 三相电源电压对称

对于三相变压器，其三项电源电压应大致对称。

e. 安装环境

安装环境无明显污秽（变压器套管或变压器的外绝缘不需作特殊的考虑。

地震引发的地面加速度 a_g : 水平方向低于 3m/s^2 (IEC 规定地面加速度低于 2m/s^2); 垂直方向低于 1.5m/s^2 (设计中不需特殊考虑此限度内的地震问题)。

1.5.2 特殊使用条件

特殊使用条件下，变压器的额定值核试验值另有规定：

a. 在较高环境温度或高海拔环境下的温升和冷却：油浸式变压器按 GB/T 1094.2 的规定；干式变压器按 GB/T 6450 的规定。

b. 在高海拔环境下的外绝缘：油浸式变压器按 GB/T 1094.3 和 GB 10237 的规定；干式变压器按 GB6450 的规定。

思考题：

1. 全球气温变暖对变压器设计有什么影响？有什么对策？
2. 地震时变压器什么部位最薄弱？如何解决？

I 学习目的

1. 通过运行分析的学习，了解副边电压的大小和相位随负载变动的情况。
2. 分析变压器中能量传递的规律及变压器的损耗和效率。

I 学习方法

把电磁基本规律应用到变压器的电路和磁路中去，确定变压器的电压电势，电流，磁势，磁通和磁路中的阻抗应满足的关系。

复 习

I 基尔霍夫定律

定义：

1. 支路——电路中每个分支叫支路
2. 节点——三个或三个以上支路汇交的点
3. 回路——电路中任意一个闭合的路径为回路

第一定律

对任一节点来说，流入（或流出）该节点的代数和等于零，这就是基尔霍夫第一定律。

第二定律

在电路的任何闭合回路中，各段电压的代数和等于零。这就是基尔霍夫定律。在电路任何回路中，其各个电阻上电压的代数和等于各个电势的代数和，这是第二定律的另一种表达式。

运用第二定律解题时，常用 $\sum IR = \sum E$ ，公式中电压和电势正负确定方法：

1. 首先选定各支路电流的正方向；
2. 任意选定沿回路的绕行方向；
3. 若通过电阻的电流方向与绕行方向一致，则该电阻上的电压为正，反之取负。
4. 电动势的方向与绕行方向一致时取正，反之取负。

I 单相正弦交流电路

凡是大小和方向都随时间而变化的电压和电流称交流电压和交流电流，工程上所用的交流电基波波形是按正弦规律变化，称正弦交流电。

特点：

1. 变化平滑，同频率的几个正弦量相加或相减，其结果仍是同频率的正弦量。
2. 非正弦的周期性交流电，还可以分为许多不同频率的正弦分量。

参数：

1. 瞬时值：交流电在某一时刻的大小称为交流电的瞬时值。 (u, e, i)
2. 最大值：最大的瞬时值称为最大值，最大值也叫振幅、幅值或峰值。 (E_m, U_m, I_m)
3. 周期：交流电每循环一次所需要的时间，用 T 表示，单位为秒，周期的长短表示这个交流电变化的快慢。

4.频率：交流电在 1 秒钟内变化的循环次数（即 1 秒钟内的周期数）。

5.角频率

电势瞬时值 $e = E_m \sin t$ ，式中 ω 为角频率或角速度，单位：弧度/秒，表示交流电每秒钟内变化的角（弧）度， $\omega = 2\pi f$ 。

6.相位和初相角

$$e_1 = E_{1m} \sin(\omega t + \phi_1), e_2 = E_{2m} \sin(\omega t + \phi_2)$$

$t = 0$ 时的相位叫初相位或初相角，用不大于 180 度的角表示。

正弦交流电的表示方法：

1.矢量图, 2.复数表示方法, 3.解析式, 4.曲线图

1. 矢量图----按初相和最大值作矢量，这样作出的图为矢量图。

作图注意：在同一矢量图上，相同单位的矢要用相同的比例。

优点：1、正弦量相同时比解析式，曲线式简单。

2、矢量直接相加单。

2. 复数表示法

复数： $A = A + jA$ （复数通常以在字母上面加一复数点表示，这里用黑体字表示。）

向量乘以“+j”就等于此向量，逆时针旋转 90 度，即幅角增加 90 度。

向量乘以“-j”就等于此向量，顺时针转过 90 度，即幅角减小 90 度。

1 纯电阻电路

既没有电感也没有电容，只包含线性电阻电路，在纯电阻电路中电压和电流是同相位的。设电压的初相角为零， $u = U_m \sin \omega t$ ，流过电阻上电流 $I = U/R = (U_m / R) \sin \omega t$ 。

1 纯电感电路

由电阻很小的电感线圈组成的交流电路，可近似看成纯电感线路，纯电感线路中，电压（电感）超前电流 90 度。在纯电感线圈两端加上交流电压 U_L ，线圈中要产生一个交流电流，由于这个电流是变化的，因此线圈上就产生自感电动势来反抗电流变化，线圈中电流变化要落后于线圈两端电压的变化， U_L 和 i 之间有相位差。

$$U_L = L di/dt = L dI_m \sin \omega t / dt = I_m \omega L \sin(\omega t + \pi/2)$$

1 纯电容电路

由介质损耗很小，绝缘电阻很大的电容器组成的交流电路可近似看成是纯电容电路。在纯电容电路中，电容器两端的电压随着电荷的积累而升高，随着电荷的释放而降低，由于电荷的积累和释放需要一定的时间，所以说电容器两端的电压变化滞后于电流变化，电

流超前于电压 90 度。

结论：1、 $U_L > U_C$ ，电压超前电流，相角 >0 度，电路呈感性。

2、 $U_L < U_C$ ，电压滞后于电流，相角 <0 度，电路呈感性。

3、 $U_L = U_C$ ，电压与电流同相位，发生串联谐振。

1 磁路

磁性：把能吸引铁、镍、钴等物质的性质称为磁性。

磁体：具有磁性的物质叫磁体。

磁化：使原来不带磁性的物质使其具有磁性的过程。

磁通：通过与磁场方向垂直的某一面积上磁力线的总数。

磁感应强度：垂直通过单位面积上磁力线的数目。

1. 磁路欧姆定律

设励磁线圈的匝数为 N ，线圈中流过的电流为 I ，铁心的截面为 S ，磁路的平均长度为 L ，则磁场强度：

$$H = NI / L$$

NI ：相当于电路中的电动势，是产生磁通的磁源，称为磁（通）势，等于线圈的匝数和电流的乘积，电流越大，磁势越强。各参数的基本关系如下：

$$H = NI / L \quad = BS \quad B = \mu H \quad = \mu HS \quad \text{磁路的磁阻 } R_m = L / \mu S$$

磁阻与磁路的平均长度成正比，与铁心的截面和导磁率的乘积成反比，当铁心的几何尺寸一定时，磁导率越大， R_m 越小。

磁路参数与电路参数的对应关系

磁通势	NI	电动势	E
磁通		电流	I
磁导率	μ	电阻率	
磁阻	R_m	电阻	R
	$= NI / R_m$		$I = E / R$

2 电磁感应：由于磁通变化，而在导体中或线圈中产生感生电动势的现象称电磁感应。由电磁感应产生的电动势叫感应电动势。由感应电势引起的电流叫感应电流。而产生电磁感应的条件是磁通量必须发生变化。

3 电磁感应定律：线圈中感应电动势的大小与穿越同一线圈的磁通量的变化率成正比。

第二章 变压器的空载运行

在原边（一次侧）加上额定频率 f 的额定电压，副边（二次侧）开路的情况下，原边就有电流流过，这个电流叫空载电流。用 I_0 表示，这时变压器铁心中就产生磁通，并在副边绕组端点产生电压，这种运行状态为变压器的空载运行。特点：空载运行时副边电压与原边电压有一定的比例关系。原、副边电压之等于它们的匝数之比，叫做变比。

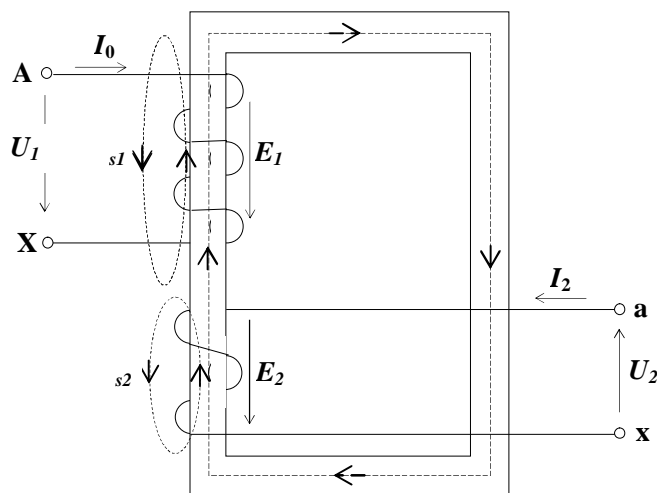


图 2-1 变压器的空载情况

变压器空载情况如图 2-1 所示：AX 是原绕组，ax 是副绕组，AX 接到交流电源运行，各个电磁量都以电源频率交变，虽然各量幅值不变，但它的瞬时值不仅大小而且连方向都随时间变化。

2.1 正方向的规定

原绕组：

- 1、定 U_1 的方向，当 U_1 是正值时 A 点电位高于 X 点电位；
- 2、定 I_1 的方向，当 I_1 是正值时，电流从高电位流入（电动机惯例），空载时 $I_1 = I_0$ 。
- 3、根据右手定则，定磁通的方向。
- 4、定 E_1 的方向，习惯上往往标 E_1 和 I_1 同相。

副绕组：

- 1、根据磁通和电势的方向，应用右手定则，因为副边绕组的绕法同原边的绕法相同，所以 E_2 的正方向和 E_1 的一样，正电流产生正电势，正的磁势产生正的磁通。
- 2、第二步正电势产生正电流 I_2 ，正电流产生正磁通，于是 I_2 的正方向规定如图所示。
- 3、第三步定 U_2 的方向，要求电流 I_2 自高电位流出（发电机惯例），空载时 $I_2 = 0$ ， $s_2 = 0$ 。

2.2 电压、电势、和励磁电流

主磁通：把链接着原副边绕组的磁通称主磁通

路径：沿铁心磁材料形成闭合回路

漏磁通：只链自身绕组，不链另一绕组的磁通

路径：除走铁磁材料外，还走非铁磁材料形成闭合回路。

注意：主磁通、漏磁通都随时间作正弦变化，分析时可把主漏磁通以及磁势都作为时间量。

磁势电流、励磁磁势：变压器空载运行时，磁通是由原边电流产生的磁势产生的，这时把原边的电流叫励磁电流，磁势称为励磁磁势。按正弦规律变化的励磁电流产生的磁势也是按正弦规律变化：

$$F_0 = I_0 * w_1,$$

主磁通 与 F_0 的关系是非线性的，

$$= m * \sin t,$$

$$e_1 = -w_1 * d / dt$$

$$= -w_1 m \cos t = w_1 m \sin(t - \pi/2)$$

$$= E_{m1} \sin(t - \pi/2),$$

如用向量表示，则电势有效值为：

$$E = j (w_1 / \sqrt{2}) m,$$

其数值为：

$$E_1 = (w_1^* / 2) \dot{m} = (2 f / 2) w_1 \dot{m} = 4.44 f w_1 \dot{m}$$

同理，

$$\begin{aligned} e_2 &= -w_2^* \dot{d} / dt \\ &= -w_2 \dot{m} \cos t = w_2 \dot{m} \sin(t - /2) \\ &= E_{m2} \sin(t - /2) \end{aligned}$$

