

6481

电 子 变 压 器

〔美〕 Harold M. 诺顿别格著

(内部资料)

上海无线电二十七厂

一九七四年八月

序 言

电子设备的可靠性这个问题是从现代工艺学发端就一直提起的问题，随着电子学和所有工艺学的迅速发展，当前这个问题就更为重要。严格的工作条件，对设备提出了更复杂的要求，这些都应在电路设计、工艺结构及电子元件的选用中给予尽量注意。性能的稳定取决于电子器件和设备的生产技术。然而，对电子器件精心地选择和应用是决定电子设备可靠性的重要因素，要对电源变压器、音频变压器和脉冲变压器等作这样的选择和应用，就要求详细了解有关这方面的设计、制造及测试的技术。有关电子变压器的其它书籍虽已不少，但从读者的需要着眼的似尚不足。

鉴于电子变压器有各种不同的品种，这类书必须选择那些阐明一种特种结构的技术。本书把军用变压器作为例子，因为它们代表最新的设计及结构技术。而商品变压器一般首要考虑的是价格，这就使其结构与材料的选用偏向于比较普通或者便宜的种类。

一般电子元件从开始发展到大量生产，常需二年到七年，这要看元件的种类及所花力量的大小。电子变压器等级的低端是它的尺度，因为新技术与新材料的引进对变压器生产来说是比较容易的，微小的改革及改进是一个不断发展的过程。电子元件制造者乐于提供他们产品的最新情况。

Harold M. 诺顿别格

7M4
5

CA04/30



目 录

编者的话

序 言

第一章 变压器工作原理	1
§ 1-1 电流和匝数的关系	3
§ 1-2 漏感	4
§ 1-3 变压器的向量图	5
§ 1-4 等效电路	5
§ 1-5 电压调整率	7
§ 1-6 变压器损耗和效率	8
第二章 电子变压器材料	9
§ 2-1 绝缘材料	9
§ 2-2 介电强度	12
2-2-1 电场	12
2-2-2 脉冲对介质击穿的影响	15
2-2-3 频率对介电强度的影响	15
§ 2-3 介质常数	16
§ 2-4 介质损耗	16
2-4-1 损耗因数	16
2-4-2 功率因数	16
2-4-3 介质损耗因数	16
2-4-4 电阻率	17
§ 2-5 电晕	17
§ 2-6 绝缘系统	18
§ 2-7 导线的绝缘	19
2-7-1 极高温导线	20
2-7-2 玻璃纤维	20
2-7-3 不处理的导线	20
2-7-4 导线	21
2-7-5 温度对电导的影响	21
2-7-6 在 350°C 时对导线的评价	22
2-7-7 金属被复或电镀导线	23
§ 2-8 层间绝缘	24
2-8-1 低温	24
2-8-2 高温	24
2-8-3 极高温	24
§ 2-9 浸渍材料	24

2-9-1 低温	26
2-9-2 高温	26
2-9-3 极高温	26
§ 2-10 填充材料	27
2-10-1 脉冲评价	28
2-10-2 功率因数	30
2-10-3 湿度	30
2-10-4 溶解的气体	30
2-10-5 电压施加的时间	30
2-10-6 电阻率	31
2-10-7 膨胀系数	31
2-10-8 导热率	31
2-10-9 油的氧化	31
2-10-10 极高温	32
§ 2-11 密封材料	32
2-11-1 低温	32
2-11-2 高温	32
§ 2-12 对地的绝缘	33
2-12-1 低温	33
2-12-2 高温和极高温	33
§ 2-13 铁心材料	33
2-13-1 铁心损耗	33
2-13-2 涡流损耗	33
2-13-3 铁心形状	34
2-13-4 最佳铁心尺寸	34
2-13-5 高温应用	34
2-13-6 温度对铁心损耗的影响	36
2-13-7 温度对激磁电流的影响	37
2-13-8 铁心材料的 600°C 老化试验	37
2-13-9 铁心的涂复	37
§ 2-14 特殊的环境影响	38
§ 2-15 辐射的影响	39
2-15-1 磁性材料	39
2-15-2 变压器	40
2-15-3 绝缘	40
2-15-4 外壳材料	41
§ 2-16 端接材料	44



