



中华人民共和国海船船员适任考试培训教材

交通运输类“十四五”创新教材

符合《海船船员培训大纲（2021版）》要求
《海船船员考试大纲（2022版）》



轮机专业

船舶电气与自动化 (船舶电气) (二/三管轮)



中国海事服务中心

组织编审

张春来 王海燕 孙立新 © 主编



大连海事大学出版社
DALIAN MARITIME UNIVERSITY PRESS



1. 铁芯

铁芯是变压器的主磁路,又作为绕组的支撑骨架。铁芯分为铁芯柱和铁轭两部分,铁芯柱上装有绕组,铁轭是连接两个铁芯柱的部分,其作用是使磁路闭合。为保证有足够的磁通密度,需要选择高性能的导磁材料作为铁芯,同时考虑主磁路结构的可靠性,而且要避免产生涡流,常使用矽钢片作为铁芯的主要材料。在高频中常用磁导率更高的铁氧体材料。

2. 绕组

绕组是变压器的电路部分,常用绝缘铜线(漆包线)或铝线绕制而成,近年来,还有用铝箔绕制的。为了使绕组便于制造和在电磁力作用下受力均匀以及机械性能良好,一般电力变压器都把绕组绕制成圆形的。

3. 冷却方式

由于变压器中无转动部分,在能量传递过程中的损耗主要为铜损和铁损两部分,一般效率都很高,大多数在 95% 以上,大型变压器的效率可达 99% 以上。变压器产生的损耗通过冷却来降低温度,变压器最常见的冷却方式有两种:一是利用其自身周围空气流通而自行冷却的干式变压器;另一种是将变压器浸在变压器油中,利用油的对流进行冷却的油浸式变压器。为了避免变压器油可能带来的火灾隐患,目前船舶电力系统中都采用干式变压器。

图 2-2 是常见的几种变压器的电路符号图。

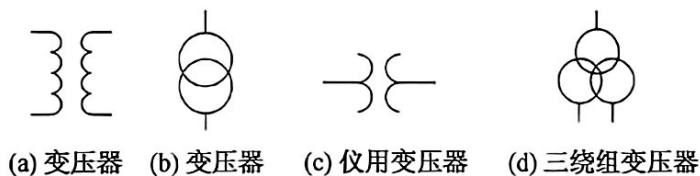


图 2-2 常见的几种变压器的电路符号图

(二) 变压器的铭牌

变压器的铭牌上标出了一些表征其运行性能的额定参数,主要有:

(1) 额定容量 S_N : 变压器的额定视在功率,单位为伏安(VA)或千伏安(kVA)。由于变压器的效率较高,通常原、副边的额定容量可认为近似相等,原、副边的功率也近似相等。

(2) 额定电压 U_{1N}/U_{2N} : U_{1N} 为原边输入电压(即电源电压)的额定值; U_{2N} 是在原边接额定电压时,副边开路时其输出的端电压。对于三相变压器, U_{1N} 、 U_{2N} 均为线电压。

(3) 额定电流 I_{1N}/I_{2N} : 分别为原、副边的额定电流值。

在忽略变压器自身损耗的情况下,以上三者的关系为:

$$(单相变压器) \quad S_N = U_{2N} I_{2N} \approx U_{1N} I_{1N} \quad (2-1)$$

$$(三相变压器) \quad S_N = \sqrt{3} U_{2N} I_{2N} \approx \sqrt{3} U_{1N} I_{1N} \quad (2-2)$$

此外,变压器铭牌上通常还标注有额定频率、额定效率、温升、三相接法等参数。

(三) 变压器的工作原理

变压器作为一个能量传递装置,从电路角度来考虑,具有双重的特性:对原边所接的电源来说,变压器相当于一个负载;对于副边所接的负载来说,变压器又相当于一个带有内阻抗的电源。

1. 变压原理

在图 2-1 中,匝数为 N_1 的原边绕组与交流电源连接,匝数 N_2 的副边绕组经过开关 Q 与负



载阻抗 Z_L 连接。当开关 Q 断开时,副边绕组中的电流为零,变压器处于空载运行状态。

设原边绕组所接电源电压的有效值为 U_1 ,其频率为 f 。在 U_1 的作用下,原边绕组中有电流 I_0 流过。 I_0 称为空载电流,它将在原边绕组中产生励磁磁势 $I_0 N_1$,该磁势使闭合的铁芯产生磁通 Φ 。由于磁通 Φ 分别与原、副边绕组环链,根据电磁感应定律,原、副边绕组中将分别产生感应电势 E_1 和 E_2 。根据楞次定律, E_1 和 E_2 值分别为

$$E_1 = 4.44fN_1\Phi_m \quad (2-3)$$

$$E_2 = 4.44fN_2\Phi_m \quad (2-4)$$

式中, Φ_m 为磁通 Φ 的最大值。

原边绕组中的感应电势 E_1 是自感电势,若忽略原边绕组的铜电阻以及漏磁通引起的阻抗压降,则 E_1 与 U_1 在数值上相等,即 $E_1 \approx U_1$,但 E_1 与 U_1 相位相反;副边绕组的感应电势则为互感电势,在绕组输出端开路时, $I_2=0$,则 $U_2=E_2$ 。由此可得原、副边绕组的电压比为

