

电工技术与电子技术

第6章 变压器



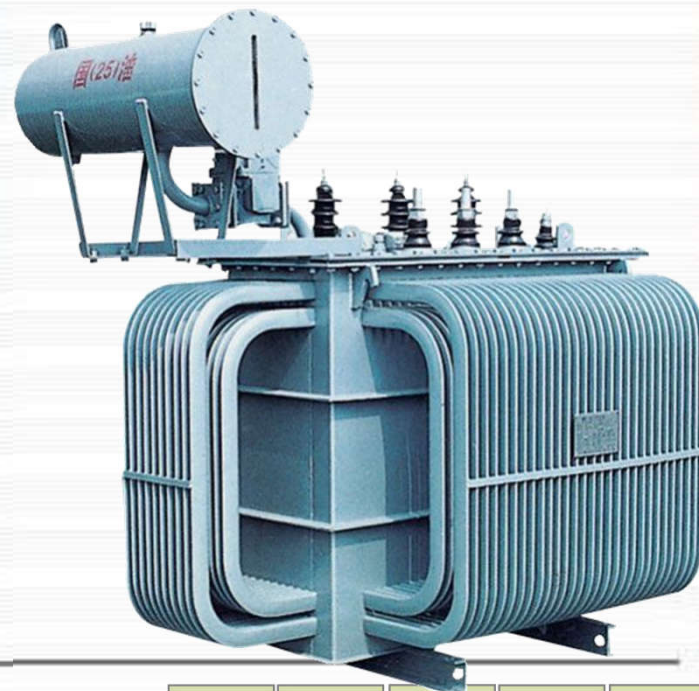
第6章 变压器

6.1 变压器的结构和工作原理

6.2 变压器的外特性与效率

6.3 变压器绕组的极性

6.4 特殊变压器



第6章 变压器

本章要求：

1. 了解变压器的基本结构、工作原理、运行特性和绕组的同极性端，理解变压器额定值的意义；
2. 掌握变压器的电压、电流和阻抗变换功能；
3. 了解三相电压的变换方法。

第6章 变压器

6.1 变压器的结构和工作原理

6.2 变压器的外特性与效率

6.3 变压器绕组的极性

6.4 特殊变压器

6.1 变压器的结构和工作原理

6.1.1 概述

变压器是一种常见的电气设备，在电力系统和电子线路中应用广泛。

变压器的主要功能：

- 变电压：电力系统等
- 变电流：电流互感器等
- 变阻抗：电子线路中的阻抗匹配等



在电能传输过程中，当输送功率 $P=UI \cos \varphi$ 及负载功率因数 $\cos \varphi$ 一定时：

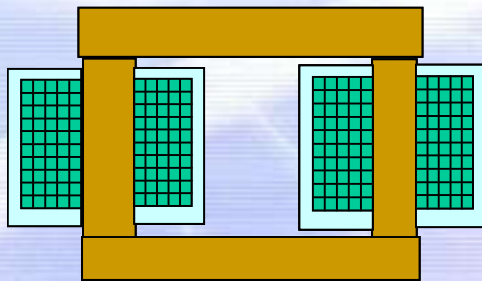
$$U \uparrow \rightarrow I \downarrow \begin{cases} \Delta P \downarrow = I^2 \downarrow R_l & \text{电能损耗小} \\ I \downarrow \rightarrow S \downarrow & \text{节省金属材料} \end{cases}$$

变压器的分类

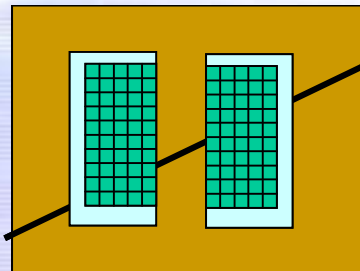
按用途分 { 电力变压器 (输配电用)
仪用变压器 { 电压互感器
整流变压器 { 电流互感器

按相数分 { 单相变压器
三相变压器

按制造方式 { 壳式
心式



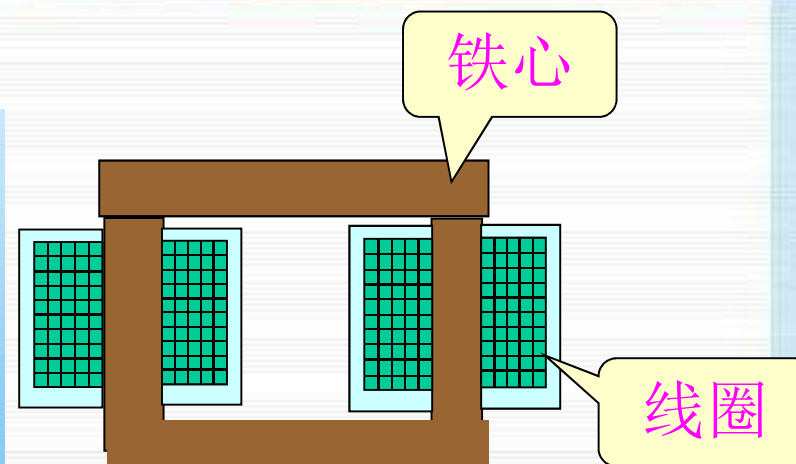
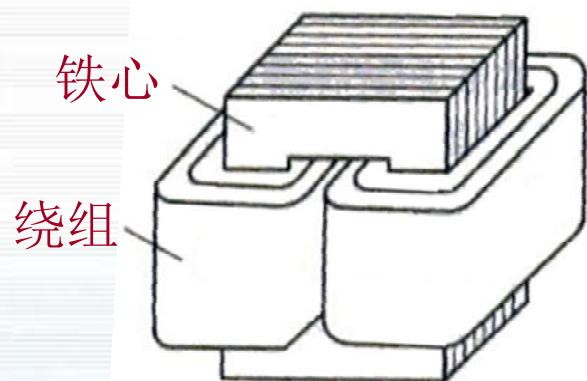
心式变压器