如用向量以有效值表示，则副边电势有效值为：

$$E_2 = j (w_2 / 2) \dot{m}$$

其数值为：

$$E_2 = (w_2^* / 2) \dot{m} = (2 f / 2) w_2 \dot{m} = 4.44 f w_2 \dot{m}$$

小结：

在原边： $U_1 = -E_1$ ；

在副边： $U_2 = E_2$ 。

变比：变压器空载运行时原、副边电压之比或匝数之比（从上面公式可直接导出）：

$$k_{12} = U_1 / U_2 = E_1 / E_2 = w_1 / w_2$$

2.3 绕阻电阻和漏磁通的影响

原边绕阻电阻为 r_1 ，当 I_0 流过时产生压降 $I_0 r_1$ ，漏磁通 ϕ_{s1} ，当 I_0 变化时， ϕ_{s1} 也随时间按正弦规律变化，也将感应出漏电势 E_{s1} ， ϕ_{s1} 、 E_{s1} 正方向的确定与 ϕ_m 、 E_1 是一致的。

$$\phi_{s1} = \phi_{s1m} \sin t, \quad \phi_{s2} = 0$$

$$e_{s1} = -w_1 \dot{\phi}_{s1m} \cos t = w_1 \dot{\phi}_{s1m} (t - /2) \quad E_{s1} = j(w_1^* / 2) \dot{\phi}_{s1}$$

漏磁通感应的电势可用电抗压降来表示，用原绕组单位电流产生的漏磁链数，漏电感系数表示：

$$L_{s1} = (w_1^* \phi_{s1}) / I_0 \quad E_{s1} = j L_{s1} I_0$$

$$E_{s1} = j(w_1^* / 2) \dot{\phi}_{s1} = j (w_1 \phi_{s1}) / 2 = j L_{s1} I_0$$

$$x_1 = L_{s1} \quad E_{s1} = j x_1 I_0$$

1. 漏磁通的漏电抗， x_1 是个常数，不随电流的变化而变化，漏磁通的大小总与产生它的磁势即原绕组的安匝数 $I_0 w_1$ 成正比，没有饱和现象。

2. 因为 L_{s1} 与漏磁通回路的磁导成正比，在漏磁通的回路中总有一段空气或油，由于后者的磁阻大，几乎消耗了磁路中的全部磁势，而它的导磁率 μ_0 又是一个常数，因此， ϕ_{s1} 磁路的磁导是一个恒定值， x_1 就是一个常数。

当变压器空载运行时，参照图 2-1，可以写出原边电势平衡方程：

$$U_1 = -E_1 - E_{s1} + I_0 r_1 = -E_1 + I_0 z_1,$$

$$z_1 = r_1 + jx_1,$$

式中： z_1 是原绕组的漏电抗。

2.3 铁心饱和的影响

变压器铁心里主磁通 m 与励磁磁势的关系具有饱和性，设计变压器时，为了使铁心得充分利用，额定运行点的磁通最大值往往安排在铁心饱和段 B 点。

磁化曲线：铁磁物质从完全无磁状态进行磁化的过程中，磁感应强度按一定规律随着外磁场的变化而变化。磁感应强度 B 随磁场强度 H 变化的函数关系做出的曲线为磁化曲线，也叫 B-H 曲线。

磁化原因：铁磁材料能够被磁化的原因是因为铁磁物质是由许多被称磁畴的磁性小区域所组成，每一个磁畴相当于一个小磁体，在无外磁场作用时，磁畴排列杂乱无章，这些小磁畴所具有的磁性相互抵消，对外不显磁性，只有在外磁场作用下，这些磁畴完全转向，形成附加磁场，使原磁场增强。

磁化过程：OA: 曲线上升缓慢，时间较短

AB: 随着 H 的增加，B 几乎直线上升

BC: 随着 H 的增加，B 增加缓慢，形成膝部

C: 随着 H 的增加，B 几乎不再增加，称为饱和段

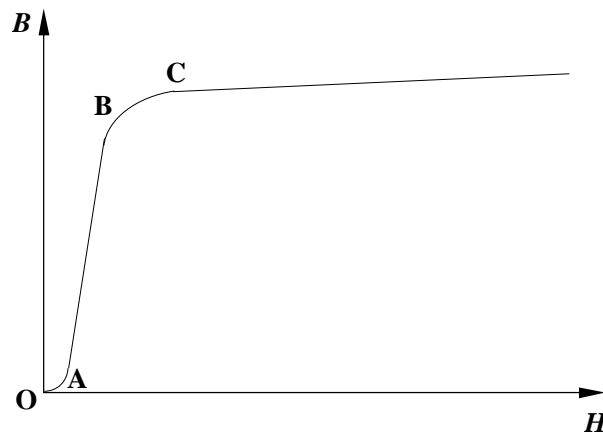


图 2-2 电工钢的磁化特性曲线

原因：OA 由于磁畴的惯性，随着 H 的增加， B 不能立即上升，因而曲线较平缓，称起始磁化阶段。

AB 由于磁畴在较强的外磁场作用下都趋向 H 方向，因而 B 增加很快，曲线较陡，称为线性段。

BC: 由于大部分磁畴已经转向，随着 H 增加，只有少数磁畴继续转向 H 方向，因而 B 增加较慢，曲线缓慢形成膝部。

C 点以后: 由于磁畴几乎全部转向 H 方向，随着 H 增加几乎不变。曲线更平缓，称饱和段。因此， I_0 和 B 不是线性关系。

电力变压器空载运行时，原边电压 $U_1 = -E_1$ ，如果电网电压是正弦的，则原绕组的电势 e_1 也是正弦的，感生这个电势的铁心主磁通 Φ 随时间也按正弦变化，产生这个磁通的励磁电流 i_0 是一个尖顶波形，经谐波分析， i_0 除包含基本波形 i_{01} 外，还有稍强的三次谐波，以及较弱的其它高次谐波，所有这些高次谐波电流的数值都不大，对变压器的运行不起多大的作用，可忽略不计，向量图中的 I_0 是 i_0 的等效正弦波向量，因为在空载试验时测得的 I_0 是 i_0 的有效值，它包含了 i_{01} 和 i_{03} 的电流的有效值，在向量图上所示的 I_0 值是 i_0 的有效值。

磁滞回线：铁磁物质在反复磁化的过程中， B 的变化总滞后于 H 的变化，称磁滞现象。铁心的磁滞现象使得励磁电流超前一个小角度，铁心的涡流现象使得这个角度扩大了。考虑了铁心损耗后， I_0 领先 θ 一个角度， I_0 落后于 $-E_1$ 一个角度，这时除了从电源吸取无功功率外还吸取正的有功功率供给铁心损耗，励磁电流的两个分量：

$$I_{0a} \text{ —— 有功分量} \quad I_{0a} = I_0 \cos \theta$$

$$I_{0r} \text{ —— 无功分量} \quad I_{0r} = I_0 \sin \theta$$

作业

试画励磁电流波形图（要考虑铁心饱和的作用）。

2-4 变压器的空载运行及向量图

上面我们已经得到变压器空载运行是原边的电势平衡公式，和副边电压与电势的关系：

$$U_1 = -E_1 + I_0 (r_1 + jx_1)$$

$$U_2 = E_2$$

$$E_1 = -j \left(\frac{w_1}{2} \right) \dot{m}$$

$$E_2 = -j (w_2 / 2) m$$

作业

按上面的公式画出变压器的空载向量图（应包括 U_1 、 U_2 、 E_1 、 E_2 、 I_0 、 I_{0a} 、 I_{0r} 等变量）。

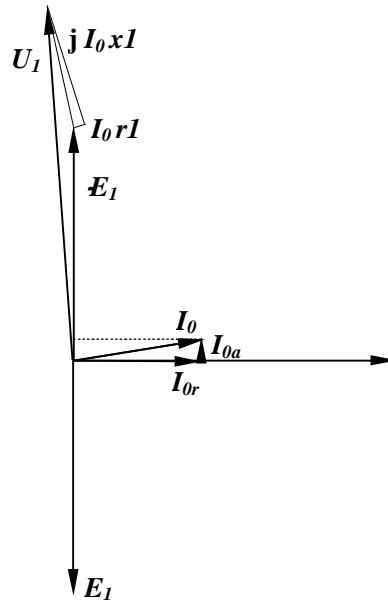


图 2-3 变压器空载时的向量图

2-5 变压器空载时的等值电路

jI_0x_1 表示漏磁通感应的电势 ($-E_{s1}$)，引出漏电抗 x_1 ，是否能把主磁通感应的电势也用电压降表示，引出励磁电流。

分析：1、主磁通有饱和性，与 i_0 波形不一致，不是线性关系。

2、 i_0 尖顶波形，可用等效正弦波向量表示，如果变压器工作在恒定电压的电网上，就在磁饱和点 B。

从向量图中，励磁电流的有功分量 I_{0a} 与 ($-E_1$) 同相(同向) (思考：为什么是同向的?) 可把 ($-E_1$) 看成是流过一个电阻元件上产生的压降。

$$-E_1 = I_{0a} / g_0$$

$$I_{0a} = (-E_1) g_0$$

式中： g_0 ——电导，是电阻的倒数。

励磁电流的无功分量 I_{0r} 滞后于 $(-E_1)$ 90 度，可把 $(-E_1)$ 看成是 I_{0r} 流过一个电感元件上产生的压降， $-E_1 = jI_{0r} / b_0$ ，

式中： b_0 ——电导，是电抗的倒数。

由上式 $-E_1 = jI_{0r} / b_0$ 可得：

$$jI_{0r} = -E_1 b_0,$$

$$I_{0r} = -E_1 b_0 (-j) = E_1 j b_0$$

$$I_0 = I_{0a} + I_{0r} = -E_1 g_0 + E_1 j b_0 = -E_1 (g_0 - j b_0),$$

所以

$$-E_1 = I_0 / (g_0 - j b_0).$$

而 $(g_0 - j b_0)(g_0 + j b_0) = (g_0^2 + b_0^2)$ ，则 $(g_0 - j b_0) = (g_0^2 + b_0^2) / (g_0 + j b_0)$ ，代入上式得：

$$-E_1 = I_0 (g_0 + j b_0) / (g_0^2 + b_0^2)$$

$$U_1 = -E_1 + I_0 (r_1 + j x_1) = I_0 (g_0 + j b_0) / (g_0^2 + b_0^2) + I_0 (r_1 + j x_1),$$

$$= I_0 [g_0 / (g_0^2 + b_0^2) + j b_0 / (g_0^2 + b_0^2)] + I_0 (r_1 + j x_1)$$

令： $r_m = g_0 / (g_0^2 + b_0^2)$ ； $x_m = b_0 / (g_0^2 + b_0^2)$ ； $z_m = r_m + j x_m$ ； $\phi = \arctg x_m / r_m$

式中： r_m ——励磁电阻； x_m ——励磁电抗； z_m ——励磁回路的等值阻抗。

则

$$U_1 = I_0 (r_m + j x_m) + I_0 (r_1 + j x_1)$$

$$= I_0 z_m + I_0 z_1$$

$$= I_0 (z_1 + z_m)$$

$$-E_1 = I_0 (g_0 + j b_0) / (g_0^2 + b_0^2) = I_0 (r_m + j x_m) = I_0 z_m$$

注意： x_m 作为一个常数是有条件的，如果变压器一直运行在额定的电压电网上，这不成为问题，若它不运行在额定电网上， x_m 的数值就需要相应改变，如果运行的电压降低了，处在磁化曲线的不饱和区， x_m 的数值是增大，反之 x_m 的数值减小。

