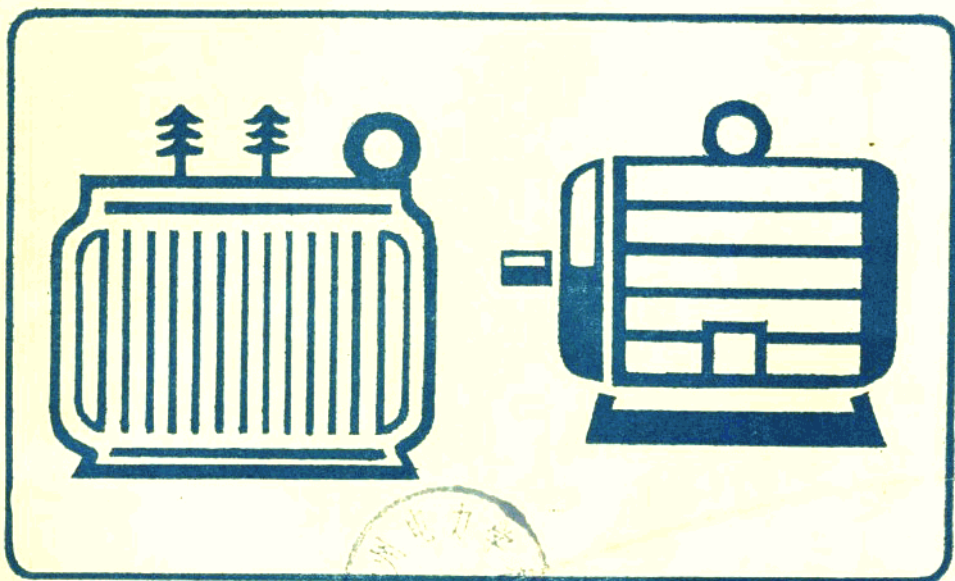


电机

用电管理培训讲义



华东电业管理局供用电处
上海总工会沪西职工技术交流站

一九八四年七月

用电管理培训讲义

《电 机》

华东电业管理局供用电处
上海总工会沪西职工技术交流站

一九八四年七月

前 言

为了提高用电管理人员的技术业务水平，以适应电力工业由生产型企业转变为生产经营型企业的需要，更好地为国民经济和人民生活服务，水利电力部电力生产司在八三年十月发出关于“用电管理人员在职培训的若干规定”，要求各大区电管局都要举办用电监察、营业管理和电能计量三类用电管理培训班。并在八四年六月发出“用电管理在职培训班教学计划和教学大纲”，供各地举办各类培训班时参照。根据上述教学计划和教学大纲的要求，我处委托上海电力专科学校用电监察与管理教研室陆敏政同志编写了《电机》讲义，供各地开办培训班时使用。本讲义由上海电力专科学校电力系张海云同志审稿。

鉴于用电监察、营业管理和电能计量部门专业人员对电机方面的知识要求不同，因此本课程教学大纲在内容安排和学时分配上有很大差别，所以在使用本讲义时，应根据大纲规定来取舍内容。即使是同一类型的培训班，最好也能根据具体情况对内容有所侧重和增删，本讲义中打•号的内容就是供选用的。

由于讲义编写时间比较仓促，未及向各方有关部门征询意见，所以在内容选择、组织、安排上定有许多疏漏和不妥之处，希望各地培训班在使用过程中能多提宝贵意见和建议，并转告我处，以便以后再作补充修改。

目 录

总 论

0—1 电机的理论基础	(1)
0—2 电机的基本理论	(2)

第一章 变 压 器

§ 1—1 变压器的作用原理	(4)
§ 1—2 变压器的空载运行	(6)
1—2—1 变压器空载工作情况	(6)
1—2—2 变压器空载时的电势平衡及空载相量图	(6)
1—2—3 空载电流与空载损失	(6)
§ 1—3 变压器的负载运行	(7)
1—3—1 变压器负载时磁势平衡	(7)
1—3—2 变压器负载时的电势平衡	(8)
1—3—2 变压器的折算	(9)
1—3—4 变压器负载时的相量图	(9)
1—3—5 变压器的等值电路	(10)
1—3—6 标么值的概念	(11)
1—3—7 变压器的短路工作状态	(13)
1—3—8 变压器付边电压变动的决定	(14)
§ 1—4 变压器的损耗与效率	(16)
1—4—1 变压器的损耗	(16)
1—4—2 变压器的效率	(17)
1—4—3 变压器的空载、短路试验	(17)
§ 1—5 三相变压器	(19)
1—5—1 三相变压器绕组的联接组	(19)
1—5—2 三相变压器绕组的接法和磁路系统对电势波形的影响	(22)
§ 1—6 变压器的并联运行	(24)
1—6—1 变压器的并联运行条件	(24)
1—6—2 变比不同时的并联运行	(24)
1—6—3 联接组不同时的并联运行	(25)
1—6—4 短路阻抗不同时的并联运行	(26)
• § 1—7 其他用途的变压器	(27)