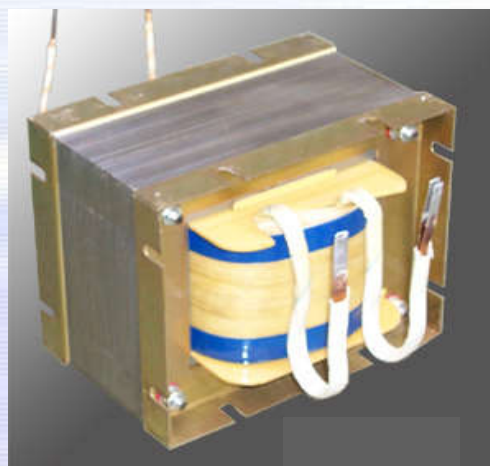
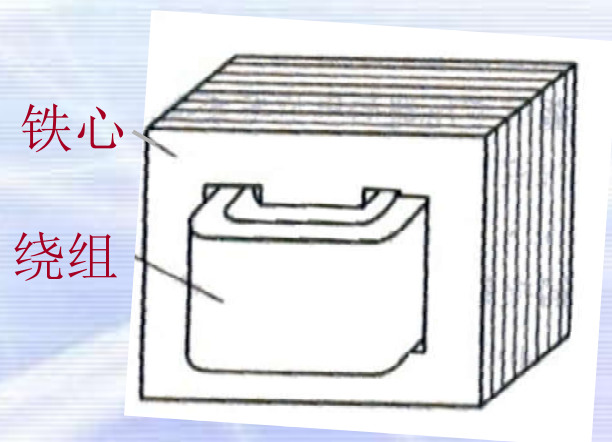
壳式变压器



