

好的，根据您提供的教学文稿，我为您重新整理了一份不含引用的详细知识点文档，其中包含了核心的公式推导过程。

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。

ii. 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 $\Phi_m \approx \frac{U_1}{4.44fN_1}$ 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。

- **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： $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(R_1 + jX_{1\sigma}) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$

- 副边： $\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2(R_2 + jX_{2\sigma}) = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2$

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。