在数值上 z_m 要比 z_1 大得多，这是由于在额定电压下的铁损比空载时铜损耗大得多，而主磁通比漏磁通大得多的缘故。

z_m 较大， I_0 较小是电力变压器的要求，在合理的设计中， I_0 对 I_n 的比值不应太大， I_0 / I_n 大说明空载时就有较大的电流对变压器的运行不利，同时还增加电网的无功负担，对电网不利。

结论：

1、铁心内的主磁通主要决定于外加电源电压和频率，而与磁路

的材料、尺寸、性质等因素无关。

2、磁路的材料，性质、尺寸、等只决定产生磁通 所需要的空载电流，如果磁路是由很好的磁性材料构成，则励磁电流很小，反之增大。

3、当外加的电压是正弦波时，感应电势和主磁通的波形也基本是正弦的，空载电流在不计铁损和磁路不饱和时，波形也基本上是正弦的，并与 同相，计入铁损及磁路饱和后，空载电流波形变成尖顶波，空载电流不再与 同相而超前一个角度。

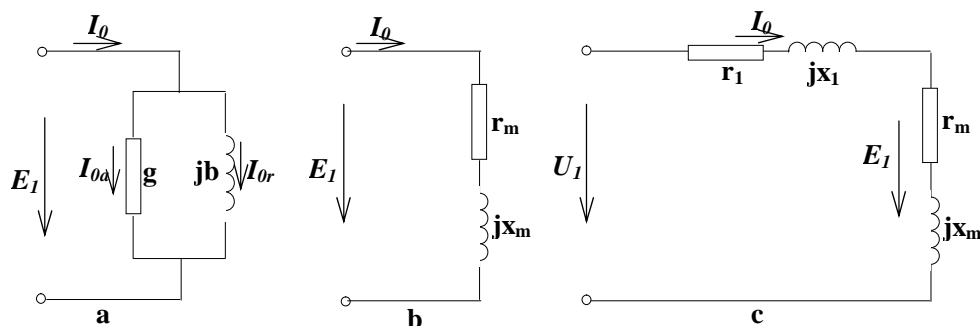


图 2-4 变压器空载时的等值电路

第三章 变压器的运行分析

当变压器的一次绕组接到交流电源上,而二次绕组的出线端接上负载时,二次绕组内就有电流流过,这样变压器就进入了负载运行状态。

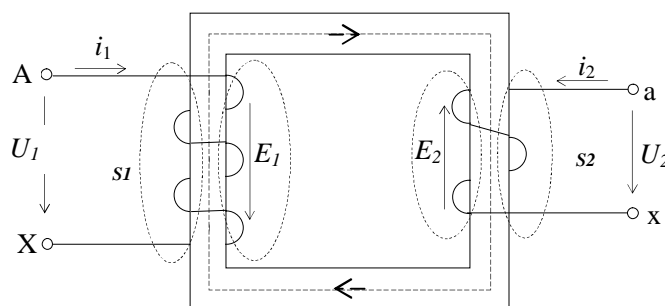


图 3-1 变压器的电磁关系

特点：

1.当副边接上负载后,变压器就能输出电流,与此同时,变压器原边的输入电流也相应增大。

2.负载运行时,副边电压与空载时有所不同,副边电压变化的大小决定于负载的大小、性质和变压器本身的特性,额定负载时变压器副边电压变化的数值是变压器的一个重要的性能。

3.损耗,变压器内部有损耗,变压器的输入功率总是大于输出功率,输出功率 / 输入功率 = 变压器效率,它随负载的变化而变化。

3.1 变压器负载运行时电压和电流各种关系的分析

原绕组加上交流电压 U_1 时,原绕组里就有交流电流 I_1 流过,原

绕组就将产生一个交流磁势 F ，这个磁势就会在铁心中产生一个磁通，磁通也是交变的，所以它将在原，副边绕组中感应电势，当副边接上负载时，在 E_2 的作用下负载中将有电流 I_2 流过，这就是变压器将电能从原边传递到副边的工作过程。

变压器作用：不仅在于实现能量从原边传递到副边，而是通过传递过程实现改变电压和电流。

3.1.1 副边电压和电流的关系

空载运行：原边电流 I_0 ，副边电流 $I_2 = 0$ ， $U_2 = E_2$

负载运行：原边电流 I_1 ，副边电流 I_2 不等于零， U_2 不等于 E_2 ，出线端接上负载 $z_L = r_L + jx_L$

$$U_2 = I_2 z_L$$

副边绕组的绕线电阻为 r_2 ，电流流过 r_2 时产生压降 $I_2 r_2$ ，在副边绕组中也有漏磁通 s_2 ，是交变的，也将在副绕组中感应电势。

$$s_2 = s_{2m} \sin t \quad E_{s2} = j \quad s_2 w_2 / 2$$

副绕组漏磁通感应的电势用电抗压降表示，副绕组单位电流产生的漏磁链为漏电感系数：

$$L_{s2} = w_2 \quad s_2 / 2 I_2 \quad , \quad \text{漏电抗 } x_2 = j \quad L_{s2} \quad ,$$

$$U_2 = E_2 - I_2 z_2 \quad , \quad z_2 = r_2 + jx_2$$

3.1.2 原、副边电流的关系

分析：副边绕组中有电流 I_2 流过，就会在副边绕组中产生磁势 $F_2 = I_2 w_2$ ，这个磁势作用在铁心中它会影响铁心中的主磁通 m 。铁心中的磁通是由原副两边电流共同造成的，这就是全电流定律。

主磁通 m 既链原绕组又链副绕组，产生 m 的磁势必定是链着它的全部电流，换句话说，主磁通 m 是由 $F_1 + F_2 = I_1 w_1 + I_2 w_2$ 合成磁势产生的， $F_1 + F_2$ 多大，由 m 确定。

空载运行： m 是由 U_1 确定的。

负载运行： U_1 不变， $m = ?$ ， m 的大小和空载时大小有差别，但差别不大，近似用空载运行时产生主磁通的磁势 F_0 来表示变压器负载运行时需要的合成磁势 $F_1 + F_2 = F_0$ 。

负载运行时副边有电流 I_2 ，产生磁势 $F_2 = I_2 w_2$ ， I_2 增大， $I_2 w_2$ 也增大，原边的磁势也

相应增加 $F_1 = F_0 + (-F_2) = F_0 + (-I_2 w_2)$ 。原边磁势由两部分组成，一部分是 F_0 ，另外一部分是 $-I_2 w_2$ 与副边磁势大小相等，方向相反。 $F_1 = I_0 w_1 + (-I_2 w_2)$ ， $I_1 = I_0 + (-I_2 w_2 / w_1)$ 。原边电流 I_1 分为两部分，一部分是产生主磁通 Φ_m 的励磁电流，另一部分是平衡副边磁势所需要的电流，即供应副边负载功率的原边电流中的负载分量。 $I_1 = I_0 + I_L$ ， $I_L = -I_2 w_2 / w_1$ 。

原边电压、电流关系

$$\text{空载：} U_1 = -E_1 + I_0 z_1$$

$$\text{负载：} U_1 = -E_1 + I_1 z_1$$

空载运行与负载运行在大小上要发生变化，这个变化很小，因为 $I_1 z_1$ 值很小，向量相减后， E_1 实际上仍和 U_1 差不多，因此说主磁通与空载时相差不多，要求的励磁磁势与励磁电流与空载时也差不多。

3.1.3 负载运行时各量的综合关系

$$U_1 = -E_1 + I_1 (r_1 + jx_1) ,$$

$$U_2 = E_2 - I_2 (r_2 + jx_2)$$

$$I_1 = I_0 + (-I_2 / k_{12}) , I_1 + I_2 / k_{12} = I_0 ,$$

$$I_0 = I_1 + I_2 / k_{12}$$

$$I_0 = -E_1 / z_m$$

$$U_2 = I_2 z_L$$

$$k_{12} = E_1 / E_2$$

3.2 折合算法

- 1、用上述方程组求解较复杂，主要是由于原副绕组匝数不同，公式中出现系数 k_{12} 。
- 2、由于变比 k_{12} 较大，使原边和副边电压、电流数量级相差大，计算时带来不便，特别是在画向量图时比较困难。
- 3、不能得到从原边看去，整台变压器的等值电路图。

分析：原、副绕组之间没有电的联系，只有磁的联系。 $I_1 w_1 + I_2 w_2 = I_0 w_1$ ，副边的电流 I_2 通过它的磁势影响原边的电流。

如果把 w_2 副边的电流换成另外的匝数和电流值，保证磁势不变，那么从原边看去，效果完全一样，仍将有同样的电流和功率从电网输入，并有同样的功率送给副边，磁通是

由合成磁势产生的，维持合成磁势不变，工作点不变。

要保持副边的磁势 F_2 不变并不限制副边匝数必须是 w_2 ，副边绕组可以换成任何匝数，为了消除变比 k_{12} 给计算带来麻烦，把副边绕组换成匝数为 w_1 ，用等值的副绕组去分析就不会出现变比 k_{12} 了。从原边看过去这两台变压器是等值的。

折合条件：等值的副绕组必须能产生同样的 F_2 ，这是折合的条件，要满足条件必须使它的电压、电流、阻抗、与实际的副绕阻的电压、电流、阻抗之间满足一定的关系。

分析方法：把实际的量折到等值绕阻上分折后，再把等值副边的量换回实际的副绕阻中去。

把折合的量打一撇： $E_2'、I_2'、U_2'$ ——是副边折合到原边的量。

1、电势的折算

因为电势和匝数成正比，所以电势的关系是：

$$E_2' / E_2 = w_1 / w_2$$

所以

$$E_2' = k_{12} E_2$$

2、电流的折算

我们希望这合国的变压器产生同样的 F_2 ，也就是要求电流有以下关系：

$$I_2' w_1 = I_2 w_2$$

所以

$$I_2' = I_2 / k_{12}$$

3、阻抗的折算

从电流和电势的关系可以找出阻抗的关系：

$$z_2' + z_L' = E_2' / I_2' = k_{12} E_2 / (I_2 / k_{12}) = k_{12}^2 E_2 / I_2 = k_{12}^2 (z_2 + z_L)$$

所以

$$z_2' + z_L' = k_{12}^2 (z_2 + z_L)$$

同理

$$r_2' = k_{12}^2 r_2$$

$$x_2' = k_{12}^2 x_2$$

$$z_L' = k_{12}^2 z_L$$

这就是折合过的变压器能够等值的条件。在这样的条件下副边端电压也有与电势同样的折合关系。

4、电压的折算

$$U_2' = E_2' - I_2' z_2' = k_{12} E_2 - (I_2 / k_{12}) (k_{12}^2 z_2) = k_{12} (E_2 - I_2 z_2) = k_{12} U_2$$

所以

$$U_2' = k_{12} U_2$$

5、折合后副边的铜损为 $I_2'^2 r_2' = (I_2 / k_{12})^2 (k_{12}^2 r_2) = I_2^2 r_2$ ，保持不变；

6、折合后副边输出功率 $I_2' U_2' \cos \varphi_2 = (I_2 / k_{12}) (k_{12} U_2) \cos \varphi_2 = I_2 U_2 \cos \varphi_2$, 保持不变。

原边向副边折算：

折算前： w_1 , w_2 , k_{12} ,

折算后： $w_1' = w_2$, w_2 , $k_{12}=1$, $E_1' = E_2$ —— $E_2 = 4.44 f w_2 m$

$$E_1' = E_1 / k_{12} , \quad I_1' = k_{12} I_1 , \quad I_0' = k_{12} I_0 , \quad z_m' = z_m / k_{12}^2$$