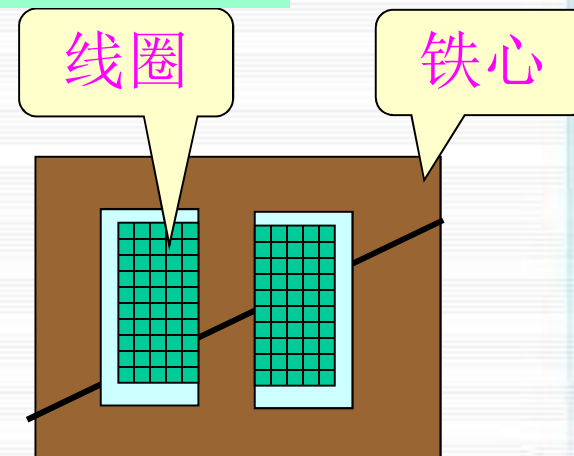
心式变压器



壳式变压器

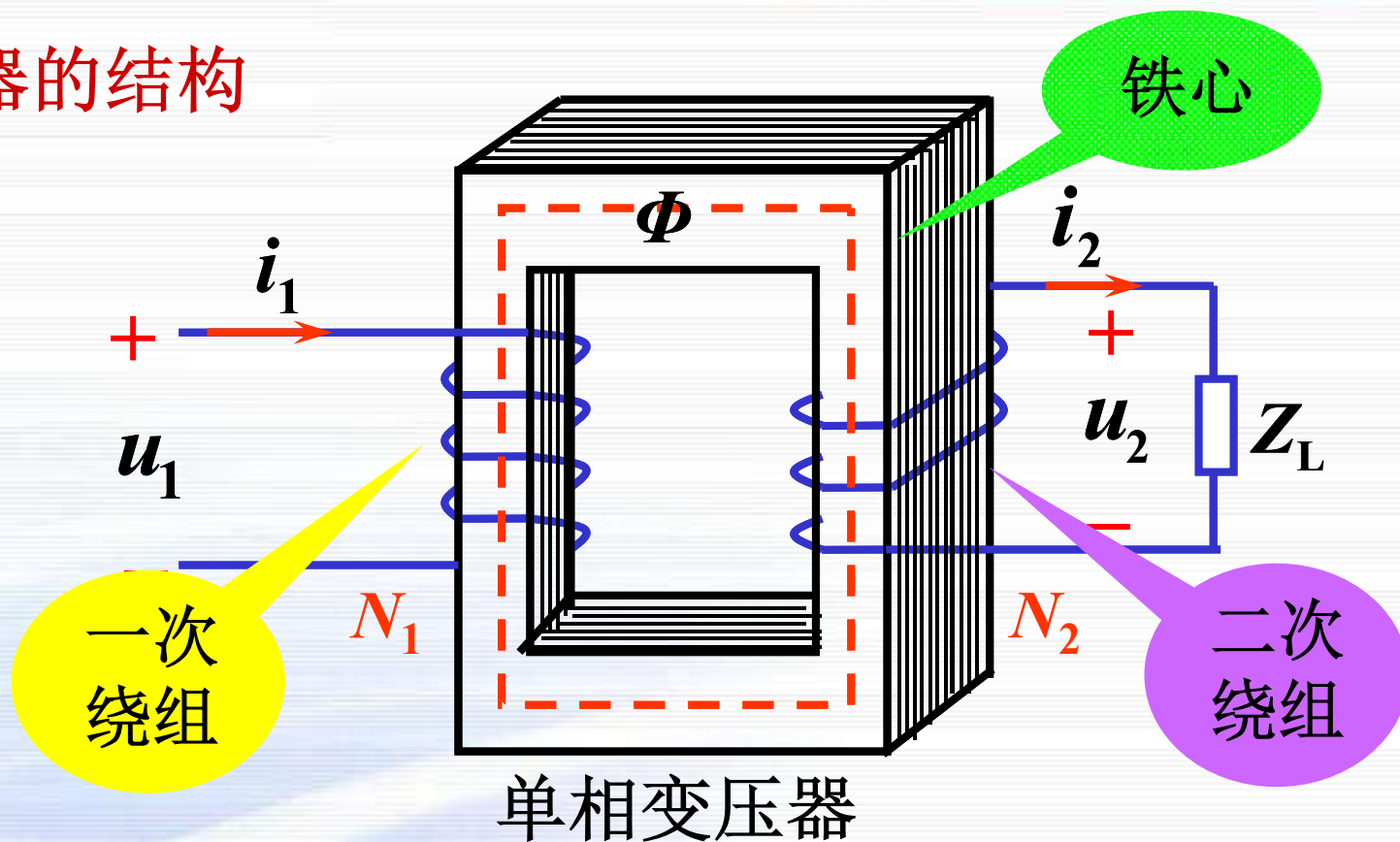


心式变压器



壳式变压器

变压器的结构



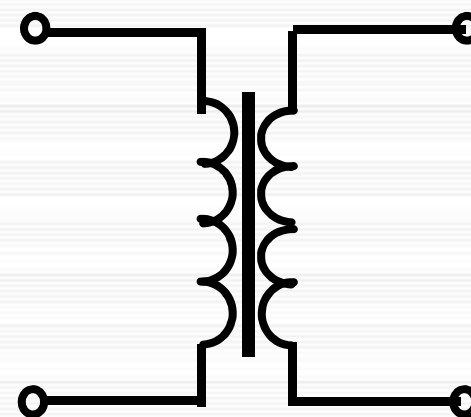
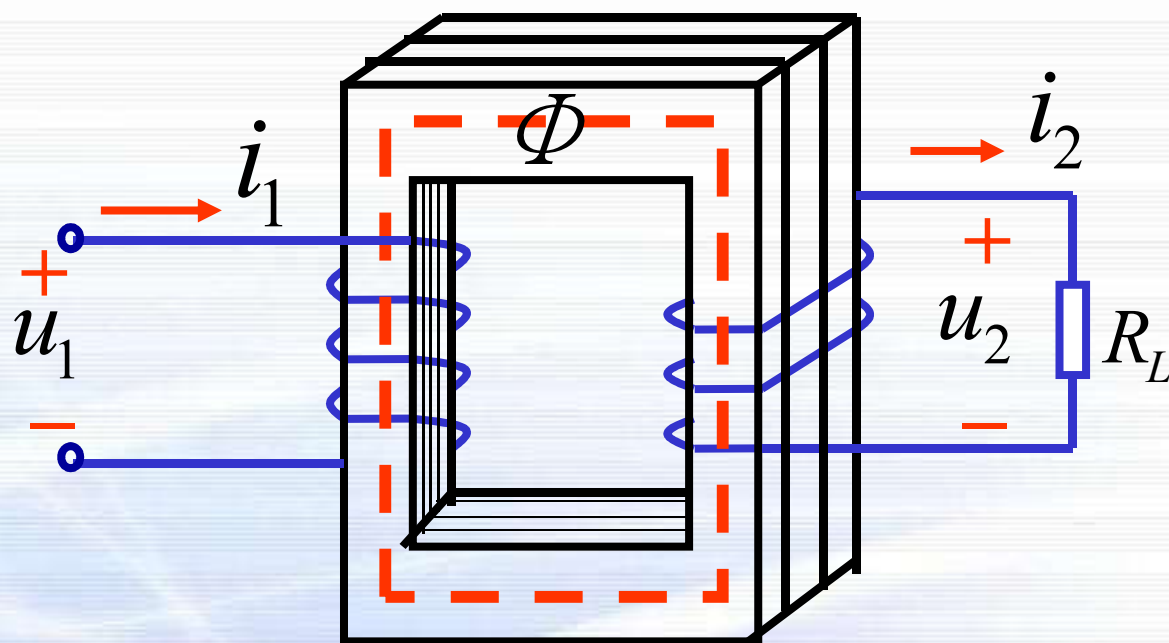
绕组： $\begin{cases} \text{一次绕组} \\ \text{二次绕组} \end{cases}$