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{4.44fN_1\Phi_m}{4.44fN_2\Phi_m} = \frac{N_1}{N_2} = K$$

即
$$U_2 = \frac{N_2}{N_1}U_1 = \frac{U_1}{K} \quad (2-5)$$

式中, K 为变压器原、副边绕组的匝数比,也称为变压比或变比。

式(2-5)表明,当数值为 U_1 的交流电源加于变压器的原边绕组时,通过电磁感应作用,可在副边得到一个同频率的新的交流电源,该电源的电压值 U_2 的大小取决于变压器原、副边绕组的匝数比。由此可见,只要选择适当的匝数比,即可通过变压器把某一个交流电压变成同频率电压所需的任意数值。

2. 变流原理

变压器通常用作变压元件,但是变压器的变流体现最明显的就是常用的电流互感器,其原理就是根据变压器的变流原理制成的。

根据变压器负载运行的磁势平衡方程式 $\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_0 N_1$,在忽略空载电流 I_0 时,原、副边绕组中电流的大小关系为 $I_1 N_1 \approx I_2 N_2$,即

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2 = \frac{1}{K} I_2 \quad (2-6)$$

式(2-6)表明,在变压器原、副边绕组匝数比一定时,原边电流与副边电流成正比,这就是变压器的变流原理。

3. 阻抗变换原理

根据变压器的变压、变流原理可知,当副边接上负载 Z 时,经过变压器,可以将这个阻抗等效到原边,如图 2-3 所示。

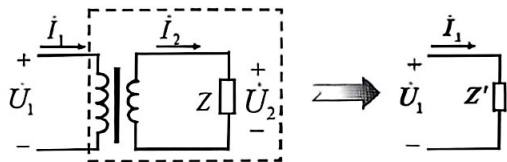


图 2-3 阻抗变换原理

即从输入端看进去,其值为



$$|Z'| = \frac{U_1}{I_1} = \frac{KU_2}{I_2/K} = K^2 \frac{U_2}{I_2} = K^2 |Z| \quad (2-7)$$

由此可见,变压器一次侧的等效阻抗模为二次侧所带负载的阻抗模的 K^2 倍。对于一个阻抗值已经确定的负载,采用一个适当变比的变压器进行阻抗变换,可得到所需的任意阻抗值。例如,根据电路原理,当负载电阻与信号源内阻相等时,该信号源的输出功率为最大。因此对于一个低阻值的负载,可通过变压器进行阻抗变化后,使之与信号源的内阻相等或接近,从而获得最大输出功率。

(四) 变压器的外特性及电压变化率

变压器的外特性定义为原边加额定电压、副边负载功率因数 $\cos\varphi_2$ 一定时,副边端电压随负载电流变化的关系,即 $U_2=f(I_2)$ 。根据变压器的基本工作原理,变压器就相当于一个带有内阻抗的电源。由于负载电流将在变压器内阻抗上形成压降,因此当负载电流变化(即 Z_L 变化)时,变压器的输出端电压也将随之发生变化,且电压的变化不仅与负载电流的大小有关,还与相位有关。图 2-4 给出了变压器在不同性质负载下的外特性曲线。

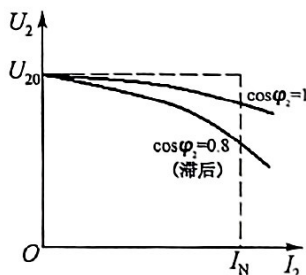


图 2-4 变压器在不同性质负载下的外特性曲线

变压器的电压变化率定义为

$$\Delta U\% = \frac{U_{2N} - U_2}{U_{2N}} \times 100\% \quad (2-8)$$

电压变化率是衡量外特性的一个具体指标,表征了输出电压的稳定性,一定程度上反映了变压器的供电质量。由于变压器的铜阻及漏抗很小,因此变压器的电压变化率一般很小,为 4%~6%。

(五) 变压器的效率

变压器存在两部分损耗,一个是绕组导线电阻通过电流后产生的损耗,称为铜损 (ΔP_{Cu}); 一个是铁损 (ΔP_{Fe}), 包括由磁滞现象引起铁芯发热而造成的磁滞损耗和由交变磁通在铁芯中产生的感应电流(涡流)造成的涡流损耗。为减少磁滞损耗,需要选择优质铁芯材料。为减少涡流损耗,铁芯一般由导磁钢片叠成。

变压器二次侧输出的功率与一次侧电源的供电功率之比为变压器的效率 η , 而一次侧功率中含有各种损耗。变压器的效率为 $\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe}}$, 一般 $\eta \geq 95\%$, 负载为额定负载的 50%~75% 时, η 最大。

二、三相变压器的组成与应用

在陆地电力系统中,无论是发电设备还是用电设备(除照明及其他生活用电以外)大都采用三相交流电制,在电力传输过程中需要进行三相电压变换。采用三相三线制的交流船舶电