A 842603

- 1 -

2-16-1 玻璃绝缘子	44	§ 5-11 音频变压器	83
2-16-2 压缩式套管	44	5-11-1 三极管输出变压器	83
2-16-3 金属化陶瓷套管	45	5-11-2 五极管耦合变压器	84
2-16-4 浇注的环氧套管	45	§ 5-12 晶体管变压器	84
第三章 变压器的测试	46	§ 5-13 低压脉冲变压器	86
§ 3-1 机械和环境试验	47	5-13-1 脉冲传输(耦合型)	88
3-1-1 外观检验和机械试验(外部)	47	5-13-2 前沿	88
3-1-2 引出端强度	47	5-13-3 非配	90
3-1-3 密封试验	47	§ 5-14 间歇振荡器变压器	90
3-1-4 介质耐压	48	§ 5-15 高压脉冲变压器	92
3-1-5 感应电压测试	49	5-15-1 脉冲波形	93
3-1-6 绝缘电阻	49	5-15-2 脉冲变压器负载	93
3-1-7 寿命试验	50	5-15-3 脉冲源	93
3-1-8 电晕放电	51	5-15-4 大功率脉冲变压器等效电路	94
3-1-9 温升	52	5-15-5 脉冲前沿特性	95
3-1-10 温度循环与温度冲击	55	5-15-6 脉冲顶部特性	96
3-1-11 震动与冲击	55	5-15-7 脉冲尾部	97
3-1-12 浸泡	55	5-15-8 对线路设计人员来说,需要了解参 数对变压器设计的影响	98
3-1-13 耐燃性	55	第六章 特种变压器的制造	100
3-1-14 外观和机械检查(内部)	56	§ 6-1 需要的防潮保护	101
3-1-15 潮湿电阻	56	6-1-1 气密密封结构	101
3-1-16 绕组的连续性	57	6-1-2 油浸式变压器	102
3-1-17 过载	57	6-1-3 大型油浸式高压变压器	103
第四章 变压器的规范与选择	69	§ 6-2 成本	106
§ 4-1 军用技术规范	69	§ 6-3 工作温度范围	106
§ 4-2 EIA技术条件	71	§ 6-4 重量	107
§ 4-3 国外技术条件	71	§ 6-5 体积	107
§ 4-4 变压器符号	71	§ 6-6 可燃性	107
§ 4-5 标准变压器	72	§ 6-7 其他性能	107
§ 4-6 变压器的选择	73	§ 6-8 充氟化合物液体和气体的小型变压器	108
第五章 电源、音频和脉冲变压器	77	§ 6-9 密封结构	115
§ 5-1 电源变压器	77	6-9-1 环氧树脂	116
§ 5-2 变压器容量	77	6-9-2 硅橡胶	117
§ 5-3 电源频率	78	第七章 电源变压器的设计步序	120
§ 5-4 尺寸	78	§ 7-1 磁通密度	120
§ 5-5 最高工作温度与寿命	79	§ 7-2 电流密度	120
§ 5-6 最高工作温度与重量	79	§ 7-3 铁心外形的最佳值	120
§ 5-7 温升	79	§ 7-4 最小重量和体积	120
5-7-1 影响温升的因素	79	§ 7-5 简化的设计步序	121
5-7-2 温升测量	81	§ 7-6 概述	121
§ 5-8 自耦变压器	81	7-6-1 高温工作	121
§ 5-9 阻流圈	81	7-6-2 设计的补充说明	135
5-9-1 滤波阻流圈	81	7-6-3 制作技术	136
5-9-2 充电电感	82	第八章 变压器的故障	140
§ 5-10 稳压器	83		

§ 8-1 故障率	140	§ 9-1 极高温	148
8-1-1 过高的初级电压	141	§ 9-2 超高温	153
8-1-2 过大的次级电流	141	§ 9-3 承受核辐射的超高温变压器	156
8-1-3 输入频率的波动	141	9-3-1 绝缘系统	156
8-1-4 电晕	141	9-3-2 辐射试验	157
§ 8-2 现场故障	142	§ 9-4 带形线圈变压器	157
§ 8-3 低气压状态下工作	144	§ 9-5 极高温带形线圈变压器	159
§ 8-4 制造中的缺陷	144	第十章 展 望	160
8-4-1 绕组压力	145	§ 10-1 材料	160
8-4-2 出头的连接	145	§ 10-2 铁心玻璃粘合物	160
8-4-3 真空浸渍	146	§ 10-3 技术	161
8-4-4 浇注	147	10-3-1 工作频率	161
8-4-5 外壳	147	10-3-2 寿命	161
8-4-6 安装件	147	参考文献	162
第九章 变压器的实验类型	148		

第一章 变压器工作原理

本书述及的范围，限于电子技术应用的音频、电源和脉冲变压器。不过，铁心变压器的原理和所用零部件，都是类似的。

变压器是一静止的器件，它用来将电能从某一交流电路传输到另一电路，它的频率是不变的，而电压可能是同一电压、较高电压或较低电压。在相应的情况下，它便叫做隔离变压器、升压变压器或降压变压器。

变压器没用可动的零件，具有高效率，也可做各种电压比。后者是由于它的线圈能根据结构需要，加层间绝缘，再以漆、液体或气体的浸渍。

变压器的原理，是基于通过磁路将电能有效地从一个绕组传到另一绕组。一只变压器必须有二个或更多的绕组，其中一个绕组从电源接受能量，它叫做初级线圈，然后通过磁耦合到另一绕组或更多绕组，供给负载以电能，这叫做次级线圈。能量的交换是由于铁心中磁通的变化，它的幅度随时间而变动。图 1-1(a) 是一只简单的变压器，说明了电能从初级传到次级线圈。磁力线通过磁路，环绕铁心耦合到次级线圈。初级的交流电流感应出磁通变化，而在次级，也产生同样的变化。在次级绕组里产生一电动势，这样就使次级供给电能。由于电源频率决定了磁通的变速，所以电能从初级传到次级，它的频率是一样的。

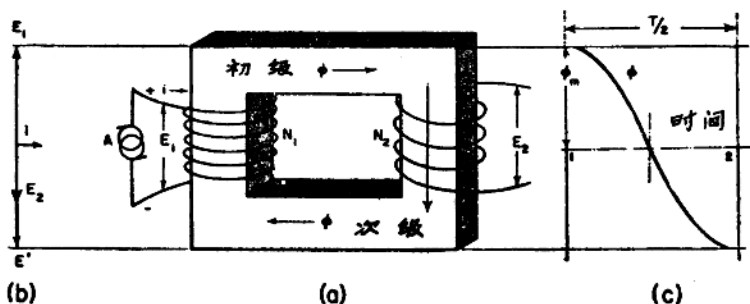


图 1-1 (a)简单变压器，次级开路，(b)变压器的电压关系，(c)磁通随时间的正弦变化

磁路中的磁通量中，叫做互感磁通量，它和初级的所有圈数相耦合，同样的，也和次级的所有圈数相耦合。因此，它在初级和次级都感应出一个电动势。磁路中每一点的磁通量是相同的，它对绕组的每一匝感应出同样的电动势。感应电动势和频率 f ，匝数 N 和最大磁通瞬时值 ϕ_m 成正比。如图 1-1(b) 所示，当电压 E_1 加到变压器的初级绕组 N_1 ，由于高感电路，相应产生的电流 i 是很小的。假使忽略无载损耗(主要是铁心损耗)，无载电流滞后电压 $E_1 90^\circ$ 。由于这电流在铁心中产生磁通 ϕ ，所以叫做磁化电流。这磁通切割初级绕组 N_1 ，从而使初级绕组感应出反电动势 E' 。由于初级绕组的电阻忽略不计， E' 应等于 E_1 。这就是说，