变压器的电路

铁心： $\begin{cases} \text{由高导磁硅钢片叠成} \\ \text{厚} 0.35\text{mm} \text{ 或 } 0.5\text{mm} \end{cases}$

变压器的磁路

二、变压器的工作原理



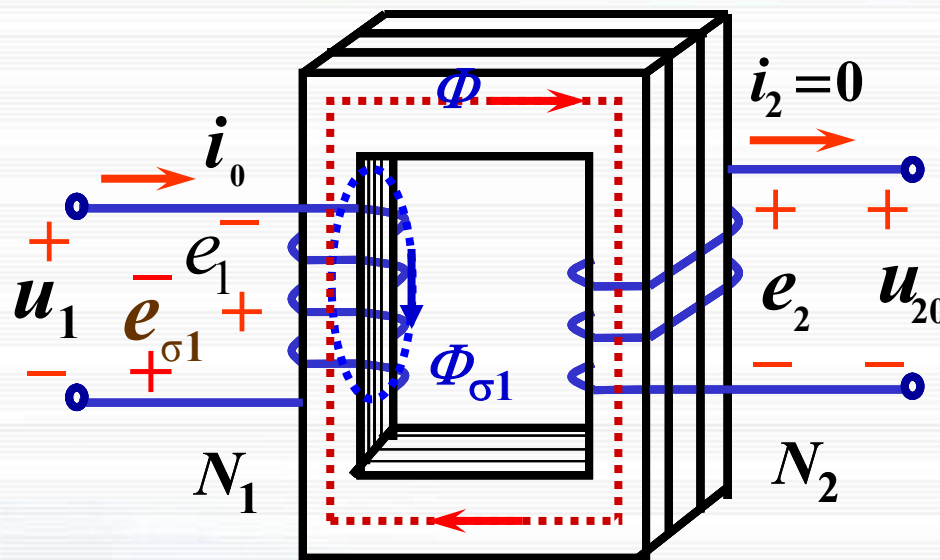
变压器符号

原、副绕组互不相连，能量的传递靠磁耦合

1. 电磁关系

(1) 空载运行情况

一次侧接交流电源，
二次侧开路。



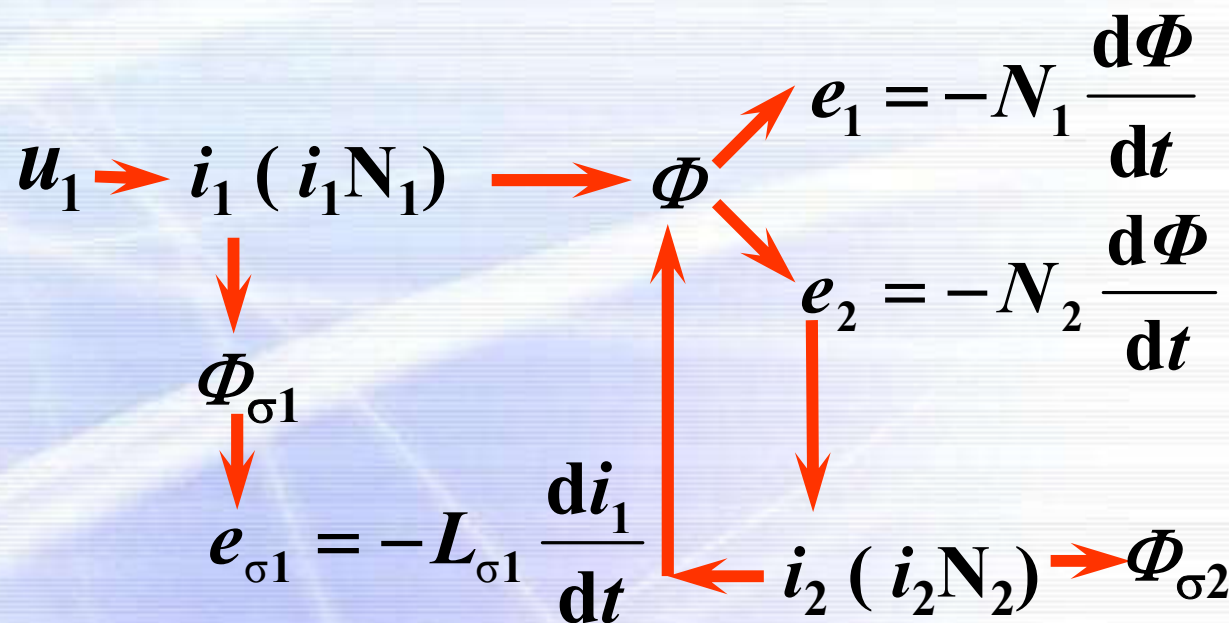
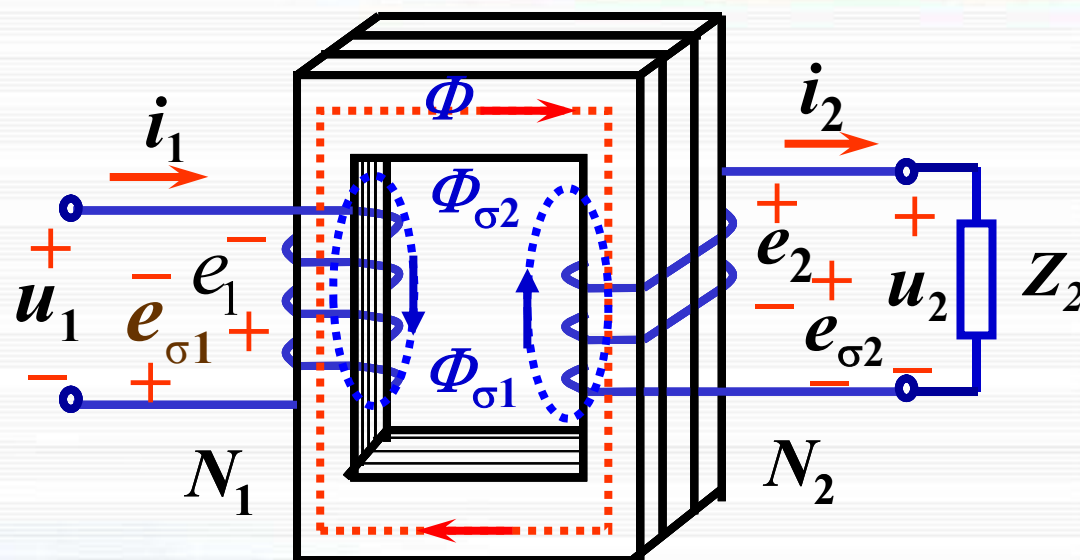
$$\begin{aligned} u_1 &\rightarrow i_0 (i_0 N_1) \rightarrow \Phi \\ &\downarrow \\ &\Phi_{\sigma 1} \\ &\downarrow \\ e_{\sigma 1} &= -L_{\sigma 1} \frac{di_0}{dt} \end{aligned} \quad \begin{aligned} e_1 &= -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \\ e_2 &= -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \end{aligned}$$