1—7—1 自耦变压器	(27)
1—7—2 电焊变压器	(28)
1—7—3 三绕组变压器	(28)

第二章 异步电机

§ 2—1 异步电机的作用原理和构造	(31)
2—1—1 概述	(31)
2—1—2 额定值	(31)
2—1—3 异步电机的构造	(32)
2—1—4 多相异步电动机的作用原理	(32)
• 2—1—5 交流电机的绕组简介	(34)
• 2—1—6 交流绕组的电势	(35)
§ 2—2 异步电动机的运行	(37)
2—2—1 概述	(37)
2—2—2 异步电动机转子静止时的现象	(38)
2—2—3 异步电动机在转子旋转时的现象	(39)
2—2—4 异步电动机的等值电路和相量图	(41)
§ 2—3 异步电动机的旋转力矩	(42)
2—3—1 异步电动机的能量转换	(42)
2—3—2 异步电动机的转矩	(42)
§ 2—4 异步电动机的工作特性	(44)
2—4—1 概述	(44)
2—4—2 电流特性 $I_1 = f(P_2)$ 与转速特性 $n = f(P_2)$	(45)
2—4—3 转矩特性 $M = f(P_2)$	(45)
2—4—4 功率因数特性 $\cos\varphi = f(P_2)$	(45)
2—4—5 效率特性 $\eta = f(P_2)$	(46)
§ 2—5 异步电动机的启动	(46)
2—5—1 概述	(46)
2—5—2 异步电动机的启动过程和稳定性	(47)
2—5—3 鼠笼式异步电动机的启动	(47)
2—5—4 绕线式转子异步电动机的启动	(51)
§ 2—6 异步电动机的转速调节	(52)
2—6—1 异步电动机转速调节的方法	(52)
2—6—2 改变转子电路电阻调节转速	(52)
2—6—3 改变定子绕组的极数以调节转速	(52)
2—6—4 改变频率调节转速	(52)
• § 2—7 异步发电机	(53)
2—7—1 异步发电机在电网上并联运行	(53)

第三章 同 步 电 机

§ 3—1 同步电机的作用原理与构造	(55)
3—1—1 同步电机的作用原理	(55)
3—1—2 同步电机的构造	(55)
3—1—3 同步电机的电枢反应	(56)
3—1—4 漏磁通对同步电机的影响	(57)
§ 3—2 同步发电机	(58)
3—2—1 同步发电机的相量图	(58)
3—2—2 显极电机的电势相量图	(58)
3—2—3 隐极电机的电势相量图	(59)
3—2—4 同步发电机的特性曲线	(60)
3—2—5 稳态功角特性	(61)
3—2—6 同步发电机的并联运行	(63)
3—2—7 并联运行时有功功率的调节	(64)
3—2—8 并联运行时无功功率的调节	(64)
3—2—9 同步发电机突然短路概说	(65)
§ 3—3 同步电动机	(67)
3—3—1 同步电机的可逆原理	(67)
3—3—2 同步电动机的运行特性	(67)
3—3—3 同步补偿机	(69)
3—3—4 同步电动机的启动	(70)
3—3—5 反应式同步电动机	(70)

总 论

0—1 电机的理论基础

电机是完成机械能转变为电能、电能转变为机械能或一种型式的电能转变为另一种型式的电能的电磁机器。电磁感应定律、电磁力定律等理论是电机工作原理的理论基础。

1、电磁感应定律

当导体在磁场中运动时，切割磁力线，便在导体中产生感应电势。反之，当导体处在运动的磁场中（比如旋转磁场），导体中亦有感应电势发生。总之，当导体与磁场间有相对运动时，导体中就产生感应电势。其电势的大小与磁感应强度 B ，相对运动速度 V ，以及导体的长度 L （与 B 和 V 垂直的长度）成正比。即：

$$e = BLV \quad (0-1)$$

所得电势方向，由右手定则来判定。

如果在线圈中通入交流电流时，便在线圈周围产生交变磁场。当线圈处在交变磁场中，则在线圈中便产生感应电势：

$$e = -W \frac{d\phi}{dt} \quad (0-2)$$

式中负号表示感应电势 e 的方向，将倾向于产生一电流，此电流会阻止线圈中磁通的变化。由此可得出结论：

凡是线圈处在变化的磁场中（可以是空间变化的磁场，也可以是时间变化的磁场）；或线圈对磁场有相对运动时，便在线圈的两端产生感应电势。

2、电磁力定律

如果将通有电流的导体放在磁场中，则导体便受电磁力作用。其电磁力 f 的大小与磁感应强度 B ，导体中电流 I 和导体长度 l 成正比。即：

$$f = BIl \quad (0-3)$$

电磁力的方向依左手定则来判定，当磁场方向和电流方向一定时，电磁力的方向便恒定。如果电流方向或磁场方向有一个改变时，电磁方向便改变。当电流方向与磁场的方向同时改变时，电磁力方向不变。