在每周的任何瞬间，由磁通而产生的感应电动势应等于所加电压。因此，电流 i 必须有足够的数值，以产生需要的磁通，通常为额定值的 $1\sim 10\%$ 。在一实际变压器中，虽然磁通恰巧滞后所加电压 90° ，无载电流滞后所加电压略小于 90° （由于各种损耗）。如图 1-1(a) 所示，假使所加电压是正弦波， E' 也必然是正弦波，见图 1-1(c) 所示；磁通的变化，也是正弦的。在这曲线图的点 1 和 2 之间，总磁通的变化是 $2\phi_m$ ，这一变化发生在半周或时间 $T/2$ 秒，这里的 T 是周期或整个一周的时间，因此这时间 $T/2$ 秒是等于 $\frac{1}{2f}$ 秒。平均感应电动势等于总磁通除以时间，

$$E_a = \frac{\phi}{t \times 10^8}, (\text{V}) \dots\dots\dots (1-1)$$

因此，变压器绕组每匝的平均感应电动势为：

$$E_a = \left(\frac{2\phi_m}{\frac{1}{2f}} \right) 10^{-8} (\text{V}) \dots\dots\dots (1-2)$$

$$E_a = 4\phi_m \times f \times 10^{-8}, (\text{V}) \dots\dots\dots (1-3)$$

正弦波每半周的波形系数是有效电压和平均电压之比，也就是 $\frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{\pi}{2} = 1.11$ 。

$$E_e = 1.11E_a \dots\dots\dots (1-4)$$

也可化为：

$$E_e = 4.44\phi_m f \times 10^{-8}, (\text{V}) \dots\dots\dots (1-5)$$

由于线圈的每匝实际上切割同样的磁通， N_1 匝线圈总的有效感应电压是：

$$E' = 4.44\phi_m f N_1 \times 10^{-8}, (\text{V}) \dots\dots\dots (1-6)$$

这一电压在任一瞬间，必须相等和反相于所加电压 E_1 ，因为 E' 是仅有的电压，它限制了线圈的电流。因此，如图 1-1(b) 所示，所加电压 E_1 和 E' 相差 180° ，比电流 i 超前 90° 。

假使 N_2 匝的次级绕组绕在铁心上，它将切割通过它的磁通。假使全部磁力线通过铁心，同时耦合到每一 N_2 匝。由这一磁通量产生电压 E_2 ，它的振幅将按公式 (1-6) 得：

$$E_2 = 4.44\phi_m f N_2 \times 10^{-8}, (\text{V}) \dots\dots\dots (1-7)$$

同样的磁通量产生 E' 和 E_2 ，因此，这电压和次级电压 E_2 是同相的，而和所加电压 E_1 差 180° 。从公式 (1-6) 和 (1-7)，初次级电压和匝数的关系可化成：

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \dots\dots\dots (1-8)$$

因此，初次级的电压比和初次级的匝数比是相同的。在许多场合下，由于损耗很小，可将端电压考虑为感应电动势。但是实际生产的变压器，次级绕组所切割的磁力线并不完全一样，这是因为当有负载时，初级绕组有电压降。所以满载时的电压比，并不完全等于匝数比。

假使磁通量和时间按正弦波变化，那末公式(1-5)中的 $1, 11$ ，必须以实际的波形系数 K_1 来代替。

在某些情况下，采用 MKS 制有很多优点。那末 ϕ_m 的单位用韦伯来表示，用于正弦波的公式(1-6)将变为：

$$E = 4.44 \phi_m f N, (V) \dots\dots\dots (1-9)$$

这可更方便的化成：

$$E = 4.44 N B_m f A \times 10^{-8}, (V) \dots\dots\dots (1-10)$$

式中， $\phi_m = B_m A$ ；

B_m ——最大磁通密度；

A ——铁心截面积。

在很多情况下，这个公式更切实用，这是因为变压器铁心对某种材料的设计，总是基于最大磁通密度的允许值。

§ 1-1 电流和匝数的关系

如前所述，初级绕组的无载电流仅假定为磁化电流 i ，它滞后于所加电压 $E_1 90^\circ$ ，与磁通 ϕ 同相。在实际的变压器里，必须考虑无载损耗(主要是铁心损耗)。因此实际无载损耗或激磁电流 i_1 大于 i ；相对地说，它是较小的，约滞后 $70 \sim 80^\circ$ 。这一电流的振幅，在不同的变压器中，有很大的变化，一般为满载电流的 $1 \sim 10\%$ 。这一无载电流由两部分所组成：有功部分 $i_p = i_1 \cos \theta$ ，当乘以初级电压后，这就是无载功率。此外是无功部分 $i = i_1 \sin \theta$ ，它是磁化电流、用以产生磁通 θ 。这角度 θ 是所加电压和无载电流 i_1 间的相位差。

