

变压器及其应用 - 知识点详解

第一部分：变压器基础

1. 变压器概述

• 定义与功能

- 变压器是一种基于电磁感应原理的静止电气设备，用于将一个等级的交流电压和电流，转换成同频率的另一个等级的交流电压和电流。
- 它的核心功能是**改变交流电压等级和传递电能**。能量的传递是通过变化的磁场作为媒介实现的，其原边（一次）绕组和副边（二次）绕组在电气上是相互绝缘的。

• 基本结构

- **铁心**：构成变压器的主磁路。通常由导磁性能良好的硅钢片叠压而成，片间相互绝缘，以减小交变磁场在铁心中产生的涡流损耗。
- **绕组**：变压器的电路部分，通常由绝缘导线绕制而成。连接电源的绕组称为**原边绕组**，连接负载的绕组称为**副边绕组**。

• 主要分类

- **按用途**：电力变压器、电源变压器、仪用变压器（如电压互感器、电流互感器）、隔离变压器等。
- **按相数**：单相变压器、三相变压器。
- **按铁心形式**：可分为心式变压器和壳式变压器。

第二部分：变压器工作原理与公式推导

1. 理想变压器的电磁关系

• 感应电动势公式推导

- 设穿过铁心的主磁通 ϕ 按正弦规律变化，其瞬时表达式为：

$$\phi(t) = \Phi_m \sin(\omega t)$$

其中 Φ_m 是磁通的最大值（峰值）， $\omega = 2\pi f$ 是角频率。

- 根据法拉第电磁感应定律 $e = -N \frac{d\phi}{dt}$ ，原边绕组（匝数为 N_1 ）中感应的电动势 e_1 为：

$$e_1(t) = -N_1 \frac{d(\Phi_m \sin(\omega t))}{dt} = -N_1 \omega \Phi_m \cos(\omega t) = N_1 \omega \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ)$$

这表明感应电动势的相位滞后于主磁通 90° 。

iii. 电动势的峰值 $E_{1m} = N_1 \omega \Phi_m = 2\pi f N_1 \Phi_m$ 。其有效值 E_1 为峰值除以 $\sqrt{2}$:

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} \approx 4.44 f N_1 \Phi_m$$

iv. 同理，副边绕组（匝数为 N_2 ）的感应电动势有效值 E_2 为：

$$E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_m$$

• 变压比 (变比) k 的推导

- 在理想情况下（忽略绕组电阻和漏磁），原边外加电压 U_1 的有效值约等于感应电动势 E_1 ，副边空载（开路）时的端电压 U_2 等于 E_2 。
- 将上述两个电动势有效值公式相除，可以得到电压比，即定义为变压比 k :

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{4.44 f N_1 \Phi_m}{4.44 f N_2 \Phi_m} = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_2}$$

• 电流比的推导

- 理想变压器输入功率等于输出功率，即 $P_1 = P_2$ ，或 $U_1 I_1 = U_2 I_2$ 。
- 整理上式可得电流与电压的关系：

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{k}$$

这表明，原、副边电流之比与匝数比成反比。

2. 实际变压器的工作分析

• 磁通的组成

- **主磁通 (Φ_0)**: 同时穿过原、副边绕组的磁通，是传递能量的主要媒介。
- **漏磁通 ($\Phi_{1\sigma}, \Phi_{2\sigma}$)**: 仅与自身绕组闭合而不经过对方绕组的磁通。它会产生漏感电动势，在电路中表现为漏电抗压降，是一种损耗因素。

• 空载运行

- **定义**: 副边开路，原边施加额定电压的状态。
- **空载电流 (I_0)**: 此时原边流过的电流，数值很小。它包含两个分量：用于在铁心中建立主磁通的**励磁分量 (I_μ)** 和用于补偿铁心损耗的**铁损耗分量 (I_{Fe})**。
- **主磁通大小**: 从公式 $\Phi_m \approx \frac{U_1}{4.44 f N_1}$ 可知，主磁通的大小主要由电网电压、频率和绕组匝数决定，与负载电流大小基本无关，这被称为“恒磁通”原理。