空载时，
铁心中主
磁通 Φ 由
一次绕组
磁通势产
生。

1. 电磁关系

(2) 带负载运行情况

一次侧接交流电源，
二次侧接负载。



有载时，铁心中主磁通 Φ 是由一次、二次绕组磁通势共同产生的合成磁通。

(2) 原、副边电压

对原边，变压器原边等效电路如图

根据KVL:

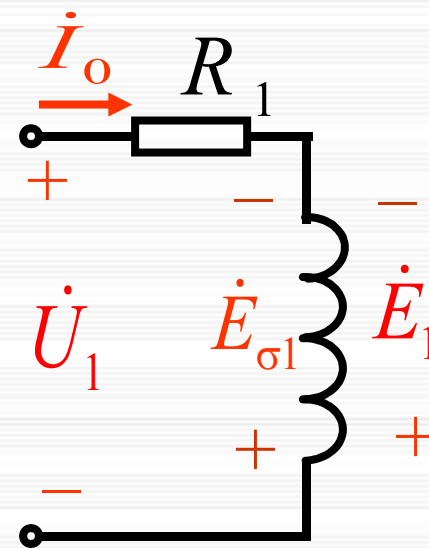
$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= R_1 \dot{I}_1 - \dot{E}_{\sigma 1} - \dot{E}_1 \\ &= R_1 \dot{I}_1 + jX_1 \dot{I}_1 - \dot{E}_1\end{aligned}$$

式中 R_1 为原绕组的电阻;

$X_1 = \omega L_{\sigma 1}$ 为原绕组的感抗(漏磁感抗, 由漏磁产生)。

由于电阻 R_1 和感抗 X_1 (或漏磁通)较小,其两端的电压也较小,与主磁电动势 E_1 比较可忽略不计, 则

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1 \rightarrow U_1 \approx E_1 = 4.44 f \Phi_m N_1$$



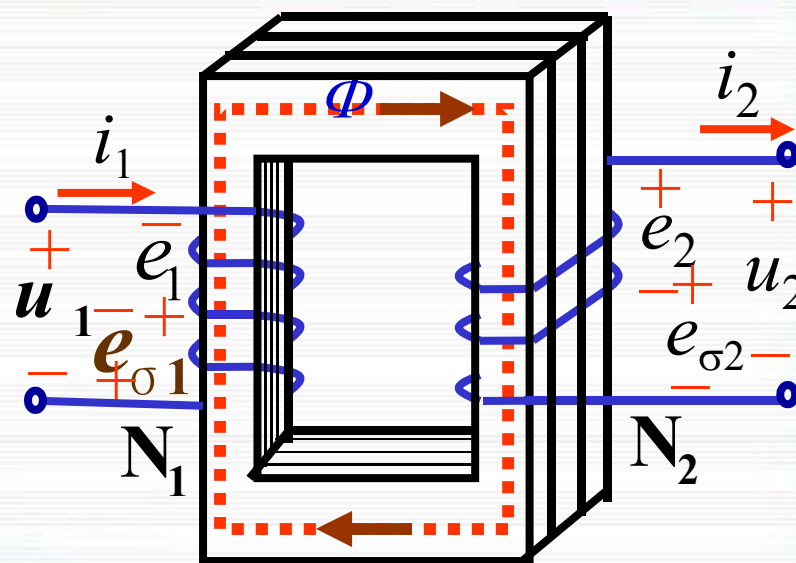
对副边，根据KVL：

$$\begin{aligned}\dot{E}_2 &= R_2 \dot{I}_2 - \dot{E}_{\sigma 2} + \dot{U}_2 \\ &= R_2 \dot{I}_2 + jX_2 \dot{I}_2 + \dot{U}_2\end{aligned}$$