如图 1-2(a) 所示，当次级电路闭路的时候，就产生电流 I_2 ，它的数值决定于电路的总阻。楞次定律说明电流 I_2 的方向和所产生的磁通相反。这一电流倾向于减小磁通 ϕ ，减小初级电路的反电动势，而容许更多的电流通过。这增加的初级电流 I_1 流经的方向，促使磁通 ϕ 的增加，以补充磁通 ϕ 到接近于原始数值。加一负载到变压器次级的实际使用结果，使初级从电源接受相当于次级需要的功率。

在次级负载的情况下，变压器铁心有

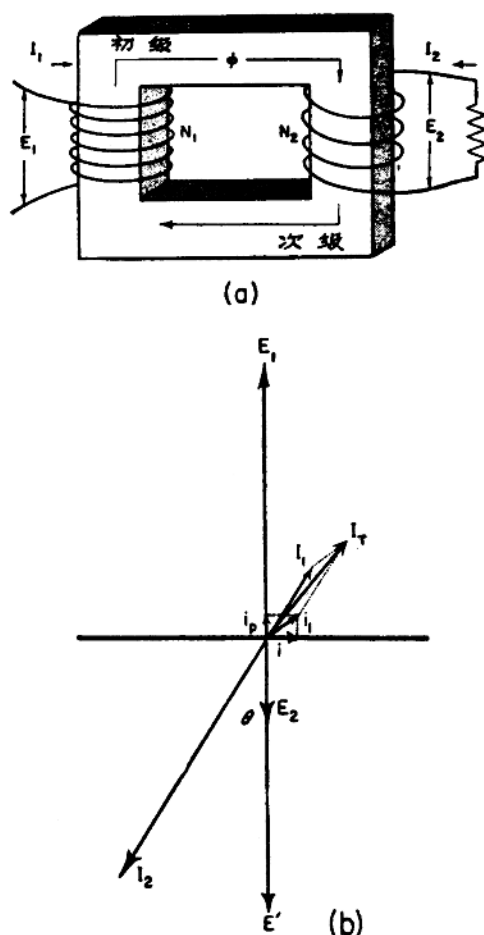


图 1-2 (a)简单变压器，次级负载，
(b)变压器的电流关系

三部分磁化力:

- (a) $N_2 I_2$ 安匝——次级负载电流;
- (b) $N_1 I_1$ 安匝——初级负载电流;
- (c) $N_1 i$ 安匝——初级磁化电流。

磁动势(a)将减弱磁通量,而(b)将增强磁通量。这两磁通势振幅相等,而效应相反,而让磁通势 $N_1 i$ 产生磁通量 ϕ 。变压器绕组的相对低等效阻抗,允许只有一极小电压,就能使满载电流通过绕组。因此,满载时初级所产生的反电动势,仅略小于无载时的反电动势。假使电动势实际保持恒值的话,反电动势决定于磁通量 ϕ ,它在满载时必须仅略小于无载时。对恒压变压器来讲,在全负载时,通常假定磁通量 ϕ 是一恒值。如上所述,电流比是 $N_1 I_1 = N_2 I_2$,那末

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \dots\dots\dots (1-11)$$

也就是说,电流和匝数成反比。这好象是说,初级负载电流 I_1 将在初级绕组产生一很大的电抗性降压,因为这一绕组是高电感性的。这就说明,假使电流 I_1 产生些磁通,但是如前所述,假使漏磁忽略不计,由 I_1 所产生的磁通,将被次级电流 I_2 所抵消,因此,没有那些电流将在绕组里产生电感性的降压。

在一只实际变压器里,如图 1-2(b)所示,初级和次级都有一点电感性降压,因为两磁通势不能完全相互抵消。在这一图里,由于绕组的电阻和电抗所产生的降压是忽略不计的。取 $\cos \theta$ 为次级负载的功率因数, I_2 将和 E_2 反相 θ 度。相应的初级电流 I_1 可从圈数比公式(2-11)来决定,它和 I_2 相差 180° 。总的初级电流 I_t 为 i_1 和 I_1 的向量和;但是,由于 i_1 很小,几乎和 I_1 差 90° ,初级绕组的总电流,几乎等于 I_1 ,初级绕组的功率因数接近于次级的。在负载的变压器里,实际上假定初级绕组的功率因数和负载的功率因数相同。从这种情况来看,一只变压器可看作一种装置,它把能量从一个电路变换到另一电路而不改变功率因数。

§ 1-2 漏 感

如前所述,都假定没有漏磁,也就是说,由初级绕组产生的全部磁通都耦合到或切割次级绕组的所有匝数。但是在实际变压器里,这是不真实的。变压器磁通的实际分布情况如图(1-3a)所示,这和图(1-1a)所示理想变压器是一对比。初级的安匝 $N_1 I_1$ 并没有全部被次级所抵消。这磁通 ϕ_1 环绕初级绕组,而没有经过次级;因此,这磁通 ϕ_1 在初级绕组造成了电抗性降压。同样的,电流 I_2 造成了磁环 ϕ_2 ,它不和初级相耦合,因此在次级绕组造成了电抗性降压。这些漏磁 ϕ_1 和 ϕ_2 的效应,如图 1-3(b)所示,相当于在初次级电路里,引入了电抗 X_1 和 X_2 。在电源变