3.3 变压器运行方程组

用了折合算法后，原副边此时平衡关系称为：

$$F_1 + F_2 = I_1 w_1 + I_2' w_1 = I_0 w_1 ,$$

$$I_1 + I_2' = I_0$$

这样一来，原副边磁势平衡关系可以写成原副边电流平衡关系，匝数 w 已经消去。原边电流的两个分量为：

$$I_1 = I_0 + (I_2') = I_0 + I_L$$

其中 $I_L = -I_2'$, 即负载分量电流总与折合过后的副边电流相等相反。

原副边的电势关系为：

$$E_1 = E_2'$$

副边电势平衡关系仍然如旧：

$$U_2' = E_2' - I_2' z_2'$$

总结折合过的变压器中各关系的联立方程式如下：

$$U_1 = E_1 + I_1 (r_1 + jx_1) = -E_1 + I_1 z_1 ,$$

$$U_2' = E_2' - I_2' z_2'$$

$$E_1 = E_2'$$

$$I_1 + I_2' = I_0$$

$$I_0 = -E_1 / z_m$$

$$U_2' = I_2' z_L'$$

这些方程式中已经没有 k_{12} ，分析较简单，而且得出的原副边的电压或电流的数量级是一样的。更重要的是根据这些等式，可以找出变压器的等值电路。见图 2-4 所示。

3.4 变压器的等值电路图

按照 3.3 节得到的公式我们可以画出它的等值电路图 如下所示：

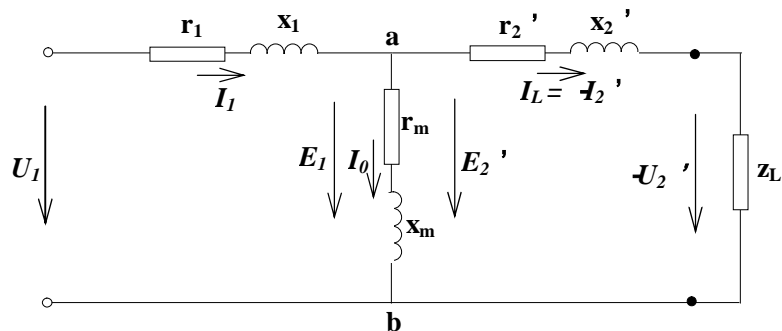


图 3-2 变压器的“T”形等值电路

这个等值电路和公式组是等效的，仅适用于稳态及对称的运行情况，其中向量 $E_1 = E_2'$ ，表示电路中 a 点到 b 点的电压升。 $E_1 I_L = E_2' I_2' = E_2 I_2$ 是原边通过电磁感应传送到副边的电磁功率 P_M ，它是体现变压器中原副边能量转换的枢纽，是有重要意义的。根据这些关系，分析等值电路，就可以得出变压器的运行性能。

“T”形等值电路含有串联、并联得支路，分析时较复杂。一般变压器中 $z_m \gg z_1$ ，因此，如果把励磁回路移到 z_1 的左边如图 2-6 所示，对 I_1 、 I_2' 、 E_1 不会引起多大误差，但分析时方便得多。

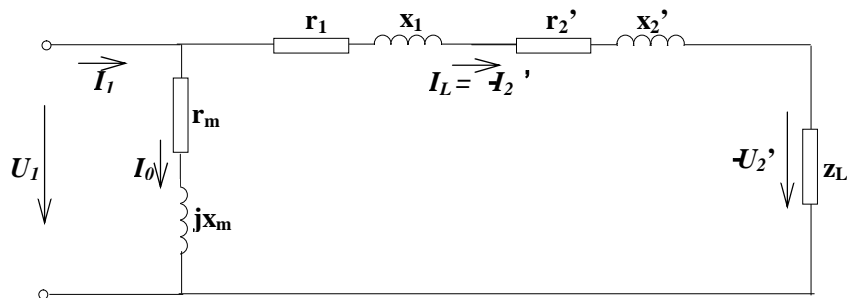


图 3-3 变压器的“π”形等值电路

在分析变压器负载时的许多问题时,例如电压变化或并联时的负荷分配等,是变压器的漏阻抗压降起主要作用,励磁电流是很小的,可以把 I_0 忽略,将等值电路进一步简化成如图 2-6 所示的一个串联阻抗。是变压器漏阻抗,包括原副两边的漏阻抗。

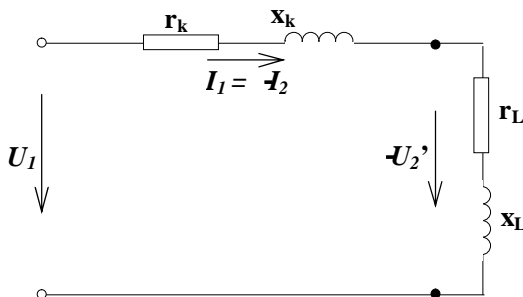


图 3-4 变压器的简化等值电路

图中

$$z_k = r_k + j x_k$$

$$r_k = r_1 + r_2' = r_1 + k_{12} r_2$$

$$x_k = x_1 + x_2' = x_1 + k_{12} x_2$$

漏阻抗 z_k 也较短路阻抗,它可用短路试验求出。

作业:画出折合到副边的等值电路,列出各参数之间的关系式。

3.5 负载时的向量图

作业：参考空载向量图的画法，画出负载时的向量图。

3.6 标么值

在电力工程的计算中，电压、电流、阻抗及其他各量的数值常常用标么值表示。

标么值：某一物理量的实际数值与选定的一个同单位的固定数值（基值）的比值。

基值的选定：在电机与变压器里都把额定值作为各物理量的基值。注意，基值的个数的选取不是任意的，应注意各基值之间的一定联系，当某几个物理量的基值确定后，其它几个物理量的基值也就确定了。

一般选额定电压和额定电流作为基值，例如当选定 10kV 为电压的基值时，则 9.5kV 的电压可以表示为 $9.5/10=0.95$ 标么值，有时也用百分值表示。在变压器的计算中阻抗从用标么值或百分制表示的。这种表示方法在实际应用中有很优点。阻抗标么值时这样选区的：当有变压器额定相电压上时，通过的电流等于变压器额定相电流，即：

$$\text{阻抗基值} \quad z_n = U_n / I_n , ()$$

因为原副边电压、电流的额定值不同，他们的阻抗基值也不同，显然他们相差 k_{12}^2 倍。

变压器漏阻抗的标么值（以下划线表示）是：

$$\text{漏电阻} \quad \underline{r}_k = r_k / z_n = r_k / (U_n / I_n) = I_n r_k / U_n$$

$$\text{漏电抗} \quad \underline{x}_k = x_k / z_n = I_n x_k / U_n$$

$$\text{漏阻抗} \quad \underline{z}_k = z_k / z_n = I_n z_k / U_n = U_{kn} / U_n$$

$$\text{显然} \quad \underline{z}_k = (\underline{r}_k^2 + \underline{x}_k^2)$$

由此可知，漏阻抗的标么值就等于变压器通入额定电流时的阻抗压降，对额定电压之比（ $I_n z_k / U_n$ ），也就是短路实验时加上额定电流时的短路电压与额定电压的比值（ U_{kn} / U_n ）。因此漏阻抗标么值也

可称为短路电压标么值。(也有的叫短路阻抗标么值)

用标么值表示各物理量的优点：

1. 便于比较

应用标么值表示时，便于比较变压器之间以及电机之间特性及参数大小，同类型的电机与变压器，尽管容量和电压等级差别很大，但用标么值表示的参数它的数值在一定的范围内变化，电力变压器的漏阻抗的标么值 $z_k = 0.044 \sim 0.14$ ，即各种容量的变压器，在额定电流下的漏阻抗压降与它自己的额定电压的比值差不多是一样的，从阻抗标么值的大小可粗略估计出变压器的运行情况：

容 量	额 定 电 压	Z_k
10----6300	6 ~ 10	0.044 ~ 0.055
50----31500	35	0.065 ~ 0.08
2500----12500	110	0.105
31500----125000	220	0.12 ~ 0.14

变压器的短路电抗与短路电阻它们取标么值后的比值，对各种容量的变压器来说有一定的范围：

容 量	x_k / r_k
5	1.1
50	1.8 ~ 2.2
560	3.3 ~ 3.7
5600	5.5 ~ 7.5
5600 以上	10

2. 数字变得简单了：从原边看的短路电压标么值与从副边看的短路电压标么值相等。

3. 使本来不相等的一些数值在一定条件下变得相等：漏阻抗标么值=短路电压标么值

4. 使用标么值可使一些公式简单

3.6 变压器的运行性能

3.6.1 变压器负载时副边端电压的变化

变压器空载运行时,原边接额定电压,副边开路,副边电压为 U_{20} ,这个电压为额定电压,带上负载后副边为 U_2 ,变压器由空载到负载副边电压的变化,用电压调整率 U 表示,它是变压器由空载到负载,副边电压差与副边的额定电压之比:

$$U = (U_{2n} - U_2) / U_{2n} = 1 - U_2 / U_{2n}$$

或
$$U = (U_{2n} - U_2) / U_{2n} \times 100\%$$

用向量图法可以导出:

$$U = (\frac{r_k}{U_{2n}} \cos \varphi_2 + \frac{x_k}{U_{2n}} \sin \varphi_2) + (\frac{I_2^2}{2U_{2n}})(\frac{x_k}{U_{2n}} \cos \varphi_2 - \frac{r_k}{U_{2n}} \sin \varphi_2)$$

式中: β ——负载系数

3.6.2 变压器的效率

变压器的效率:指变压器输出的有功功率与输入的有功功率的百分比

$$\text{效率} = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$$

式中: P_2 ——输出的有功功率

P_1 ——输入的有功功率

用这个公式不易计算准确,一般用计算变压器的损耗来确定它的效率。因为 $P_2 = P_1 - p$, 其中 p 是变压器的总损耗,所以可以写成:

$$\text{效率} = P_2 / P_1 = (P_1 - p) / P_1 = 1 - p / (P_2 + p)$$

其中 p 包括铁损和铜损:

$$p = p_{Fe} + p_{Cu}$$

1) 铁损:基本铁损——磁滞损耗、涡流损耗

附加铁损——漏磁通引起的、接缝损耗

2) 铜损:基本铜损——电流流过原副边绕组电阻产生的(直流)损耗

附加铜损——涡流损耗、不完全换位引起的环流损耗

计算效率的基本假设:

1、在额定电压下的空载损耗,作为铁损,并认为铁损不随负载而变;