式中 R_2 为副绕组的电阻；

$X_2 = \omega L_{\sigma 2}$ 为副绕组的感抗；

\dot{U}_2 为副绕组的端电压。



变压器空载时: $I_2 = 0$, $U_2 = U_{20} = E_2 = 4.44 f \Phi_m N_2$

式中 U_{20} 为变压器空载电压。

故有

$$\frac{U_1}{U_{20}} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = K$$

K 为变比（匝比）

结论：改变匝数比，就能改变输出电压。

三相电压的变换

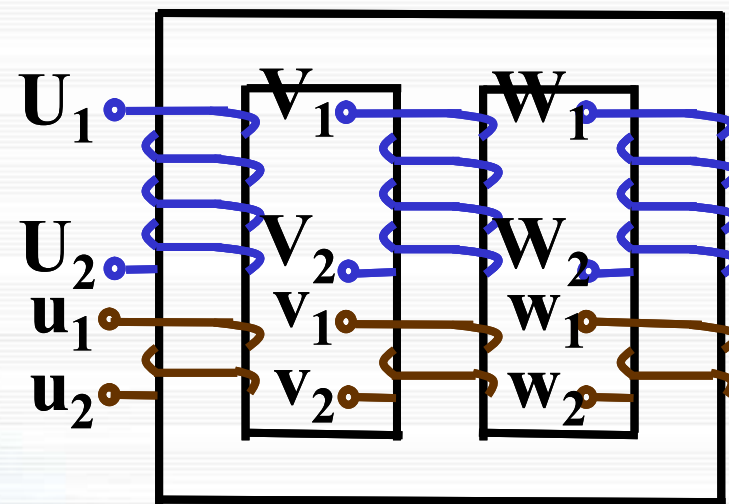
(1) 三相变压器的结构

高压绕组: U_1 、 V_1 、 W_1 : 首端

U_2 、 V_2 、 W_2 : 尾端

低压绕组: u_1 、 v_1 、 w_1 : 首端

u_2 、 v_2 、 w_2 : 尾端



(2) 三相变压器的联结方式

联结方式: Y/Y 、 Y/Y_0 、 Y_0/Y 、 Y/Δ 、 Y_0/Δ

常用接法: Y/Y_0 : 三相配电变压器

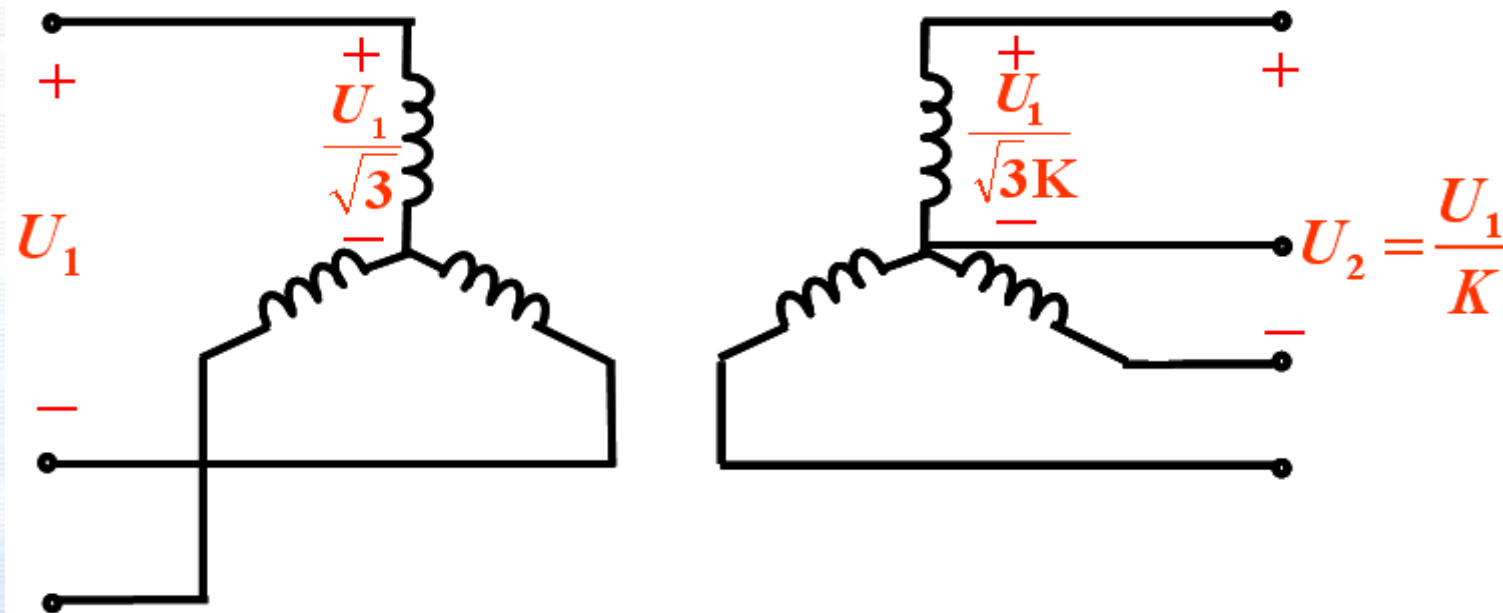
Y/Δ : 动力供电系统 (井下照明)