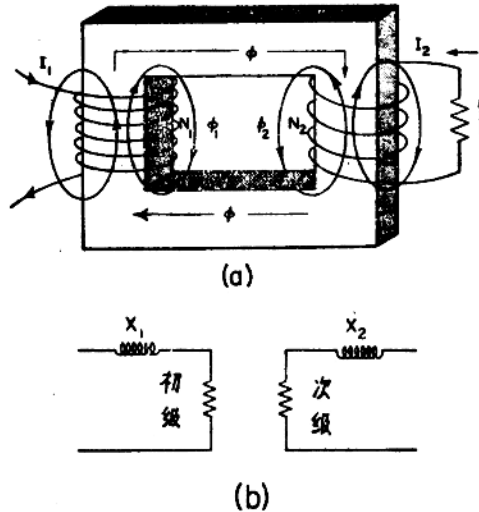


图 1-3 (a)简单变压器中的漏磁, (b)等效电路中漏磁效应

压器实际设计工作中,为了使完全负载情况下,保持原有输出电压,必须使漏感做到最小值。为了保证低漏电抗,初次级在必需的情况下,尽可能靠近。在变压器的结构里,通常不如图 1-1(a), 1-2(a) 和 1-3(a) 所示,将初次级分别放在铁心的两腿上,而如图 1-4 所示那样排列。

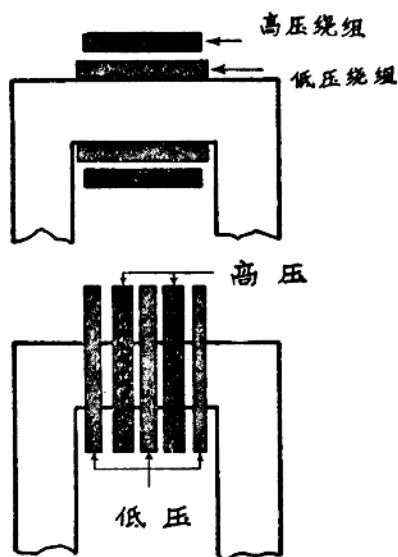


图 1-4 变压器线圈的安排

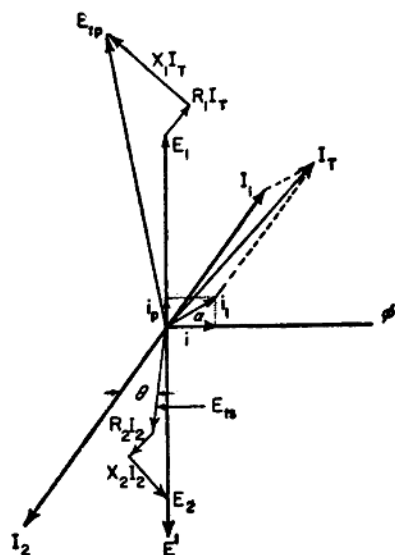


图 1-5 变压器的向量图

§ 1-3 变压器的向量图

图 1-5 所示,是一实际变压器的向量图,初级所加电压的一部分 E_{1p} 被耗用在克服因初级电阻 R_1 和电抗 X_1 所造成的压降。 E_1 必须为等值反相的 E' (自感应产生的反电动势) 所平衡。在任一瞬间,必须有足够的激磁电流产生磁通 ϕ , 以便感应出电压 E' 相等于 E_1 。这磁通 ϕ 也感应出次级电压 E_2 , 这一数值决定于匝数比。类似于初级,电压 E_2 的一部分也由于次级电阻 R_2 和漏感 X_2 而损失,而剩余次级端电压 E_{2s} 。无载电流 i_1 是由磁化电流分量 i 和有功电流分量 i_p (供给变压器的铁心损耗) 所组成。初级的总电流 I_1 是 i_1 和 I_1 的向量和, I_1 是由次级电流按公式 (1-11) 的匝数比所反射到初级的电流。电流 I_1 随着次级负载电流 I_2 而变化,但是 i 经常保持恒值,同时只为满载情况下的百分之几。因此,初级总电流 I_1 几乎和 I_2 成正比,而相差接近 180° 。由于初次级电阻和电抗所造成的压降只有端电压的很小百分值,在全负荷下,它的端电压 E_{1p} 和 E_{2s} 通常是恒值,同时两者相差 180° 。

§ 1-4 等效电路

图 1-5 所示,是两个绕组的电压损失。这些损失是由于电阻和漏感所造成。在变压器计算中,可以很方便的假定绕组之一具有零电阻和零电抗,而另一个绕组具有电阻和电抗而得到相同的电压损失。图 1-6(a) 是这样一只变压器的等效电路。当次级假定为零电阻时,初级电路的电阻必须增加适当数量 R_s , 以便使变压器总电压损失保持不变,次级端电压 E_{2s} 仍和实际变压器中的一样。由于次级绕组的电阻而产生的压降 $E_R = -R_2 I_2 V$ 。反射到初级的等效

次级压降是 $F_R = -R_3 I_1$, 这里 R_3 的数值是在 $R_2 = 0$ 时, 而仍能得到同样的次级电压 E_{1s} 。
 E_R 和 E_{R_s} 必须和变压器的圈数成比例。那末

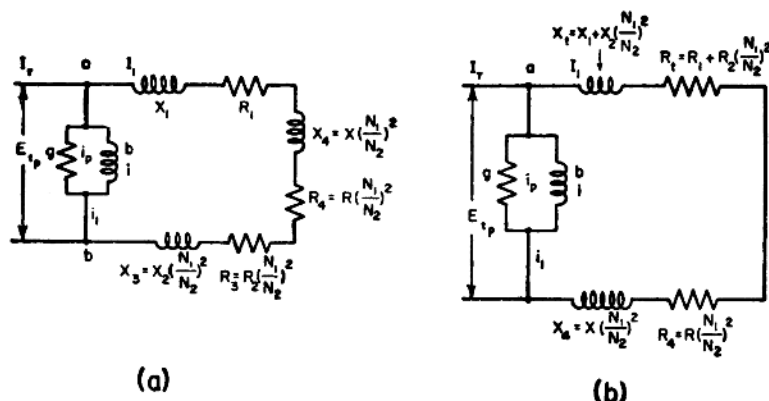


图 1-6 变压器的等效电路

$$E_{R_s} = -R_3 I_1 = E_R \left(\frac{N_1}{N_2} \right) = -R_2 I_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)$$