3、全电流定律

沿闭全迴线的磁势等于被这个迴线包围的全电流：

$$\oint H dl = \sum I \quad (0-4)$$

由此还可得磁路定律：

$$\phi = \frac{F}{R_m} \quad (0-5)$$

上两式中H为磁场强度，F为磁势，Rm为磁阻。

在电机运行过程中，电磁感应与电磁力现象同时存在于电机中。故任何一种电机都是可逆的。

0—2 电机的基本理论

1、变压器

变压器是将一种电压的交流电能，转变成另一种电压的交流电能的静止电磁机器。变压器的主要部分是铁芯及线圈（通常称绕组），如图0—1所示。

如果把交流电加在原边绕组上，则在铁芯中产生交变磁场，而原边绕组与付边绕组都受交变磁场的影响产生感应电势（式0—2）。因电压要求按正弦变化，所以交变磁通也应是正弦变化的，即：

$$U = U_m \sin \omega t; \quad \phi = \phi_m \sin(\omega t + 90^\circ)$$

匝链原付绕组的磁通称为工作磁通（或称主磁通），用最大值表示为 ϕ_m 。在原付绕组中产生电势的值为：

$$E_1 = 4.44fW_1\phi_m \quad (0-6)$$

$$E_2 = 4.44fW_2\phi_m \quad (0-7)$$

原边电压 U_1 与原边感应电势 E_1 相差甚小，可认为 $U_1 \approx E_1$ 所以变压器空载时，原边电压与付边电压的比（称变压器的变比）K等于：

$$K = \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{4.44fW_1\phi_m}{4.44fW_2\phi_m} = \frac{W_1}{W_2} \quad (0-8)$$

即变压器的变比就等于原付绕组的匝数比。变压器可作为升压用，也可作为降压用。

2、异步电机

异步电机又称感应电机，它是交流电动机的普遍型式。异步电机由定子和转子两部分构成。定子固定不动，和旋转的转子之间有一气隙。在定子上装有三相交流绕组，通入三相交流电就可产生三相旋转磁场。在转子上有绕组，转子绕组有短接的鼠笼式绕组与三相绕线式绕组二种类型。转子绕组在定子绕组的三相旋转磁场作用下，产生感应电势，由于转子绕组是闭路的，所以在转子绕组中便有电流流通。转子电流与磁场相互作用，便产生电磁转矩。异步电机转子在电磁力矩作用下以某一速度旋转，这就是异步电动机工作原理。异步电机的工作是可逆的。

3、同步电机

同步电机又称同期电机，它是交流电机的主要型式。同步电机一般由于容量较大，均采用磁极旋转而电枢绕组固定的型式。同步电机转子的许多磁极，当由滑环通入激磁绕组直流电时，便产生恒定磁场。但是，以外力（机械能）拖动转子磁极旋转时，固定在定子上的电枢绕组与磁场间有相对运动，便产生交变电势。电枢绕组是三相绕组，所以电枢绕组的电势是三相电势。其电势的频率f与转子磁极的转速n和磁极对数p有关，其关系式如下：

$$f = \frac{pn}{60} \quad (0-9)$$

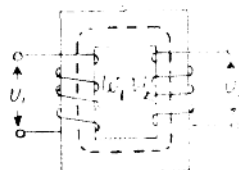


图0—1变压器原理图

式中 p —磁极对数

n —转子每分钟转速（转/分）。

若产生的交变电势频率 $f = 50$ 赫（我国标准工业频率）磁极对数 p 与转子每分钟转数 n 的乘积必须等于常数，即：

$$p \times n = 50 \times 60 = 3000$$

所以当同步电机的磁极对数 $p = 1$ 时，即两极电机，转子转速必须是每分钟3000转，电枢电势的频率才是50赫。

同步电机也可做为电动机运行，同步电动机转速与磁极对数必须符合（0—9）式，不可调节。所以一般用于需要保持恒速的机械上，或需改善电网功率因数时。

4、各种电机的相互关系

异步电机和同步电机的定子都是三相绕组，当有三相电流通过时，就会有三相旋转磁场产生。所以，把异步电机转子插入同步电机的定子中，则同步电机就变成异步电机。同理，把同步电机的转子磁极插入异步电机定子中，则异步电机便成为同步电机。

如果异步电机转子上有三相绕组（三相绕组式绕组），通过三个滑环可与外电路联接。当异步电机定子接上交变电压时，产生旋转磁场，切割转子绕组，并在转子绕组中产生三相感应电势，由于定子绕组与转子绕组的匝数不同，所以在转子滑环上所得电势与定子外加电压不同。因此，异步电机在转子不动时，就是一个变压器。