Y_0/Δ : 高压、超高压供电系统

高压绕组接法

低压绕组接法

三相变压器Y/Y₀联结

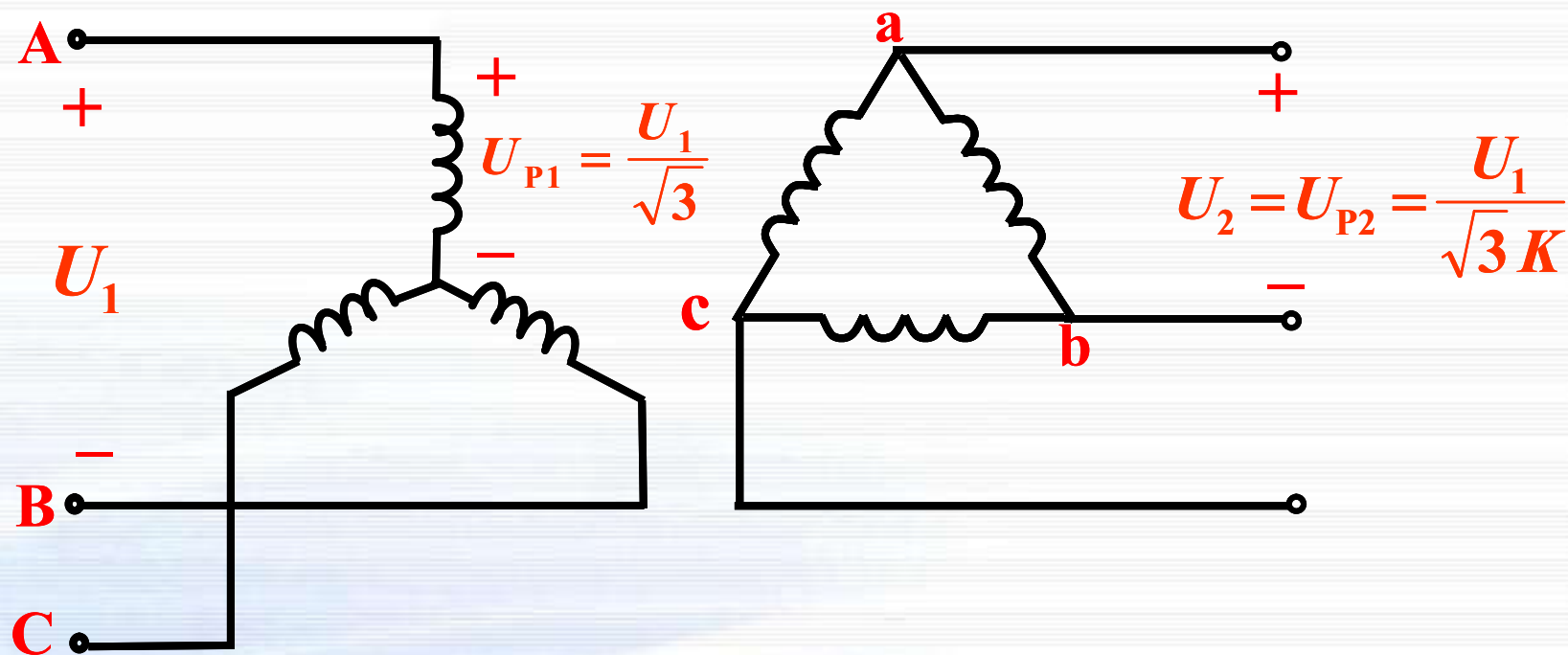


高压侧接成Y形，相电压只有线电压的 $1/\sqrt{3}$ ，可以降低每相绕组的绝缘要求。

线电压之比：

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\sqrt{3} U_{P1}}{\sqrt{3} U_{P2}} = \frac{U_{P1}}{U_{P2}} = K$$

三相变压器Y/Δ联结



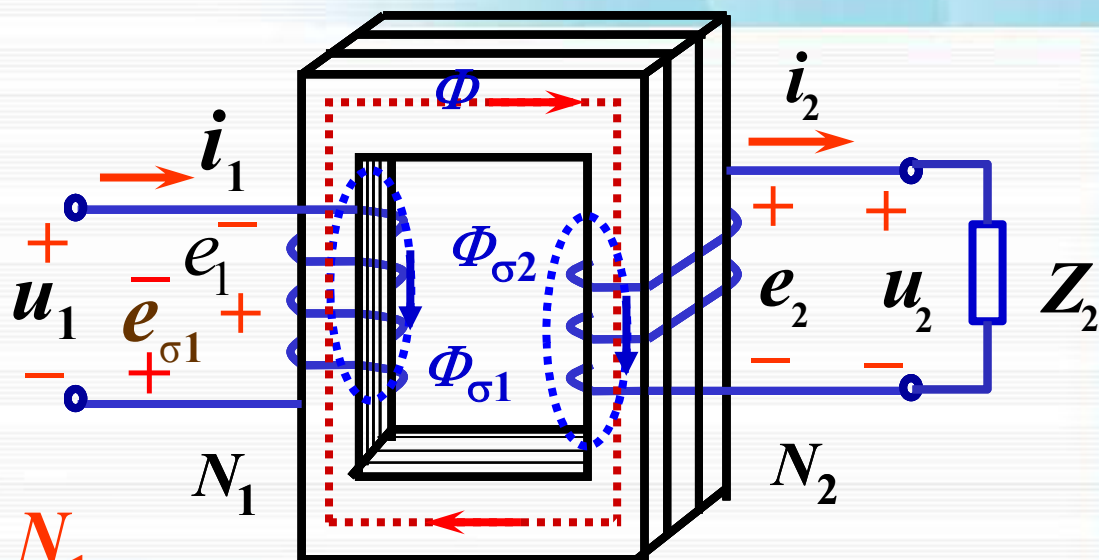
低压侧接成Δ形，相电流只有线电流的 $1/\sqrt{3}$ ，可以减小每相绕组的导线截面。