由于

$$I_2 = I_1 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)$$

可以化出, 等效次级电阻反射到初级时则为:

$$R_3 = R \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (1-12)$$

同样, 等效次级漏感抗反射到初级时为:

$$X_3 = X_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (1-13)$$

同样的方法可用于代表次级负载。因此 $-I_2$ 安的负载, 滞后功率因数 $\cos \theta_2$ 可以用电阻 R 和电抗 X 来表示, 这样

$$\cos \theta_2 = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}}$$

这负载是等效于一电阻压降 $E_2 = -I_2 R$ 和一电抗压降 $E_x = -I_2 X$ 。那末可以化出反射到初级的等效电阻和等效电抗是:

$$R_4 = R \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (1-14)$$

$$X_4 = X \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (1-15)$$

如图 1-6(a) 所示的电路将提供如同原有变压器一样的总负载电阻。通过这一电路的核对, 在初级测量到的变压器总电阻是:

$$R_t = R_1 + R_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \dots\dots\dots (1-16)$$

那末, 可以化出总漏感是:

$$X_t = X_1 + X_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \dots\dots\dots (1-17)$$

因此, 变压器在负载时, 可用图 1-6(b) 来表示, 此图可用来对电压调整率进行便利地计算。

图 1-7 所示的短路试验, 可用于决定 R_t 和 X_t 。次级如图示予以短路, 在初级绕组加一适当电压 (通常是正常电压的 4~10%), 使初级得到满载电流 I_1 。由于满载次级阻抗压降只占次级端电压的很小百分数, 铁心的磁化电流可以忽略不计。所以初次级两绕组都通过它们的额定电流。图 1-7 所示的功率表读出变压器的输入功率; 由于那里并没有输出, 全部都是变压器损耗。在短路情况下, 铁心损耗很少, 可以忽略不计, 从功率表读出的功率, 可以看作是两绕组的铜耗 (由于初级和次级都通过额定的电流)。反射到初级的总等效电阻可从功率表的读数作如下计算,

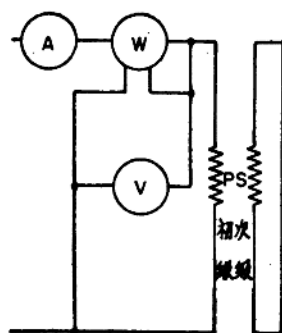


图 1-7 变压器的短路试验

$$R_t = R_1 + R_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 = \frac{P}{I_1^2} \dots\dots\dots (1-18)$$

总等效阻抗可直接从电流表和电压表的读数直接算出:

$$Z_t = \frac{E_2}{I_1} = \sqrt{R_t^2 + X_t^2} \dots\dots\dots (1-19)$$

总等效漏感很容易地计算出来。两绕组之一都可以短路来进行这一阻抗试验。一般情况下, 以短路低电压绕组为最便利和正确, 这是因为从高压绕组可以读得较高的 E_2 和较小的 I_1 , 也便于使用通用的仪表。

§ 1-5 电压调整率

变压器的电压调整是指初级电压保持恒值, 次级电压在无载和满载下的变化。调整率的百分值是基于一满载电压。大型配电变压器的电压调整通常仅稍大于电压降。在功率因数为 1 的情况下, 调整率范围约为 1~2.5%; 但是小型的电讯变压器约为 5~25%, 它的数值决定于设计和工作温度范围。经验告诉我们, 在一般情况下, 60 Hz 变压器在 250 VA 以下和 400 Hz 变压器在 50 VA 以下, 它的大小, 决定于电压调整率。如要求较好的调整率, 就必须采用较大的尺寸。对较大的 VA 值, 外型的大小, 决定于工作温度范围。一个良好的设计, 对线圈工作温度在 200°C 或以下的, 电压调整率最大为 10%; 200°C 以上者为 15%。当变压

器负载的功率因数从1变到滞后时,如阻抗压降和满载端电压同相,电压调整率将达到最大值。当功率因数变为超前时,电压调整率将小于1;减到零,最后变成负;因此将形成满载电压超过无载电压。高压变压器的电压调整率较同功率的低压变压器为大,这是因为要达到足够电介质强度的要求,而加大初次级的间隔(厚度),从而增加了漏感。

变压器的调整率可从短路试验的总等效电阻和漏感计算而得。假使初级电流是 I_p ,那末总等效电阻压降为 RI_p ,总等效感抗压降为 XI_p 。

§ 1-6 变压器损耗和效率

变压器的各种损耗,可作如下的定义:

- (a) 初级铜耗 $=I_p^2 R_p$;
- (b) 次级铜耗 $=I_s^2 R_s$;
- (c) 铁心损耗:

- (1) 磁滞损耗;
- (2) 涡流损耗。

初次级感抗造成的电压降,并没有消耗能量。磁滞和涡流损失是由于铁心里的交变磁通,这决定于频率和磁通密度。磁滞损耗可按下式计算:

$$\text{磁滞损耗} = K_h f B_m^x, (W) \dots\dots\dots (1-20)$$

式中, K_h ——取决于材料的常数;
 B_m ——铁心的最大磁通密度, Gs;
 f ——电源频率, Hz;
 $x=1.6\sim 2$ 。

涡流损耗可按下式计算:

$$\text{涡流损耗} = K_e B_m^2 f^2 t^2, (W) \dots\dots\dots (1-21)$$

式中, K_e ——决定于材料的常数;
 B_m ——铁心最大磁通密度, Gs;
 f ——电源频率, Hz;
 t ——铁心片厚度。

恒压变压器的铁心损耗,通常是一恒值,它可以在次级无载情况下,很容易测得输入功率。无载情况下的小量初级铜耗,可以略而不计。铜耗随着负载电流的平方而变化,这是因为端电压几乎是一恒值,铜耗可视为与负载平方成比例。变压器的效率是:

$$\eta = \frac{\text{输出}}{\text{输入}} = \frac{\text{输出}}{\text{输出} + \text{损耗}} \dots\dots\dots (1-22)$$

一般情况下,都假定在功率因数为1时计算效率。在其它功率因数时,效率将低于功率因数为1时,这是因为功率输出在同样损耗下将要减少。

第二章 电子变压器材料

电子变压器用的材料可分为五大类:

- (a) 绝缘材料;
- (b) 铁心材料;
- (c) 导体材料;
- (d) 外壳材料;
- (e) 端接材料。

对各种不同结构来说, 这些分类之间, 并无明显的界限。例如密封变压器的外壳, 既是绝缘系统部分, 而在某些情况下, 又是端接设计部分。这样划分虽不精细, 但对叙述变压器材料这个目的来说, 还是比较满意的。

§ 2-1 绝缘材料

这些材料常用在变压器的各个部分, 以构成绝缘系统。根据变压器的设计要求, 这种绝缘系统必须在层与层、匝与匝、绕组与绕组和绕组与接地(外壳和铁心)之间提供所需的介电强度和泄漏电阻。这系统还包括浸渍、封装、填充和密封材料作为补充绝缘。工作温度的上限通常是由系统中绝缘的耐热等级来决定。大多数绝缘材料是有机的, 因此容易受氧化和热解作用的影响。有机绝缘材料的寿命随着绝对温度的倒数而呈对数变化, 这可用 Arrhenius 方程来表示:

$$L = A(e^{b/T} - 1) \dots \dots \dots (2-1)$$

式中, L 是寿命(小时), T 为绝对温度, A 和 b 是经验常数。

根据这一关系式可知, 温度每升高 10°C , 寿命缩短一半。这种关系见图 4-1 所示。按照规定温度下的寿命, 可将变压器用绝缘材料分为三组。这个标准是说, 在规定最高工作温度下, 绝缘系统必须具备变压器寿命所要求的足够绝缘电阻和介电强度。

(1) 105°C 组——浸渍过、涂复过或浸过适当介质(如油)的棉、丝和纸等材料或其材料的组合物。至于其它一些材料, 只要在 105°C 及电压应力下, 经过试验, 证明它最短有 10000 小时寿命的, 也可列入本组范围。

(2) 130°C 组——具有良好粘结表面的云母、玻璃纤维和石棉等材料或其材料的组合物。至于其它一些材料, 只要在 130°C 及电压应力下, 经过试验, 证明它最短有 10000 小时寿命的, 也可列入本组范围。优质的电缆纸也可视为这一类的例子, 因为这些优质纤维材料在 130°C 时的寿命超过 10000 小时, 也可列入本组范围。

(3) 200°C 组——硅有机树脂、云母、玻璃纤维、石棉、聚四氟乙烯和其它含氟化合物等材料或材料的组合物。其它一些材料或材料的组合物, 经过试验, 证明它最短有 10000 小时寿命的, 也可列入本组范围。在 180°C 下证明有 20 年寿命的, 也可认为与此材料等效。

总的说来，这种分组与美国电机工程师学会(AIEE)的标准 № 1 中的 A, B, H 级相符合。
 变压器绝缘材料按耐温等级分类见表 2-1 所示。

表 2-1 变压器绝缘材料的耐温等级

应 用 和 材 料	温度极限°C (2000 小时寿命)						备 注
	105	130	200	300	350	600	
I. 导线绝缘							
1. 酚醛清漆————→							3. 具有二层聚四氟乙烯的无机陶瓷。
2. 环氧清漆————→							
3. 聚四氟乙烯被复陶瓷————→							
4. 单层玻璃(硅有机树脂处理)————→							
5. 聚脂清漆————→							
6. 瓷漆————→							
7. 硅有机树脂漆————→							
II. 导 线							
1. 铜线————→							1. 超过 225°C 时, 铜需要阻挡材料, 以防止永久性的变化。 2. 350°C 时 只适用于具有充气控制的环境防护式样。
2. 镀镍铜线————→							
3. 铝线————→							
4. 银线————→							
III. 层与层间绝缘							
1. 电缆纸————→							1. 表面结构良好, 易于浸渍。厚度 0.007—0.002 吋。 2. 表面光滑, 不能浸渍。厚度 0.00015—0.005 吋。 3. 皂溶性表面, 不能浸渍。厚度 0.00025—0.005 吋。 4. 材料不均匀, 可以浸渍。厚度 0.003—0.02 吋。大多用 0.003 吋。 5. 用于 350°C, 有机硅处理的金云母或白云母的云母纸。高温时以金云母为好。厚度为 0.001—0.005 吋。 6. 具有有机硅处理薄膜的云母粉, 局部熟化。用涂复增加韧性、挠性而减小裂化, 提供粘性的表面。厚度为 0.001 吋。因尺寸限制, 线圈不能多层绕制。 7. 环氧或有机硅浸渍的玻璃布, 它的介电强度, 差不多完全决定于树脂。
2. 玻璃纤维布(“Mylar”)*————→							
3. 聚四氟乙烯薄膜(“Teflon”)*————→							
4. 石棉纸(有机硅浸渍)————→							
5. 云母纸————→							
6. 裂介云母————→							
7. 玻璃纤维布 (“Fiberglas”)*————→							
8. 玻璃纤维布 (“PYRE-M.L.”)*————→							
9. 玻璃纸(尼龙纸 “Nomax”)*————→							
IV. 浸渍材料							
1. 酚醛清漆————→							6. MgO, Al ₂ O ₃ 和 AlPO ₄ 的混合物。
2. 有机硅清漆————→							
3. 环氧树脂————→							
4. 硅橡胶————→							
5. 地腊————→							
6. 耐火陶瓷————→							