由上所述，我们知道各种电机之间是有密切联系的，这是因为它们是在同一电磁感应原理下做成的。

第一章 变 压 器

在交流输电系统中，变压器是主要设备。应用变压器可以提高电压或降低电压。无论在电力系统中大量电能的输送和分配，或在电讯、电测、自动遥控等方面，变压器都获得广泛的应用。因此，为不同目的而制造的变压器差别很大，它们的容量范围可从数伏安至数万千伏安，电压范围可从数伏至数十万伏。我们所要讨论的，主要是在电力系统中供输电和配电用的变压器，统称为电力变压器，它们都是按照我国标准工业频率50赫制造的。

用来升高电压的变压器，称作升压变压器。用来降低电压的变压器，称作降压变压器。升压变压器和降压变压器仅是应用上的区别名词，除了为和网路电压相适应而有略为不同的额定电压以外，在原理和构造方面二者并无差别。

变压器又可按照其相数来分，分为三相变压器和单相变压器。在三相电力系统中，一般应用三相变压器。

通常的变压器都为双绕组变压器，即在铁芯上有两个绕组，一为原绕组，一为付绕组。较大的变压器（5600千伏安以上），有时也有三个绕组，以联接三种不同电压的输电线，称作三绕组变压器。

按照铁芯和绕组的相对位置来分类, 变压器可分为铁芯式变压器和铁壳式变压器。电力变压器都系铁芯式, 即绕组包在铁芯外周。

为了加强绝缘和冷却, 变压器的铁芯和绕组都浸入装满变压器油的油箱中, 称油浸式变压器。小容量变压器也有采用环氧树脂作绝缘的, 称干式变压器。

如在变压器的高压绕组上抽有分接线头, 用以改变原绕组和付绕组间的匝数比, 则为调压变压器。这种变压器尚可分为在空载下调压及在负载下调压两种。

如把原付绕组合为一个绕组, 则称自耦变压器。自耦变压器常用于需要在较小的范围内改变电压的场合, 例如, 用于起动交流电动机。

此外, 尚有各种专用的特殊变压器, 例如, 试验用高压变压器、电炉用变压器、电焊用变压器、供给整流器的变压器、用于测量仪表和继电保护装置的电压互感器与电流互感器等等。

尽管如此, 各种变压器的基本原理仍是相同的。下面我们将以单相和三相的双绕组电力变压器来阐明变压器的理论和有关问题。

§ 1—1 变压器的作用原理

变压器的作用原理是基于电磁作用原理。通常变压器由两个匝数不同的原绕组和付绕组构成的。两绕组之间有磁的耦合。为了加强耦合作用, 原付边的绕组套在由电工硅钢片迭成的铁芯柱上。每一铁芯柱上有原绕组也有付绕组。但为了表示方便, 变压器的基本线路是把原和付绕组分别绕在两个铁芯柱上的, 如图 1—1 所示。

当原绕组接上交流电源时, 原绕组中流过电流产生磁势, 在铁芯的闭合回路中有交变磁通, 同时匝链原付绕组, 并在绕组中产生感应电势:

$$e_1 = W_1 \times \frac{d\phi}{dt} \quad (1-1)$$

$$e_2 = W_2 \times \frac{d\phi}{dt} \quad (1-2)$$

式中: W_1 和 W_2 为原绕组和付绕组匝数。设磁通按正弦变化, 则在绕组中产生的感应电势的相位落后于磁通 90° 。其电势的有效值为:



图 1—1 单相变压器的基本线路图

$$E_1 = \frac{2}{\sqrt{2}} \pi \cdot f \cdot W_1 \cdot \phi_m = 4.44 \cdot f \cdot W_1 \cdot \phi_m \quad (1-3)$$

$$E_2 = \frac{2}{\sqrt{2}} \pi \cdot f \cdot W_2 \cdot \phi_m = 4.44 \cdot f \cdot W_2 \cdot \phi_m \quad (1-4)$$

式中 f 为电源频率, ϕ_m 为磁通的最大值。如果将式 (1—3) 与 (1—4) 相除, 则得:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} \quad \text{或} \quad \frac{E_1}{W_1} = \frac{E_2}{W_2} = e_w \quad (1-5)$$

式 (1—5) 说明原付绕组每匝电势 e_w 是相等的。当付绕组外端开路时, 原绕组中的感应电势 E_1 与外加电压 U_1 仅差一很小的阻抗降落。如果忽略原绕组中阻抗降落, 则可认为 $E_1 \approx$

U_1 。此时付绕组中感应电势 E_2 也就是其端电压 U_{20} ，故 $U_{20} = E_2$ ，说明变压器改变电压的倍数称为变压器的变压比 k 。国家标准规定：变压器空载时，原绕组为额定电压与付绕组电压之比为变压器的变压比，简称变比 k 。即：