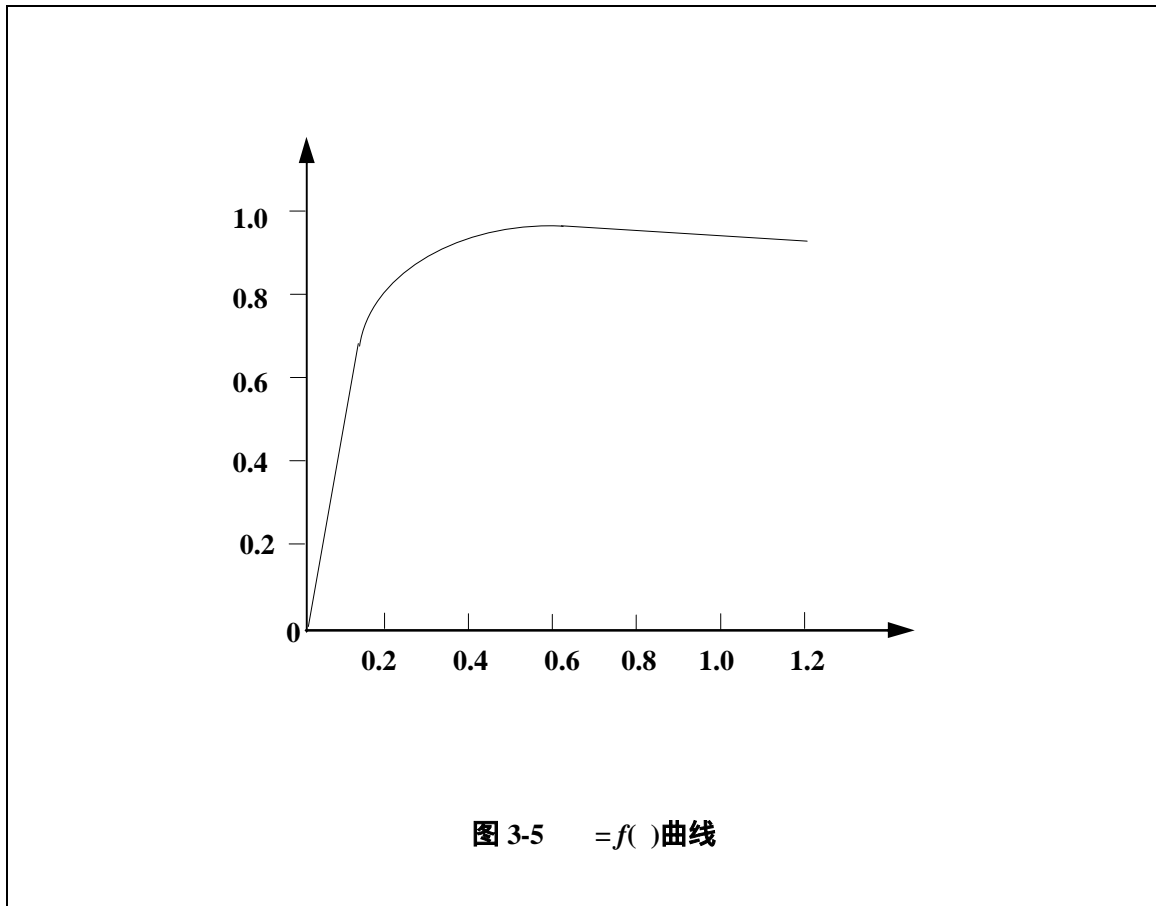
- 2、以额定电流时的短路损耗作为铜损并认为它与负载系数的平方成正比。
- 3、忽略在负载时副边电压变化，计算 P_2 适用下列公式，其中 m 为相数：

$$P_2 = mI_2U_{2n} \cos \varphi_2 = m(I_{2n})U_{2n} \cos \varphi_2 = P_{2n} \cos \varphi_2$$

$$= 1 - P/(P_2 - P) = 1 - (P_0 + I^2 P_{kn}) / (P_n \cos \varphi_2 + P_0 + I^2 P_{kn}) \times 100\%$$

对于给定的一台变压器， P_0 和 P_k 是一定的，效率和负载的大小及功率因数有关，在一定的 $\cos \varphi$ 下，和 β 的关系可由变压器的效率曲线反映。

当输出为零时，效率为零，当输出增加时，效率开始很快增高，达到一定值时，又开始下降，这是因为变压器功率消耗中有一部分不随负载而变的铁损，使轻载时效率低，而铜损耗则与负载的平方成正比，负载增大后，铜损也增加很快，使效率又降低。当 $P_0 = P_{cu} = I^2 P_k$ 时，也就是 $\beta = (P_0/P_k)$ 时，变压器的效率最大。



思考题

为什么要做成三相变压器？三相变压器有什么优点？三相变压器与由单相变压器组成的三相组在运行中有什么区别？

第四章 三相变压器及联结组

4.1 单相变压器的三相组

4.1.1 单相变压器的联结

绕组的出线端高压用 A 和 X，低压用 a 和 x 标志，磁通和绕向决定了绕组出线端的极性，不同的联结具有不同的电势极性。

4.1.2 单相变压器的联结组标号

联结组标号采用时钟表示法：把高和低压的电势向量看作是时钟面上的长针和短针，把长针指向 2 时，看短针指在那一个字上，就作为联结组的标号。

Ii0——通常以此为标准联结

Ii6

作业：画出它们的电势向量图。

4.2 三相变压器的磁路和绕组

三相变压器的磁路系统基本可分为两大类：

1、 三相单相变压器组

磁路是独立，磁通在各自的铁心中闭合，三相磁通是对称的相差 120 度，任何时刻的磁通之和为零。由于某种原因，磁路中可能会出现三次谐波，磁通 \dot{I}_1 和 \dot{I}_3 ，所经过的磁路相同，都是同一铁心，对 \dot{I}_1 和 \dot{I}_3 的限制作用是一样的，呈现较大的磁导，很小的电流 I 作用下都能产生较大的感应电势。

2、 三相三柱式铁心

三相磁通互相联系，每一相磁通借助其它两相才能形成闭合回路，这种磁路是不对称的，中间一相 B 相比 A、C 两相的磁路短，所以三相磁路和励磁电流将不完全对称，B 相的励磁电流比 A、C 两相的励磁电流要小，但由于变压器的励磁电流所占的比例极小，对实际的运行不会产生太大的影响。三相磁通大小相等相位互相对称，任一瞬时的磁通之和为零： $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$ ；各相的三次谐波磁通在时间上是同相位的，不能以另外两相的磁路

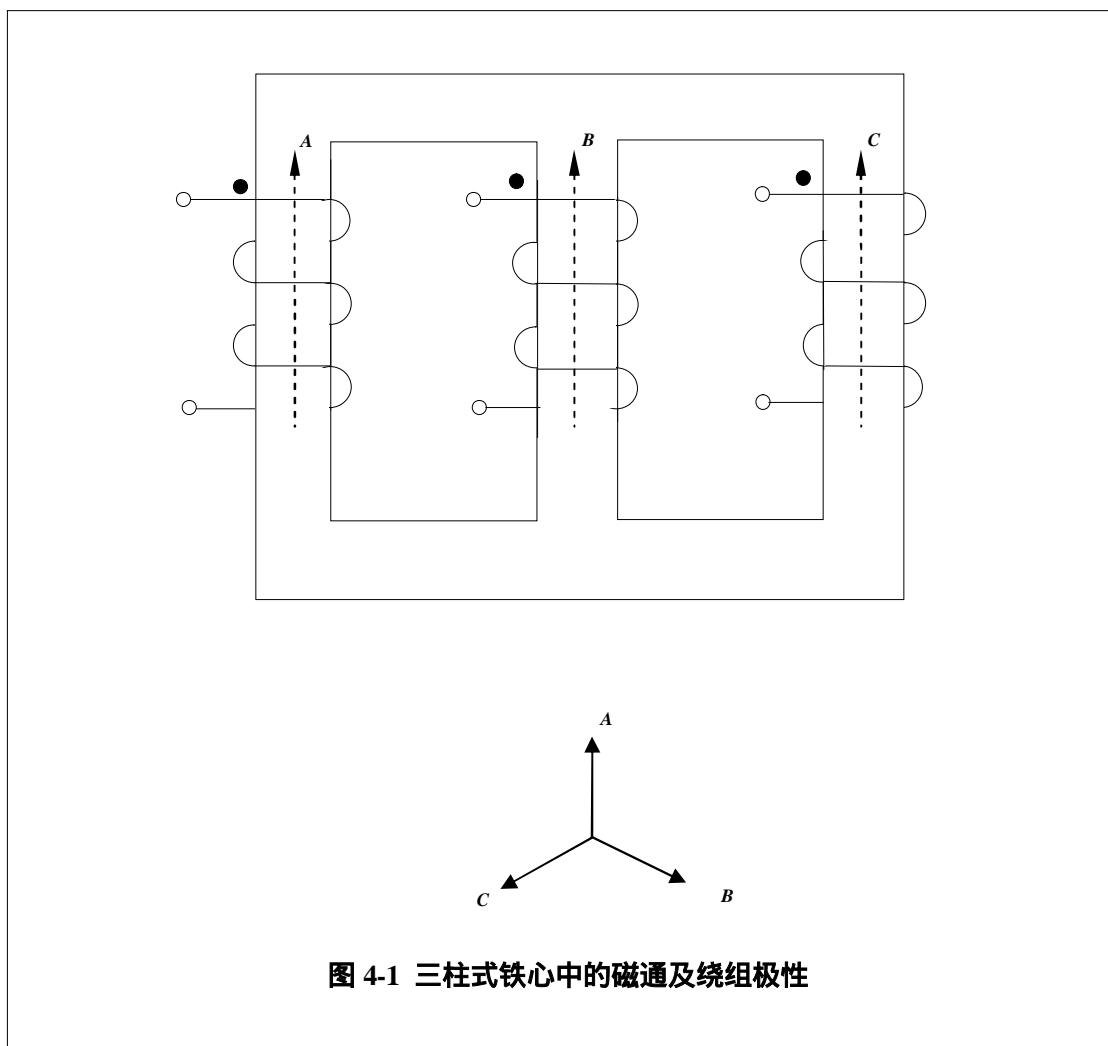
形成回路，只好从变压器的铁轭中散出来，经过一段油路，借道油箱壁或其它铁磁体构成闭路，即三次谐波磁通在三相三柱式变压器中遇到很大的磁阻，三次谐波磁通 Φ_3 的量值远小于 Φ_1 ，磁通的波形基本是正弦的。

3、 三相五柱式铁心

一般受运输高度，安装高度的影响，而设计成三相五柱式结构，主要特点：1) 对于三相对称的基本波磁通互相依赖；2) 对于三相完全相同的三次谐波磁通走旁轭，归到三相变压器组一类，研究三次谐波磁通。

4.2.1 三相三柱式铁心变压器的磁路系统

三柱式铁心变压器的磁路系统如图 4-1 所示：



三相的磁通有了一定的极性关系，所以三相绕组电势之间也有一定的极性关系或者对应点。

4.2.2 三相绕组的联结

4.2.2.1 绕组的标注方式

一、线圈

1、左绕向----线圈沿左螺旋前进

2、右绕向----线圈沿右螺旋前进

二、同名端

把同时具有高电位（或低电位）的端头称为同名端或同极性端。

三、标注首末端

端子标注	绕组	首端	末端	中性点
单相	高压	A	X	
	中压	Am	xm	
	低压	a	x	
三相	高压	A B C	X Y Z	O
	中压	Am Bm Cm	Xm Ym Zm	Om
	低压	a b c	x y z	o