续 表

应 用 和 材 料	温度极限°C (2000 小时寿命)						备 注
	105	130	200	300	350	600	
V. 填充材料							
液体的							
1. 矿物油	→						
2. 非易燃性合成绝缘油(Askarel)	→						
3. 有机硅液体		→					
固体的							
4. 氧化镁	→	→					
5. 耐火陶瓷	→	→			→		5. MgO, Al ₂ O ₃ 和 AlPO ₄ 的混合物。
6. 黑色沥青	→						
7. 热固性材料	→						
8. 石英粉							8. SiO ₂ —99.77%, Al—0.083%, Ti—0.014%。
气 体							
9. 氮(N ₂)					→		
10. 全氟乙烷(C ₂ F ₆)				→			10. 沸点 102°C
11. 六氟化硫(SF ₆)		→					
12. 全氟环醚(C ₃ F ₈ O)		→					12. 沸点 177°C。将这些液体混合,可制成沸点超过上述范围的特别液体。
13. 全氟三丁胺(C ₄ F ₉) ₃ N		→					
VI. 密封材料							
1. 环氧树脂	→	→					1. 最广泛使用的材料,用于具有数量变化的负载之变压器。
2. 聚酯树脂	→	→					
3. 硅橡胶	→	→	→				3. 填以玻璃,以防止在 200°C 以上对碎裂。
VII. 底筒材料							
1. 电缆纸	→						1. 油漆浸渍
2. 石棉纸	→	→					2. 有机硅漆浸渍
3. 云母纸					→		3. 有机硅漆浸渍
4. 玻璃带					→		
5. 阳极氧化处理的铝				→			
VIII. 扎绳材料							
1. 有机硅处理的石棉玻璃				→			
2. 未处理的玻璃丝					→		
IX. 外包材料							
1. 油漆葛纹纸	→						1. 厚度为 0.005—0.01 吋
2. 涂胶青壳纸	→						2. 厚度为 0.005—0.015 吋

* 商品的商标或牌号

绝缘材料的作用，一般是使二个或多个导体之间保持电绝缘。但是机械、化学、热学和成本等，都是变压器设计中所必须考虑的因素。绝缘材料在各种条件下易受电气和机械上的老化，由于变压器的有效寿命取决于这种老化，故了解这些情况是必要的。

§ 2-2 介电强度

介电强度是能够承受而不致击穿的电位梯度(击穿电压除以材料厚度)。该值用以表明样品两端的电位(伏)或电位梯度。按照美国材料试验协会 (ASTM) 标准试验条件所刊载的数据，是进行材料比较的主要方法。由于可变因数多，在特定设计时所需的介电强度，必须仔细决定。使用电压的比例、电场均匀性、含水量、绝缘老化特性以及其它各种因素，均影响介电强度。

2-2-1 电 场

绝缘很少在均匀的电场里使用，往往位于因边缘效应或接地点造成畸变的非均匀的电场中使用。在非均匀点上，非均匀电场将会使绝缘受到超过平均电场强度的局部场强的影响。

电位梯度的这种集中，通常发生在导体表面的尖锐点或不规则的峰值上，它会导致电离和电晕。

一般电气结构的电位梯度能使得出分析上的解答，然而这种最大梯度的许多计算不是太困难，就是太烦复。

同轴电缆(同心圆筒)最大电压梯度的推导如下：

$$E \text{——电场强度} = \left. \frac{dv}{dx} \right]_{\max};$$

V ——电位降；

A ——面积；

ψ ——电通量；

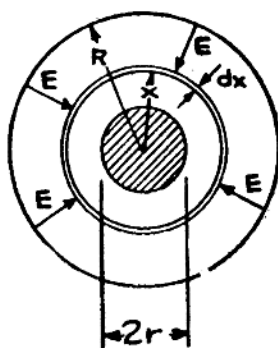
D ——电通密度 $= \psi/A$ ；

ϵ_0 ——自由空间的介电常数；

ϵ_r ——媒质的相对介电常数；

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r.$$

根据半径为 x 的圆柱体：



$$\psi = \int (D \cos \theta) da$$

因为电通线是从圆柱体表面径向地发出的； $\theta = 90^\circ$

$$\psi = \int (D \cos 90^\circ) da = D \int 2\pi dx = D 2\pi x$$

$$(1) \psi = D 2\pi x$$

$$D = \epsilon_0 \epsilon_r E$$

$$(2) E = \frac{\psi}{\epsilon 2\pi x} \text{ (根据方程 (1) 而得)}$$

$$E = \left. \frac{dv}{dx} \right]_{\max}$$