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{U_1}{U_{20}} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} = k \quad (1-6)$$

变比 k 等于原付绕组的匝数比。当 $k > 1$ 时是降压变压器，如果 $k < 1$ 则是升压变压器。

从功率方面看，原付通电路的功率各为：

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (1-7)$$

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 \quad (1-8)$$

如果略去变压器内部的功率损耗，并且认为原付边电路的功率因数相等，即 $\cos \varphi_1 = \cos \varphi_2$ ，则 $P_1 \approx P_2$ 或 $U_1 \cdot I_1 \approx U_2 \cdot I_2$ ，因此：

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{U_2}{U_1} = \frac{E_2}{E_1} = \frac{W_2}{W_1} = \frac{1}{k} \quad (1-9)$$

从式(1-6)与式(1-9)可以看出变压器原付边的电压与电流约成反比。

变压器铭牌标明变压器的额定值。按变压器发热情况计算出的变压器付绕组输出最大容量，称变压器的额定功率，以伏安或千伏安表示。此外，还有电流、电压（对于三相变压器均指线电压或线电流）、频率等额定值。通常变压器铭牌标明下列各项：

- 1、工厂名称；
- 2、变压器的厂定型式和厂定号码；
- 3、额定功率（以千伏安为单位），是指付绕组端的最大容量，以 S_N 表示；
- 4、额定频率：我国标准工业频率采用50赫；
- 5、相数：单相或三相；
- 6、原边额定电压 U_{1N} 以千伏表示；
- 7、低压侧额定电压， U_{2N} （ $U_{2N} = U_{20}$ ）以千伏或伏表示，是指原边电压为额定值时，付边空载时的电压；
- 8、原绕组的额定电流 I_{1N} （安）；
- 9、付绕组的额定电流 I_{2N} （安），是指付边输出额定功率，付边为额定电压时的付边电流；
- 10、变压器的联接组别：如Y/Y-12或Y/△-11等；
- 11、工作情况：是指连续运用还是短时运用；
- 12、短路电压对额定电压的百分比 $U_K\%$ 。

$$\left(U_K\% = \frac{U_K}{U_N} 100\% \right),$$

- 13、冷却方式。

§ 1—2 变压器的空载运行

1—2—1 变压器空载工作情况

当变压器付绕组外端开路时，原绕组接上交流电压，原绕组将有电流 I_0 流通，其值是额定电流 I_N 的 $3 \sim 8\%$ ，原绕组磁势 $I_0 W_1$ ，在铁芯中产生磁通 ϕ 。匝链原付绕组的磁通，称为工作磁通，它原付绕组中产生感应电势。付绕组开路故没有电流，这种情况称为变压器空载工作情况。磁势 $I_0 W_1$ 产生磁通大部分为工作磁通，其最大值用 ϕ_m 表示。磁势 $I_0 W_1$ 产生的磁通不仅是工作磁通，还有在铁芯外面闭合的，且只匝链原绕组而不匝链付绕组的磁通称为原边漏磁通，以 $\phi \sigma_1$ 表示。

如图1—2。漏磁通路的磁阻主要是空气间隙。因此，漏磁通 $\phi \sigma_1$ 与产生漏磁通的电流 I_0 成正比且相位相同。所以漏磁通 $\phi \sigma_1$ 在原绕组中产生的漏抗电势 $E \sigma_1$ ，也与电流 I_0 成正比在相位上电势 $E \sigma_1$ 落后电流 $I_0 90^\circ$ ，即：

$$\dot{E} \sigma_1 = j \dot{I}_0 x_1 \quad (1-10)$$

式中 x_1 是比例常数称为原边漏抗。原边漏抗 x_1 与原绕组放置情况有关。为减少漏磁，实际上铁芯柱套有原绕组同时又套有付绕组。原漏磁通不匝链付绕组，不参加能量转换工作。漏磁电势 $E \sigma_1$ 对原端电压来讲是反电势，起电压降作用。因而常用电抗压降 $I_0 x_1$ 表示。 $I_0 x_1$ 超前于漏磁通 $\phi \sigma_1$ 或电流 $I_0 90^\circ$ 。

此外在绕组中还有电阻压降 $I_0 r_1$ ，电阻压降 $I_0 r_1$ 与 I_0 电流同相位。

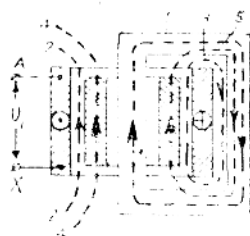


图1—2
变压器空载时漏磁场

1—2—2 变压器空载时的电势平衡及空载相量图

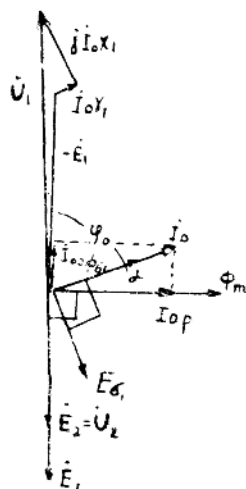
据上节的叙述，应用克希荷夫定律即：任何瞬间加在原绕组的电压必定与其感应电势及电压降总和所平衡，即：