4.2.2.2 三相绕组联结

把三个单相绕组联成三相绕组有许多种联法最常见的是星形（Y）和三角形（ Δ ）接法两种，此外还有曲折接法（或Z接法）和V接法。

1、星形接法

把三个绕组的尾端 X,Y,Z；连在一起，形成中性点 O；把首端 A,B,C 引出。

2、三角联接

三角联结有两种接法：

一种接法是将 A 联至 Y，B 联至 Z，C 联至 X，由 A、B、C 引出；

另一种是 A 联至 Z，B 联至 X，C 联至 Y，由 A、B、C 引出

3、曲折形连接

曲折形连接，把其中一相的上半部分与另一相的下半部分绕组反串起来组成新的一相。

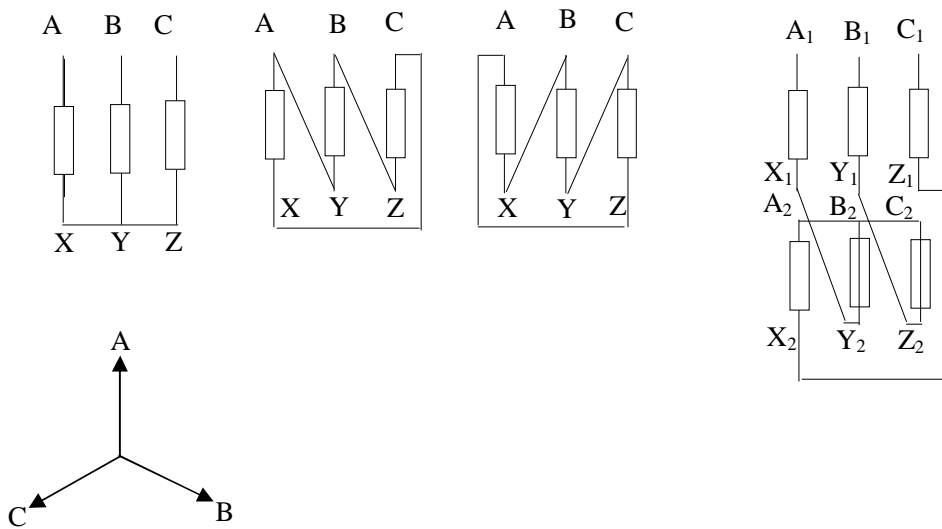


图 4-2 三相组的各种接法

作业：把上图中为画全的向量图补上。

4.2.2.3 三相变压器常用联结组

变压器的原边和副边可以用不同的联结方法，形成不同的联结组别。不同的联结组别是原边和副边相对应的线电压之间有不同的相位差。

电力变压器的标准联结组为：

- 1) Yyn0 2) Yd11 3) YNd11 4) Yy0 5) YNy0,

单相只有 Ii0

其中高压用大写字母表示，低压用小写字母表示，有中性点引出的用 N 和 n 表示，12 点用 0 点代替。单相用字母 I (高压) 和 i (低压) 表示。

国家标准 GB/T 1094.1 附录 D 列出了三相变压器常用的联结组。其中常用的 15 种，补充的联结组 11 种，以及自耦变压器联结组举例。

各种联结组的使用范围：

- 1、 Yyno 用在副边电压为 400—230 伏的配电变压器中，供给动力和照明的混合负载。
- 2、 Yyno，用在副边电压超过 400 伏的线路中，最大容量为 5600KVA,高压边电压也在 35KV 以下。

- 3、YNd11，用在高压边需要中性点接地的变压器里，在 110KV 及以上的高压线路，一般需要中点或通过阻抗接地。
- 4、YNy0，用于原边的中点需接地的场合。
- 5、Yy0，一般只供三相动力负载。

在联结的时候一定要注意极性正确，否则将造成严重后果。

(1) 星形接法

原边若有一相反接，即该相的首端与另外两相的末端接成中性点，则当电流从该相流入而从另外两相流出时，该相铁心柱中的磁通会与另外两相的磁通相互抵消，一部分磁力线会从周围的空气中通过，使空载电流大大增加，接反的那一相空载电流会更大，这时中点电位严重偏移，空载电流比正常值在许多倍，由于后果严重，这种错误是绝对不允许的，运行前要进行接法检查。

副边若有一相反接，若 b 相接反，则该相电势 E_b 将变为 $-E_b$ ，副边三相电势将不再对称，这时副边线电压 U_{ab}, U_{bc} 的值会与副边的相电压相等， U_{ac} 的值为相电压的 3 倍。

(2) 三角接法

原边：如果有一相接反，(即有头接头，尾接尾)空载电流急剧增加，会比星形接法时一相反的空载电流大，后果更严重，因此是不允许的。

副边：若副边有一相接反，副边三相电势之和会等于一相电势的 2 倍，若投入运行后果比两相短路更严重。

三相单相变压器组：对三相变压器组，原边各相间标志没有上述要求，但对副边各相间标志错误会影响联接组别，电压会严重不对称或过电流。

{	原边	Y 接 $U=0$ ，若接反，1、三单相变压器组，不会产生过激磁 2、三相三柱 $U=0$ 产生过激磁柱式变压器
		接 $U=0$ ，若接错 $U \neq 0$ 电流变大，烧坏变压器。
{	副边	Y 接 单相变压器影响联接组别，影响输出电压
		,副边接错，后果更严重，烧坏变压器

4.3 三相变压器空载运行时的电势波形

讨论单相变压器空载运行，外加电源是正弦形的，感应电势也是正弦的，产生感生电势的磁通也是正弦的，励磁电流是一个尖顶波形，谐波分析，有基本波形和三次谐波。

结论：对于一台变压器来说，要求它输出电压是正弦变化的交流电压，因此它的感应电势必须是正弦的，感应电势是由磁通产生的，因此磁通也必须是正弦的，由于铁心材料的非线性（导磁率 μ 不等于常数，且 μ ），要产生正弦变化的磁通所需要的励磁电流应该是非正弦的尖顶波，即励磁电流中应含有三次等高次谐波，即**只有励磁电流中含有**一定三次谐波分量的励磁电流**才能在有铁损的铁心中产生正弦波磁通，如果励磁电流是正弦波，它所产生的磁通就不再是正弦的，而是非正弦的平顶波。**

一、三相三次谐波分量的特点

1) 三次谐波也是正弦波，是按正弦规律变化的，变化频率是基本波形的 3 倍。
2) 基本波形相位 A、B、C 三相之间相互相差 120° ，任何时间 $i=0$ ， $U=0$ ，A、B、C 三相三次谐波相位互差 $3 \times 120^\circ = 360^\circ$ ，是同相位的，特点大小相等，相位相同。它们能否在电路中流通，要具体分析：

- 1) Y 接，三个同相的电流不可能流通，不存在 I_{03} ，主要是基本波形。
- 2) YN 接，每相绕组都与电源接通，经过中线构成回路， I_{03} 可以流通。
- 3) D 接，三次电流在相绕组组成的闭合回路中可以通过，但在线电流中没有 I_{03} ，两个相的 I_{03} 在节点上抵消。

二、Yy 联接的三相变压器

在这种接法中，励磁电流不能有三次谐波，励磁电流是正弦的。（忽略 5 次及以上高次谐波）

1) 每相主磁通有独立回路的三相变压器

三单相变压器组，三相五柱式铁心都属于独立回路。

磁路特点：磁路是独立的，互不干涉，分析磁路问题可单独考虑。

由于励磁电流是正弦形的，磁通是平顶形的。

$$\begin{cases}
 01 & e_{01} \\
 03 & e_{03} \\
 & \text{平顶} \\
 E \text{ 相} & = (E_{01}^2 + E_{03}^2), \text{ 相电势是尖顶波。} \\
 U \text{ 相} = E \text{ 相} & = (E_{01}^2 + E_{03}^2) \\
 U \text{ 线} & = 3 \times E_{01}, \text{ 线电压中没有三次谐波。 (三次谐波电势相互抵消)} \\
 \text{所以 } U \text{ 线} & = 3 \times E_{01} < 3 \times (E_{01}^2 + E_{03}^2) = 3 \times U \text{ 相}
 \end{cases}$$

相电压的增高对绕组的相间绝缘产生很大威胁，特别是大容量高电压变压器，威胁更大，Yy 联接这种磁路结构不采用。

2) 各相主磁通的铁磁路互相依赖的三相变压器

例子：三相三柱式变压器是唯一的例子

磁路特点：磁路是彼此联系的，互相依赖，其中一相依赖另外两相或一相形成回路，由于励磁电流是正弦的，磁通是平顶波。

3：磁路经过铁心外的间隙和油箱等部件构成回路，遇到磁阻很大，形成较大磁压降， I_3 变得很小，相磁通基本是正弦的，相电势也基本上也是正弦的，不会出现尖峰的相电压，磁路虽饱和，励磁电流没有三次谐波分量。

注意：这个较小的三次谐波磁通会使铁轭夹件和油箱等铁磁物质产生附加铁损耗，降低效率，并引起发热，容量大于 1800KVA 时不能用这种联接。

3) Yd 和 Dy 联接的三相变压器

1、当原边是 Y 接，副边是 d 接时，与 Yy 接完全不同。d 接能供给三次谐波电流，从磁路看，与原边有三次谐波电流是一样的。

分析，副边没有电流， I_{03} 是怎样产生的？

如果把副边打开一个缺口，三次谐波磁通的流通情况与 Yy 接是一样的，磁路有 I_{01} ， I_{03} ，感应电势 E_3 ，开口处有电压 $U_k = 3E_3$ 。

如果把缺口 K 合上，d 接绕组里有 I_{03} 流过， $U_k = 3E_3 - 3I_3 Z_3 = 0$ ， $E_3 = I_3 Z_3$ ，

Z_3 为每相绕组三次谐波的漏阻抗, 如果 E_3 象 U_k 打开时那么大, I_3 数值大, I_3 一大, 主磁路里三次谐波磁通就小, E_3 就大大削弱, I_3 能维持必要的 I_3 的数值, I_3 只不过是励磁电流的一个分量, 数值不大, E_3 数值小, I_3 的数值也不大, 可以认为磁通的波形仍然是正弦形。

由于变压器 I_{03} 是原副边电流相加, 所需的三次谐波电无论在原边还是副边流通所起的作用是一样的, Yd 联接, 副边里的角接, 正好补足了三次谐波电流, 不管绕组是 Y 接还是 d 接, 在线电压中都不可能有三三次谐波分量。

在大容量变压器中, 当需要在原, 副边都接成 Y 接时, 这时可以在铁心柱上再加上一个接成角接的绕组, 这个角接的绕组不带负载, 主要的目的是为了提供三次谐波电流的通路, 保持主磁通接近于正弦形, 改善电势波形。

2、Yyn 联接

副边为 yn 的绕组, 给三次谐波电流提供了一个通路, 但这条通路必须经过负载, 在空载运行时, 没有通路, 在负载运行时, 因负载阻抗 Z_L 的大小影响了三次谐波磁通被削弱的程度, 产生必要的 I_3 所需的 E_3 就较大, 因而主磁通的波形仍得不到改善, 在三铁心柱变压器里可以采用, 在三相变压器组里仍不能采用。

在分析变压器的三次谐波时可从两方面入手:

一是找 I_3 和 I_3 , 二是看绕组的接法, 铁心的结构。

二是看绕组的接法, 铁心的结构。

4.4 三相变压器的不对称运行问题

第五章 三绕组变压器

5.1 概述

三绕组变压器: 本身有三种电压等级的变压器, 它的一相中有三个绕组。

1) 用途: 容量大, 电压高, 除做普通的升压、降压变压器外, 也可以做联络变压器, 联系几个电网, 进行电能调动。

2) 绕组的排列, 排列时考虑二点: 第一, 尽量减小漏磁, 减小损耗, 输入绕组离输出绕组要近一些。第二, 排列上要便于出线, 高压匝数多, 调节绕组多出在高压侧, 高压绕