好的，我们来详细展开讲解变压器的空载运行及其具体计算。

变压器空载运行详解

1. 空载运行的定义

- **定义：**指变压器的副边绕组完全断开，不接任何负载，而原边绕组施加其额定的正弦交流电压。
- **目的：**通过空载运行（或称空载试验），可以测量变压器的空载电流和空载损耗，并据此计算出其励磁参数（励磁电阻和励磁电抗），这些参数是表征变压器性能的重要指标。

2. 空载电流 (I_0) 的物理构成

在空载状态下，流入原边绕组的电流被称为空载电流 I_0 。这个电流的数值通常很小，大约是额定电流的2%到10%。尽管它很小，但它包含了两个至关重要的分量：

- **励磁分量 (I_μ):**
 - **作用：**这个电流分量的唯一作用是在变压器的铁心中建立主磁通 (Φ_m)。
 - **性质：**由于磁通和感应电动势之间存在90°的相位差，励磁分量是一个**无功分量**，其相位滞后于外施电压 U_1 约90°。它的大小与铁心的磁导率（磁阻）有关，磁导率越高，建立相同磁通所需的励磁电流就越小。
- **铁损耗分量 (I_{Fe}):**
 - **作用：**交变的磁通会在铁心中产生损耗，主要包括**磁滞损耗**和**涡流损耗**，这两种损耗合称为**铁损耗** (P_{Fe})。铁损耗分量就是用于提供这部分损耗功率的电流分量。
 - **性质：**这个分量消耗的是有功功率，因此它是一个**有功分量**，其相位与外施电压 U_1 相同。

由于 I_μ 和 I_{Fe} 在相位上相差90°，所以空载电流 I_0 是这两个分量的**向量和**，而非简单的算术和。

3. 主磁通大小与“恒磁通”原理

- **主磁通公式：**

$$\Phi_m \approx \frac{U_1}{4.44fN_1}$$

这个公式揭示了决定主磁通峰值的核心因素：

- **电网电压 (U_1):** 在中国，电网电压和频率通常非常稳定。
 - **频率 (f):** 电网频率，例如50Hz。
 - **绕组匝数 (N_1):** 对于一台已制成的变压器，其匝数是固定不变的。
- **“恒磁通”原理：**

由于上述三个决定性因素 (U_1, f, N_1) 都是基本不变的，所以变压器在正常工作时，其铁心中的主磁通 Φ_m 的大小也基本保持恒定，几乎与负载电流的大小无关。这就是著名的“恒磁通”原理。这个

原理是理解变压器负载运行后电流变化的基础。因为主磁通恒定，所以铁损耗也基本保持不变，因此空载损耗主要就是铁损耗。

空载计算（基于空载试验数据）

在实际工程中，我们会通过空载试验来测量相关数据，然后进行计算。

试验测量值：

- 空载电压： U_0 (通常等于额定电压 U_{1N})
- 空载电流： I_0
- 空载功率 (即铁损耗)： P_0 (因为空载时绕组铜损 $I_0^2 R_1$ 极小，可忽略不计，所以 $P_0 \approx P_{Fe}$)

计算步骤：

1. 计算空载功率因数 ($\cos \phi_0$)

空载时变压器从电网吸收的有功功率为 P_0 ，视在功率为 $S_0 = U_0 I_0$ 。

$$\cos \phi_0 = \frac{P_0}{S_0} = \frac{P_0}{U_0 I_0}$$

由于空载电流主要是感性的励磁分量，所以功率因数通常很低。

2. 计算铁损耗分量 (I_{Fe})

铁损耗分量是有功分量，可以直接通过有功功率和功率因数计算得出：

$$I_{Fe} = I_0 \cos \phi_0 = I_0 \cdot \frac{P_0}{U_0 I_0} = \frac{P_0}{U_0}$$

3. 计算励磁分量 (I_μ)

空载电流 I_0 是 I_{Fe} 和 I_μ 的向量和。由于两者相位垂直，它们的大小满足勾股定理：

$$I_0^2 = I_{Fe}^2 + I_\mu^2$$

因此，励磁分量的大小可以计算为：

$$I_\mu = \sqrt{I_0^2 - I_{Fe}^2}$$

4. 计算励磁参数 (励磁电阻 R_m 和励磁电抗 X_m)