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E} \sigma_1 + \dot{I}_0 r_1 \quad \text{或} \quad \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j \dot{I}_0 x_1 + \dot{I}_0 r_1 \quad (1-11)$$

在空载时，阻抗降落 $\dot{I}_0 (r_1 + jx_1)$ 都比较小，总和不超过额定电压 U_N 的 0.5% ，故可认为 $\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$ 。空载时付边电压 $\dot{U}_2$ 就等于付绕组产生的电势 $\dot{E}_2$ 。所以变压器空载时的电势平衡方程式为：

$$\begin{aligned} \dot{U} &= -\dot{E}_1 + j \dot{I}_0 x_1 + \dot{I}_0 r_1 \\ \dot{U}_{20} &= \dot{E}_2 \end{aligned} \quad (1-12)$$

为了对变压器空载时所有各相量之间的关系，尤其各相量之间的相位关系有明确的概念，我们可以利用一种常用的工具——相量图来研究变压器的各种工作情况。变压器空载相量图如图 1—3 所示。作的方法是从 0 点划一相量表示工作磁通 ϕ_m （因 ϕ 是随时间按正弦变化的）。磁通在原付绕组中产生电势 E_1 与 E_2 均落后磁通 $\phi_m 90^\circ$ 。由于原付绕组匝数不同，故相量 $\dot{E}_1$ 与 $\dot{E}_2$ 长度不等。空载时付边电压 U_2 就等于付边电势 E_2 。由于磁滞涡流的存在产生磁滞角 α ，所以产生工作磁通的空载电流 I_0 超前于磁通 $\phi_m \alpha$ 角，原漏磁通 $\phi_{\sigma 1}$ 与电流 I_0 同相，而漏抗电势 $E_{\sigma 1}$ 落后于 $\phi_{\sigma 1} 90^\circ$ ，所以在落后于 $I_0 90^\circ$ 方向划出 $E_{\sigma 1}$ 。而漏抗压降 $I_0 x_1$ 却超前于 $I_0 90^\circ$ 。在原绕组中的电阻压降 $I_0 r_1$ 与空载电流 I_0 同相。据电势平衡方程式 (1—11) 画出相量图的最后部分，如图 1—3 所示。从图 1—3 的空载相量图中可知原端电压 U_1 与空载电流 I_0 间的相位近于 90° ，所以变压器空载时的功率因数很小，约为 $\cos \varphi_0 = 0.2 \sim 0.3$ 。



1—2—3 空载电流与空载损失

空载电流可分为与磁通同相位的无功分量 I_{0P} 和超前于磁通 90° 的有功分量 I_{0a} 。前者称为激磁电流。超前于磁通 90° 的有功分量 I_{0a} 称为有功电流。激磁电流是空载电流的主要成分，它的波形与磁通密度的大小和铁芯的饱和程度有关。当磁通是正弦波时，在饱和的变压器中 I_{0P} 的波形不是正弦波。在相量图 (1—3) 中表示的激磁电流只是它的基波。有功电流 I_{0a} 超前于激磁电流 $I_{0P} 90^\circ$ ，其大小由空载损耗 p_0 决定。

$$I_{0a} \approx \frac{P_0}{U_1} \quad (1-13)$$

$$\text{空载电流} \quad I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0P}^2} \quad (1-14)$$

通常 $\frac{I_{0a}}{I_{0P}} \ll 0.1$ ，故 φ_0 近于 90° 。空载时变压器付边没有功率输出即 $p_2 = 0$ ，但空载时需输入功率 p_0 ，所以完全抵偿了空载损耗。而空载损耗主要是铁损耗（即铁芯中磁滞涡流损耗），在原绕组中铜损耗很小（因空载电流很小），附加损耗也很小。所以一般认为空载损耗就是铁损即：

$$P_0 \approx P_c \quad (1-15)$$

由于变压器的频率不变，所以铁损约与磁感应 B 的平方成比例。在制成的变压器，铁芯截面一定，所以变压器的铁损与电势 E_1 的平方成比例，即： $P_c \propto B^2 \propto \phi^2 \propto E^2$ ，因而 $U_1 \approx E_1$ ，当外加电压不变时，磁通及铁损耗也差不多保持不变。

§ 1—3 变压器的负载运行

1—3—1 变压器负载时磁势平衡

上面我们曾假定 $U_1 \approx E_1$ ，所以变压器外加电压的频率及大小不变时，则电势 E_1 及工作磁通 ϕ_m 亦不变（即外加电压决定了磁通 ϕ_m 的大小），在变压器空载时其空载电流及阻抗