线圈应排在最外侧。

升压变压器：低压接入电源做输入，从里向外排列，中、低、高顺序。

降压变压器：高压接入电源做输入，从里向外排列，低、中、高顺序。

3) 额定容量

三绕组电力变压器的容量是按每个绕组分别计算的，每个绕组的额定电压乘以它的额定电流就是它的额定容量。

三绕组变压器容量搭配关系

高压绕组	中压绕组	低压绕组
100	100	100
100	50	100
100	100	50

三个绕组容量搭配关系，并不是说三绕组变压器按此比例传递功率，只代表每个绕组传递功率的能力，运行时应符合能量守恒，但输出方式不同。

4) 标准联接组

(老) $Y_0/Y_0/$ —12—11, $Y_0/Y_0/Y$ —12—12,

(新) $YNyn0d11$ $YNyn0y0$

5.2 三绕组变压器的工作原理

工作原理与双绕组比，有类似之处，也有独特之处，性能有利，有弊。

1、空载运行

当绕组 1 接到 U_1 上，2、3 绕组开路，空载时与双绕组变压器比多出两个变比。

$$K_{12}=W_1/W_2, \quad K_{13}=W_1/W_3, \quad K_{23}=W_2/W_3$$

W_1, W_2, W_3 分别是 1、2、3 绕组的匝数，

2、电压方程

分析方法：分析三绕组变压器时，由于是三绕组的耦合，不能再用主、漏磁的概念，回到自感和互感问题上，自感电动势，流过线圈本身电流发生变化，而引起的电磁感应，互感电动势，由于一个线圈电流发生变化，在另一个线圈中感应的电势，令 r_1, r_2, r_3 是绕组 1, 2, 3 的绕线电阻。 L_1, L_2, L_3 是绕组 1、2、3 的全自感。

$$M_{21}=M_{12} \quad \text{是绕组 1、2 之间的互感}$$

$M_{13}=M_{31}$ 是绕组 1、3 之间的互感

$M_{23}=M_{32}$ 是绕组 2、3 之间的互感

如果原边加上电源电压 U_1

$$U_1 = I_1 r_1 + j L_1 I_1 + j M_{12} I_2' + j M_{13} I_3' \text{----- (1)}$$

$$-U_2 = I_2' r_2' + j L_2 I_2' + j M_{12} I_1 + j M_{23} I_3' \text{----- (2)}$$

$$-U_3 = I_3' r_3' + j L_3 I_3' + j M_{13} I_1 + j M_{23} I_2' \text{----- (3)}$$

$$I_1 + I_2' + I_3' = 0$$

说明：严格说这是一组非线性方程，在铁心磁路中自感与互感并非常数，但三绕组变压器运行时，电压 U_1 大小基本不变，为此铁心里磁导变化不大，近似认为自感、互感为常数。

$$I_3' = -(I_1 + I_2')$$

(1) - (2) 得：

$$U_{12} = U_1 - (-U_2') = I_1 Z_1 - I_2' Z_2'$$

$$U_{13} = U_1 - (-U_3') = I_1 Z_1 - I_3' Z_3'$$

Z_1, Z_2', Z_3' 是等值阻抗， X_1, X_2', X_3' 是由各绕组的自感和绕组之间的互感组合而成，它们并不是漏电抗，所以叫等值电抗。

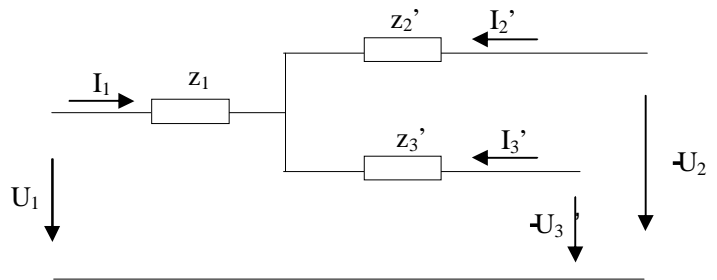


图 5-1 三绕组变压器的等值电路图

3、三绕组变压器的电压变化率

$$U_{12} = \frac{U_1 - U_2}{U_1} * 100\%$$

$$U_{13} = \frac{U_1 - U_3}{U_1} * 100\%$$

4、变压器的效率

$$= (1 - \frac{P_{CU1} + P_{CU2} + P_{CU3} + P_{FE}}{P_2 + P_3 + P_{CU1} + P_{CU2} + P_{CU3} + P_{FE}}) * 100\%$$

$P_{Cu1,2,3}$ 为各绕组的铜损, P_{Fe} 为铁损, P_2, P_3 为输出有功功率。

5 短路试验测参数

在三对绕组中, 相互间一对进行试验, 另外一组开路。

5.3 自耦变压器

自耦变压器: 原、副边绕组既有磁的联系, 又有电的联系变压器。

结构特点: 铁心上仍套有两个同心的绕组, 低压侧与 ax 相联, 高压侧除接到 ax 外, 还串联了绕组 Aa , 从绕组的作用看, 绕组 ax 供高、低压共用, 称公共绕组。绕组 Aa 则与公共绕组串联后供高压使用, 称串联绕组, 绕组 Aa 的匝数一般小于绕组 ax 的匝数, 前者的感应电势小于后者, 绕组 Aa 感应电势虽不大, 但接到高压侧, 有较高的对地绝缘。

用途: 主要用于不同的电力系统, 也可以作普通的升压或降压变压器。

一、基本公式、等值电路、容量关系

$$1、\text{变比 } K_A = \frac{E_1 + E_2}{E_2} = \frac{W_1 + W_2}{W_2}$$

将副边的量折算到原边得:

$$U_1 + U_2' = I_1(Z_{Aa} + (1 - K_A)Z_{ax}) + I_2'(1 - K_A)Z_{ax}K_A$$

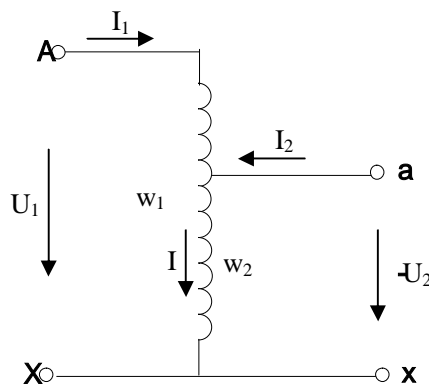


图 5-2 自耦变压器绕组联结图

2、容量

自耦变压器的额定容量(通过容量), 和绕组容量(电磁容量), 二者是不相等的。

通过容量: 指自耦变压器总的输入或输出容量。

$$\text{原边: } P_{1S} = U_{1N} \cdot I_{1N}, \quad P_{2S} = U_{2N} \cdot I_{2N} \quad P_{1S} = P_{2S}$$

电磁容量: 指的是绕组上的电压与电流的乘积

$$P_{Aa}=U_{Aa} * I_{1N} = \frac{U_{1N}}{W_1 + W_2} * W_1 * I_{1N} = P_S * (1 - \frac{1}{K_A})$$

$$P_{ax}=U_{ax} * I_N = U_{2N}(I_{2N}-I_{1N})=U_{2N} * (I_{2N}-I_{1N})= P_S * (1 - \frac{1}{K_A})$$

$(1 - \frac{1}{K_A})$, 效益系数, $K_{xy}=(1 - \frac{1}{K_A})$ 在自耦变压器里, 绕组的电磁容量总是小于它的通过容量。

分析: 如果不作自耦联接, 串联绕组是原边, 公共绕组是副边。

原边: $U_{Aa}, I_1, \dots, U_{AX}, I_1$

副边: $U_{ax}, I_1, \dots, U_{ax}, I_2$

$$P_2=U_2 * I_2=U_2 * (I+I_1)=U_2 I (\text{电磁容量}) + U_2 I_1 (\text{传导容量})$$

原边: $P_1=U_{ax} * I_1=(U_{Aa}+U_2) * I_1=U_{Aa} I_1+U_2 I_1$

从自耦变压器的向量图中可以看出, 如果它不作自耦联接是一个双绕组变压器, 串联绕组 Aa 是原边, 公共绕组 ax 是副边, 当接成自耦后, 副边电压 U_2 没变, 但电流却由 I 变为 I_2 , I_2 比 I 增加了一个由传导而来的电流, 副边的输出容量为 (P 电磁+ P 传导), $U_2 I_1$ 叫传导功率, 可以看作电流 I_1 通过传导直接到达负载, 这一部分功率不需要经过绕组的电磁作用, 不需要增加绕组容量。

和双绕组变压器的比较:

- 1、 变压器的额定容量相同时, 自耦变压器的绕组容量要小。
- 2、 变压器硅钢片和铜线的用量比双绕组变压器少, 可降低成本。
- 3、 自耦变压器的铜耗和铁损以及励磁电流都比较小, 可提高效率。
- 4、 自耦变压器的重量及外形尺寸也比较小, 减小变电所的占地面积, 减小变压器的运输和安装困难。
- 5、 在变压器外形尺寸有一定限制时, 自耦变压器的容量可以比双绕组变压器大, 可提高变压器的极限容量。

注意: 效益系数 $1 - \frac{1}{K_A}$ 越小, 自耦变压器的优点越显著, K_A 越接近 1 越好, 一般以不超过 2 为宜。如果 K_A 大了, 首先, 绕组容量接近变压器的额定容量, 其次高、低压相差悬殊, 自耦变压器原、副边有电的联系, 会给低压边的绝缘及安全用电带来困难。

适用: 自耦变压器适用于原、副边电压不大的场合, 一般串联绕组 Aa 的匝数比公共绕组 ax 的匝数要小。

二、 短路试验、短路阻抗，电压变化率和短路电流。

如果已知短路阻抗，自耦变压器的电压变化率，短路电流，可求出自耦变压器的短路阻抗，可由计算得到，也可通过试验测得。

1、在高压测 $Z_{K自}$ ，低压侧短接，在高压侧加电压 U_K, S 可求得 U_K, I_K, P_K

$$Z_{K自} = Z_{Aa} + (K_A - 1)^2 * Z_{ax}$$

由于 ax 短接，相当于把 U_K 加在绕组 Aa 上，

$$Z_{K双} = Z_{Aa} + (K_A - 1)^2 * Z_{ax}$$

说明：降压自变压器的短路阻抗在数值上与把串联绕组作原边，把公共绕组作副边的双绕组变压器的短路阻抗是相等的。

结论：自耦变压器漏阻抗标么值比这个变压器改作双绕组变压器时的漏阻抗标么值小，是后者的 K_{XY} 倍，若以自耦变压器的 Z_K 标么值与同容量的双绕组变压器的漏阻抗标么值相比，可能比值还要稍小些。

在低压测 Z_K （结果与在高压侧做是一样的）

a) 在双绕组变压器，无论从哪边一侧看，短路阻抗的相对值是一样的。

b) 自耦变压器两侧看进去的短路阻抗的数值也是一样的。

结论：自耦变压器的漏阻抗标么值 Z_K 大致是同容量的双绕组的 Z_K 的 K_{XY} 倍，自耦变压器负载时的电压变化率也比较小，约为双绕组变压器的 K_{XY} 倍，与 U 成正比，自耦变压器的短路电流大约比同容量的双绕组变压器大 $1/K_{XY}$ 倍。短路电流与 Z_K 成正比，为此必须加固自耦变压器的机械结构，防止短路电流产生的机械力引起的破坏作用。

三、 自耦变压器的运行问题

1、由于自耦变压器原边副边有直接电的联系，为防止高压边单相对地故障而引起低压边过电压，在电网中三相自耦变压器中点必须可靠接地。

2、由于原副边有直接电的联系，高压边遭受过电压时会传到低边，为避免发生危险必须在原副边都装上避雷器。

3、由于自耦变压器的短路电流比双绕组大，为此运行中必须采取限制短路电流措施。

第六章 变压器的并联运行

6.1 概述

现代电力网的容量越来越大，发电厂和变电站的容量也很大，一台变压器往往不能负担全部容量的升压或降压任务。于是不得不将两台或两台以上的变压器并联起来运行。

变压器的并联运行：就是将 2 台或 2 台以上的变压器，其原边绕组接在公共的母线上，而副边绕组也接到共同的母线上，以这样的方式运行，称为变压器的并联运行。

并联运行

- 1) 可以解决升压或降压过程中容量不足的问题，分期建设。
- 2) 可提高供电的可靠性。
- 3) 合理使用资金。
- 4) 提高系统的运行效率，改善系统的功率因数，低负荷时切除部分变压器运行。
- 5) 减小变压器检修的备用容量。