在变压器的T型等效电路中，励磁支路由励磁电阻 R_m 和励磁电抗 X_m 并联组成。

- **励磁电阻 R_m** ：它等效地消耗了铁损耗功率。

$$R_m = \frac{U_0}{I_{Fe}} = \frac{U_0}{P_0/U_0} = \frac{U_0^2}{P_0}$$

- **励磁电抗** X_m : 它流过励磁电流, 用于建立磁场。

$$X_m = \frac{U_0}{I_\mu} = \frac{U_0}{\sqrt{I_0^2 - I_{Fe}^2}}$$

通过以上计算, 我们就能全面地了解变压器在空载运行时的各项电气特性和内部参数。

• 负载运行

◦ **定义**: 副边接上负载, 原边接入电源的状态。

◦ **电压平衡方程式** (相量形式):

- 原边: $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(R_1 + jX_{1\sigma}) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1Z_1$
- 副边: $\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2(R_2 + jX_{2\sigma}) = \dot{E}_2 - \dot{I}_2Z_2$

其中, R 是绕组电阻, X_σ 是漏电抗, Z 是漏阻抗。

第三部分：变压器的等效电路

为了便于分析计算, 通常将原、副边两个有磁耦合但电气隔离的电路, 通过“归算”的方法, 变换成一个统一的电气等效电路。

1. 副边参数归算至原边

• **归算原则**: 归算前后, 副边对主磁通的磁动势作用不变; 副边传递的有功和无功功率不变。

• **归算公式推导**

i. **电势与电压归算**: 将归算后的副边电势 \dot{E}'_2 等效为原边电势 \dot{E}_1 。

$$\dot{E}'_2 = k\dot{E}_2 \quad \text{且} \quad \dot{U}'_2 = k\dot{U}_2$$

ii. **电流归算**: 基于磁动势不变原则 ($N_1\dot{I}'_2 = N_2\dot{I}_2$)。

$$\dot{I}'_2 = \frac{N_2}{N_1}\dot{I}_2 = \frac{1}{k}\dot{I}_2$$

iii. **阻抗归算**: 归算后的负载阻抗 Z'_L 为:

$$Z'_L = \frac{\dot{U}'_2}{\dot{I}'_2} = \frac{k\dot{U}_2}{(1/k)\dot{I}_2} = k^2 \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} = k^2 Z_L$$

同理，副边绕组自身的电阻和漏电抗归算值为：

$$R'_2 = k^2 R_2, \quad X'_{2\sigma} = k^2 X_{2\sigma}$$

2. T型等效电路

- 经过归算，变压器可以等效为一个**T型电路**。该电路清晰地展示了各物理量之间的关系：输入电压 \dot{U}_1 经过原边漏阻抗 Z_1 压降后，电压变为 $-\dot{E}_1$ 。此电压加在励磁支路上产生空载电流 \dot{I}_0 ，同时作为归算后的副边电路的电源。原边总电流 \dot{I}_1 是励磁电流 \dot{I}_0 和归算后的负载电流 \dot{I}'_2 的相量和。

第四部分：变压器的运行与应用

1. 额定值 (铭牌参数)

- **额定容量 (S_N)**: 指变压器在额定工作状态下能够长期输出的视在功率，单位为 VA 或 kVA。
- **额定电压 (U_{1N}/U_{2N})**: U_{1N} 是原边绕组应施加的额定电压； U_{2N} 是原边加额定电压时，副边空载的端电压。
- **额定电流 (I_{1N}, I_{2N})**: 指在额定容量和额定电压下，原、副边绕组允许长期通过的线电流值。

2. 主要应用场景

- **电力系统**: 用于升高或降低电压，以实现远距离高压输电和终端低压配电。
- **仪用互感器**: 将高电压或大电流按精确比例转换为标准的低电压或小电流，供测量仪表和保护装置使用。
- **阻抗匹配**: 在电子电路中（如音频放大器驱动扬声器），通过选择合适的匝数比，使负载的等效阻抗与信号源内阻相等，从而实现最大功率传输。
- **隔离变压器**: 通常匝数比为1:1，用于在电气上隔离两个电路，可以有效抑制干扰，并为设备维修提供安全保障。
- **自耦变压器**: 其原、副边绕组共用一部分线圈，结构紧凑，成本较低，常用于实验室中的调压器。