压降 $\dot{I}_0 r + j\dot{I}_0 x_1$ 很小, 如果略去不计, 可认为 $U_1 \approx E_1$ 。在变压器负载工作时 (即付绕组与外电路接通时) 阻抗压降亦很小, 如果也略去不计, 且认为 $U_1 \approx E_1$ 。因此变压器在负载工作时, 当外加电压的频率及大小不变时, 其铁芯中的磁通也不变化。所以空载产生磁通 ϕ_m 需要磁势 $I_0 W_1$, 变压器负载时, 付绕组有 I_2 电流产生磁势 $I_2 W_2$, 而原绕组中电流 I_1 则产生磁势 $I_1 W_1$, 原付绕组磁势合成在铁芯中产生与空载大致相等的工作磁通 ϕ_m , 所以磁势必须满足下列关系:

$$\dot{F}_0 = \dot{F}_1 + \dot{F}_2 \quad (1-16)$$

$$\dot{I}_0 W_1 = \dot{I}_1 W_1 + \dot{I}_2 W_2 \quad (1-17)$$

$$\text{或 } \dot{I}_1 W_1 = \dot{I}_0 W_1 + (-\dot{I}_2 W_2)$$

则得
$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2')$$
 (1-18)

式中 $I_2' = I_2 \frac{W_2}{W_1} = I_2/k$

式 (1-16) (1-17) (1-18) 称为变压器的磁势平衡方程式。由此我们看出, 变压器有负载的原绕组磁势 $I_1 W_1$ 应包括两部分: 一部分 $I_0 W_1$ 用来产生工作磁通 ϕ_m , 另一部分 $(-I_2 W_2)$ 是用来抵销付边的去磁磁势 $I_2 W_2$, 以保持工作磁通 ϕ_m 不变。这种关系也可以用图 1-4 相量图来表示。

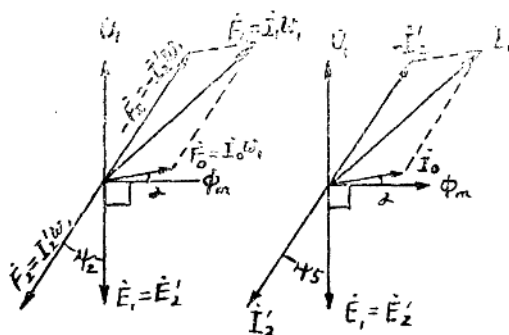


图 1-4 磁势平衡关系

1-3-2 变压器负载时的电势平衡

变压器负载时, 原边电流从 I_0 增到 I_1 , 故原边漏磁通 ϕ_{σ_1} 产生漏抗电势 E_{σ_1} 与 I_1 成正比

即: $\dot{E}_{\sigma_1} = -j\dot{I}_1 x_1$ 。原绕组电阻压降 $I_1 r_1$ 仍与 I_1 同相。而付绕组与负载接通后, 付绕组中有电流 I_2 , 则在付绕组中也有付漏磁通 ϕ_{σ_2} 产生, 付漏磁通 ϕ_{σ_2} 只匝链付绕组, 且在付绕组中产生漏抗电势 E_{σ_2} 。付边漏抗电势 E_{σ_2} 与原边漏抗电势一样和产生漏磁通的电流成正比, 即 $\dot{E}_{\sigma_2} = -j\dot{I}_2 x_2$ 并落后于电流 $I_2 90^\circ$, 所以变压器有负载后, 原付边的电势平衡方程为:

$$\dot{U} = -\dot{E} + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1 \quad (1-19)$$

量 $\dot{I}_1$ ，由原边电势平衡方程式 $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_2 X_2 + \dot{I}_2 r_2$ 可知原边电压相量 $\dot{U}_2$ 是在相量 $(-\dot{E}_1)$ 末端加上与 $\dot{I}_1$ 平行的电阻压降 $\dot{I}_1 r_1$ ，再加上超前于电流 $\dot{I}_1 90^\circ$ 的电抗压降 $j\dot{I}_1 X_1$ 构成，如图1—5所示。 $\dot{U}_1$ 与 $\dot{I}_1$ 间夹角 φ ，为原边功率因数角。

1—3—5 变压器的等值电路

变压器的原付边绕组只有磁的耦合，没有电的联系，为研究变压器的运行情况，和进行有关的计算，常将变压器只有磁的联系化为等效的交流电路。假设原付绕组没有电阻，也没有漏磁通的变压器称为理想的变压器，实际变压器用理想变压器加上原付边的漏电抗及电阻的线路来表示，如图1—6 a所示。图中 X_m 为理想变压器的激磁电抗（与感应电势 E_1 相对应）， r_m 为变压器中铁损耗所对应的电阻。