注意：当总容量一定时，并联变压器的台数不宜过多，若台数多，每台变压器的容量就会过小，这样会使投资费用增加，浪费材料，提高变电所造价。

6.1.2 变压器并联运行的理想工作状态

- 1) 变压器并联运行后，在没有带负载时，各台变压器副边间应没有循环电流，只有原边的空载电流，与单独运行时一样。
- 2) 并联运行的变压器带上负载后，应能按变压器容量大小成比例分配。

6.1.3 变压器并联运行的条件

要达到理想的并联工作状态需要满足三个条件：

- 1) **变比相同**——各并联运行的变压器原边额定电压和副边额定电压都分别相等。
- 2) **联结组别相等**——各台变压器其副边对原边线电压相位移相同。

3) 阻抗电压百分数相等——即漏阻抗标么值相同。

作业

1) 如果并联运行的变压器，联结组别和阻抗电压百分数满足并联运行条件，但两台变比不同，试分析会产生什么后果？

2) 如果并联运行的变压器，满足条件 1) 和 3)，连接组别不同，会有什么后果？

6.2 并联运行时的负载分配

假设被联的变压器已满足前两个条件，分析变压器的负载分配，可以忽略励磁电流。

在对称运行时，我们采用其中一相的简化等值电路即可。由等值电路看出：

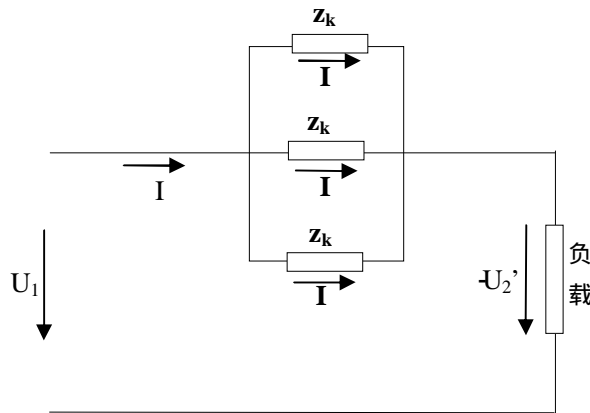


图 6-1 并联运行时的简化等值电路

$$I z_k = I z_k = I z_k = I/Y$$

$$I + I + I = I$$

从这些式中可以找到：

$$I = I/(z_k Y), \quad I = I/(z_k Y), \quad I = I/(z_k Y)$$

式中 $Y = 1/z_k + 1/z_k + 1/z_k$ 。因而，电流在并联变压器之间的分配与短路阻抗成反比：

$$I_1 : I_2 : I_3 = 1/z_k : 1/z_k : 1/z_k$$

也就是各变压器的电流之比等于各变压器阻抗值倒数之比。

变压器的负载率与阻抗标么值成反比，与标么值得到数成正比：

$$\beta_1 : \beta_2 : \beta_3 = 1/z_k : 1/z_k : 1/z_k$$

小结

并联运行时，因变比不相等出循环电流。循环电流不是负载电流，但是它却占据变压器的容量，增加变压器的损耗，不希望它存在，应将它限制在一定的范围，为此，变比之间相差应小于 $\pm 0.5\%$ 。为了避免浪费设备，漏阻抗标么值相差应小于 10% ，并联运行的各变压器它们的容量比一般不超过 3 倍。

第七章 变压器的过渡过程

7.1 概述

在变压器正常运行中，如果带的负载或所加的电源电压的大小变化不是很剧烈时认为是稳态运行，认为磁通、电压、电流等的幅值在一定时期内保持不变。因而利用前面几章的分析结果，已经能够解决大部分运行问题。但是如果变压器的运行遭受较大的扰动，如变压器突然改变负载，空载合闸到电源，副边突然短路或受到过电压的冲击，则变压器将从一个稳态平衡过渡到另一稳态平衡状况，这个过程叫过渡过程。

过渡过程的特点：

时间短，影响大，破坏变压器的绕组，损坏变压器的绝缘。

7.2 过电流现象

过电流现象一般发生在空载合闸或副边短路的情况。

7.2.1 空载合闸到电源

稳态时空载电流占额定电流的 $0.5\text{—}2\%$ ，空载合闸到电源，电流很大，比额定电流大很多。

分析：变压器副边空载。

原边在 $t = 0$ 瞬间接到正弦电压电源上，原边回路方程：

$$u_1 = i_1 r_1 + w_1 (d\phi / dt) = U_{1m} \sin(\omega t + \alpha)$$

式中： ϕ ——与全部元绕组匝数相链的全磁通；

α ——在变压器接通时 ($t = 0$) 决定电压瞬时值的角度。

由于式中 $i_1 r_1$ 较小，暂且忽略，上式变为：

$$w_1 (d\phi / dt) = U_{1m} \sin(\omega t + \alpha)$$

解方程得：

$$\phi = -(U_{1m} / w_1) \cos(\omega t + \alpha) + \phi_0$$

式中 ϕ_0 由起始条件决定。

当 $t = 0$ (即合闸时)，设无剩磁，即 $\phi_{t=0} = 0$ ，代入得：

$$\phi_{t=0} = -(U_{1m} / w_1) \cos \alpha + \phi_0 = 0$$

由此可知：

$$\phi_0 = (U_{1m} / w_1) \cos \alpha$$

方程的解为：

$$\phi = (U_{1m} / w_1) [\cos \alpha - \cos(\omega t + \alpha)]$$

$$= \phi_m [\cos \alpha - \cos(\omega t + \alpha)]$$

式中 $\phi_m = U_{1m} / w_1$ ——稳态磁通最大值。

磁通 ϕ 的值还取决于 $t = 0$ 时的合闸相角。

讨论：

1、当 $t = 0$ 时， $\alpha = 90^\circ$ 或 $u_1 = U_{1m}$ ，

则 $\phi = \phi_m \sin \omega t$

1)、说明一开始就在铁心中建立了稳态磁通，没有过渡过程。

2)、磁通的自由分量一开始就为零。

2、当 $t = 0$ 时， $\alpha = 0$ ，或 $u_1 = 0$ ，

这时 $\phi = \phi_m [1 - \cos \omega t]$

当 $t = \frac{\pi}{\omega}$ 时，磁通 Φ 的数值最大。如果认为磁通 Φ 中的自由分量衰减较慢，变压器的总磁通差不多达到 $2\Phi_m$ ，考虑到变压器空载合闸前铁心中尚有剩磁，当剩磁方向与自由分量磁通的方向一致时，过渡过程中铁心中的磁通可能会超过 $2\Phi_m$ ，随着时间的推移，自由分量磁通最终会衰减，磁路里只剩强制分量磁通。

从以上分析可看出，变压器空载合闸到电源的过渡过程实际上表现为主磁通的过渡过程，瞬间变化磁通分量的大小与合闸的相角有关，最严重时达到 $2\Phi_m$ ，上面分析是在假设变压器没有饱和现象得出的，实际变压器有饱和， L_1 不是常数，但由于电力变压器 r_1 比较小，求解时可把 L_1 看成常数，对所求的磁通不会有很大误差。

根据磁化曲线，可找出励磁电流，变压器正常运行时，磁路设计的已经饱和，工作在 A 点，在最不利空载接通电源的过程中，磁通可能会超过 $2\Phi_m$ ，这时铁心非常饱和，工作在 B-C 段，因此，励磁电流很大，超过稳态励磁电流 I_0 值的几十倍甚至几百倍，可达到额定电流的 3~5 倍，在空载接通电源的过程中，随着 (Φ_m) 的衰减励磁电流 i_1 也要衰减，衰减的快慢由时间常数 $\tau = L_1/r_1$ 决定。

影响：空载合闸到电源，对变压器直接危险不大，但它可能引起原边的过电源保护开关跳闸，从而使变压器从电网中断开，遇到这种情况可再合一次闸，甚至两次，按机会总会在适合的相角上，致使瞬变过程不太剧烈，也不会跳闸了。在大型变压器中，为了不使它受到较大电源的冲击，也有在变压器的原边中先串入一个附加电阻，然后再合闸，这样就可以减小电流的冲击量，又可以使它迅速衰减，等合闸完毕再把电阻去掉。

7.2.2 突然短路

变压器在突然短路故障时的类型：一相接地、两相短路、二相接地三相短路等。

时间常数 $\tau_k = r_k / L_k$

中小型变压器中： $r_k / L_k = 1/2 \sim 1/3$ ， $K_k = 1.2 \sim 1.3$

大型变压器中： $r_k / L_k = 1/10 \sim 1/15$ ， $K_k = 2.38 \sim 2.55$

用阻抗电压标么值表示：

$$i_{1\max}/1.414I_{1n} = K_k/Z_k$$

变压器发生突路时最大电流与额定电流振幅之比，变压器发生短路时持续时间，可以这样估算，认为从突然短路开始经历了 $3\tau_k$ ，自由分量电流已经衰减完毕，这段时间就是突然短路持续的时间。从漏阻抗标么值看，漏阻抗标么值小，对 U 有好处，从突然短路

上看，非常不利。

三、过电流的影响

1、产生机械力的影响

长度为 L 的载流导体，在与它垂直的磁场里受到总的电磁力，

$$F=(1/9.8)*B*Li*10^{-4} \quad (\text{公斤})$$

I ——导体中的电流

B ——导体所在处的磁密

径向力：把高低压绕组中的电流分别与沿径向分布的漏磁通产生的机械力称径向力。

力的大小可计算，方向左手定则，由于高低压绕组的安匝数差不多相等，只要高低压绕组长、短相等，那么所受的径向力沿轴向分布相等。

轴向力：把高低压绕组中的电流，分别与自已绕组的沿轴向分布的漏磁密产生的机械力，称为轴向力。

2、发热现象

变压器发生突然短路时，短路电流是额定电流的 25—30 倍，而铜损将达到额定时的几百倍，由于铜损的增加，绕组的温升迅速上升，如果没有继电器保护，时间长一守会损坏变压器。

一般认为，绕组温度达 200—250 度是允许的，但最好不超过 200 度，按近似计算化式绕组从额定时的 90 度升到 250 度所需时间，

$$t \approx 2.5*(100*Z_K /)^2$$

——变压器平均电流密度

7.3 过电压现象

过电压：变压器正常工作时，电压幅值是一定的，由于某种原因，使加在变压器上的电压幅值超过了最高工作电压，这时变压器就遭受过电压。

1、大气过电压-----输电线遭到雷击或在输电线附近带电云层在输电线上感应产生的过电压。

2、操作过电压-----变电所开关合闸、拉闸所引起的过电压。

3、故障过电压——系统中发生突然短路或间隙电弧接地。

为了模拟雷电对变压器的作用，规定标准电压波型（全波）、截波、要求变压器的能承受住全波、截波试验。（全波、截波由实验定冲击电压发生器产生的）特点是持续时间非常

的短。

雷电冲击小波之所以破坏变压器的绝缘的原因是：

1、冲击电压数值很高，威胁变压器的主绝缘。

2、冲击波电压在变压器的首端附近产生很高的电位梯度，威胁变压器的纵绝缘，比较起来，纵绝缘受破坏的可能性更大，原因在冲击电压下，加在变压器的纵绝缘上的电压比工频时要大几倍到几十倍，如果绕组的冲击电压起始分布不均匀，首端附近的电场强度为工频时的 70----100 倍。

3、在工频时，主要考虑的是绕组的电感，而在冲击电压作用在变压器绕组瞬间，相当于加了一个频率极高的电压，电容效应是主要的，在遭受冲击电压时，主要考虑电容。

防止变压器遭受雷击的方法：

1、在线路上安装避雷器

2、改善电压起始分布，增大纵向电容，避免发生振荡