通过折算后 $\dot{E}_1 = \dot{E}_2'$ ，所以图1—6 a就可变成图1—6 b所示的等效电路。其中所标的电流方向是根据磁势平衡方程式决定的，由于空载电流 I_0 很小，在 X_1 和 r_1 中的压降可忽略不计，因此图1—6 b可作成图1—6 c所示电路。当我们再忽略 I_0 ，并认为 $I_1 \approx I_2'$ ，电路便可简化为图1—6 d所示的等值电路。

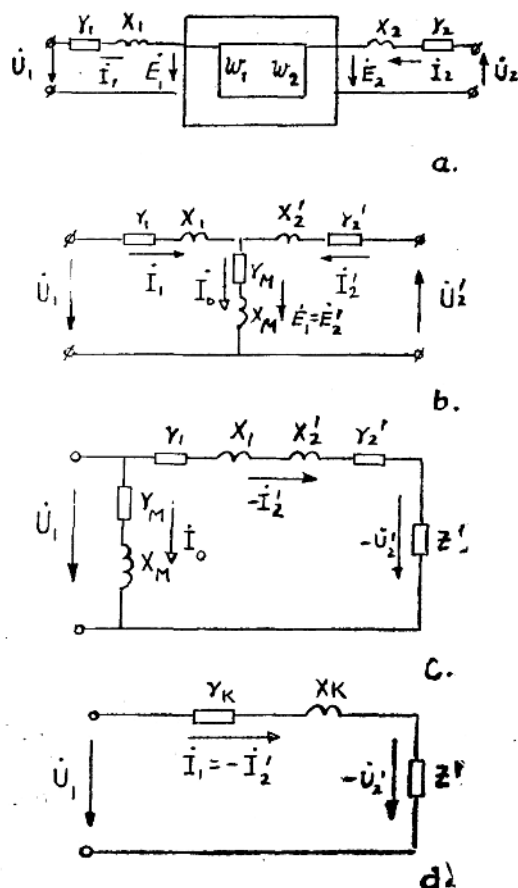


图1—6 变压器等效电路

其中 X_K 为短路电抗,它可由短路实验求出,即

$$X_K = X_1 + X_2' \quad (1-28)$$

同理 r_K 称短路电阻,即

$$r_K = r_1 + r_2' \quad (1-29)$$

对于三相变压器而言,等值线路是为每相作的。外加电压为每相电压,作用于任一相线及中线间。当变压器接入电网中时,可用一串联阻抗表示。

1—3—6 标么值的概念

在电力工程的计算中,电压、电流、阻抗及其它各量的数值常不用其实际单位来表示,而用其实际值与某一选定值(相同单位)的比数来表示,此选定值称为基准值,上述比数称为这个量的标么值(也有称相对值),即

$$\text{标么值} = \frac{\text{实际值}}{\text{基准值}}$$

通常以额定值作为基准值。例如空载电流为额定电流的0.03~0.08,短路电压为额定电压的0.05~0.10等,都是标么值。将标么值乘以100,即得以同样基准值表示的百分值。

以额定值作为基准值时,原、付边电压的标么值(在符号右下角加 $\cdot$ 号表示)为

$$\left. \begin{aligned} U_{1\cdot} &= \frac{U_1}{U_{1N}} \\ U_{2\cdot} &= \frac{U_2}{U_{2N}} \end{aligned} \right\} \quad (1-30)$$

原、付边电流的标么值为

$$\left. \begin{aligned} I_{1\cdot} &= \frac{I_1}{I_{1N}} \\ I_{2\cdot} &= \frac{I_2}{I_{2N}} \end{aligned} \right\} \quad (1-31)$$

在有关变压器的计算中,阻抗几乎总是用标么值或百分值来表示的。对于某一台变压器,阻抗基准值是指当变压器加以额定相电压时,电流等于变压器的额定相电流,即阻抗基准值为

$$Z_N = \frac{U_{\phi N}}{I_{\phi N}} \quad (1-32)$$

因原、付边的额定电压和额定电流不同,故原、付通的阻抗基准值也不同,显然它们也相差 k^2 倍。表示某一边阻抗的标么值时,必须与同一边的基准值相比。因而阻抗的标么值为:

$$\left. \begin{aligned} Z_{1\cdot} &= \frac{Z_1}{Z_{1N}} = \frac{Z_1}{U_{\phi 1N}/I_{\phi 1N}} = \frac{I_{\phi 1N} \cdot Z_1}{U_{\phi 1N}} \\ Z_{2\cdot} &= \frac{Z_2}{Z_{2N}} = \frac{Z_2}{U_{\phi 2N}/I_{\phi 2}} = \frac{I_{\phi 2N} \cdot Z_2}{U_{\phi 2N}} \end{aligned} \right\} \quad (1-33)$$

使用标么值的优点是:

1、不论变压器的容量大小,用标么值表示时,变压器的参数和性能数据通常都在一定范围内,因此便于分析和比较,如所有电力变压器的漏抗标么值 $[Z_K]$ 大体上在0.055~0.105之间;