线电压之比:
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\sqrt{3}U_{P1}}{U_{P2}} = \sqrt{3} \frac{U_{P1}}{U_{P2}} = \sqrt{3} K$$

3. 电流变换

有载运行

$$Z_2 \rightarrow \dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_2}{Z_2}$$



由 $U_1 \approx E_1 = 4.44 f \Phi_m N_1$

当 U_1 、 f 不变，则 Φ_m 基本不变，近于常数。

空载: $i_0 N_1 \rightarrow \Phi_m$

有载: $i_1 N_1 + i_2 N_2 \rightarrow \Phi_m$

磁势平衡式: $\underline{i_1 N_1 + i_2 N_2} = \underline{i_0 N_1}$

有载磁势

空载磁势

磁势平衡式: $i_1 N_1 + i_2 N_2 = i_0 N_1$

$$\dot{I}_1 N_1 = \dot{I}_0 N_1 - \dot{I}_2 N_2$$

一般情况下: I_0 为 $10\%I_{1N}$ 以内, 很小可忽略。

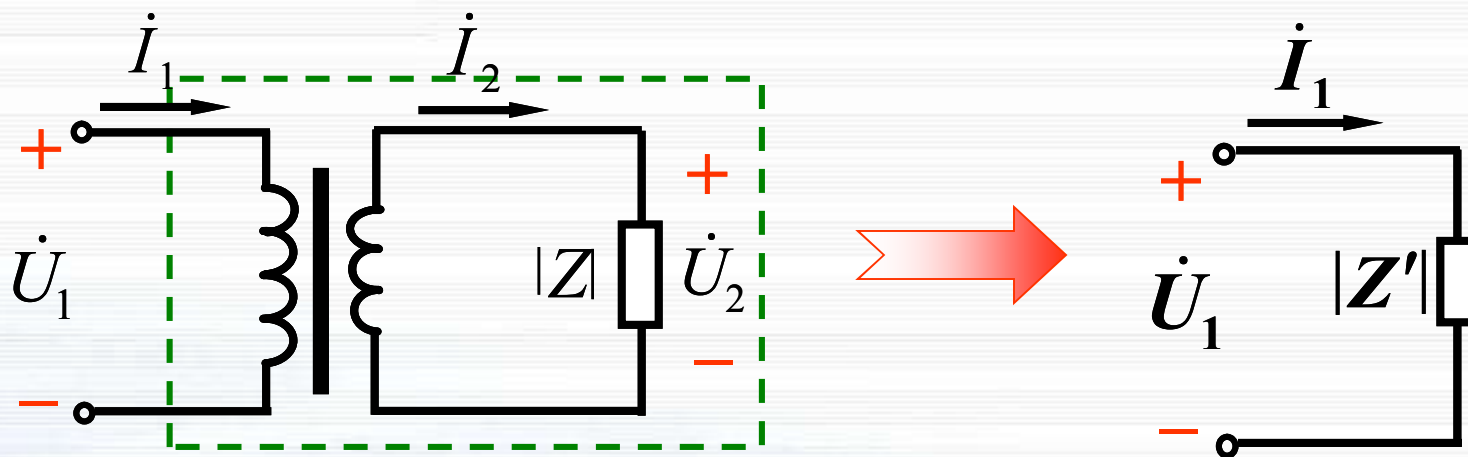
$$\dot{I}_1 N_1 \approx -\dot{I}_2 N_2$$

$$I_1 N_1 \approx I_2 N_2$$

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K}$$

结论: 一次、二次侧电流与匝数成反比。

4. 阻抗变换



由图可知：

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

结论： 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。

例 1: 有一台额定容量50 kVA、额定电压为3300/220V的变压器，高压绕组为 6000匝, 试求:

(1) 低压绕组匝数; (2) 高压边低压边额定电流; (3) 当一次侧保持额定电压不变, 二次侧达到额定电流, 输出功率39 kW, 功率因数 $\cos\varphi = 0.8$ 时的副边端电压 U_2 。

解: (1)
$$N_2 = \frac{U_{2N}}{U_{1N}} N_1 = \frac{6\,000 \times 220}{3\,300} = 400$$

(2)
$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}} = \frac{50 \times 10^3}{3\,300} = 15.1 \text{ A}$$

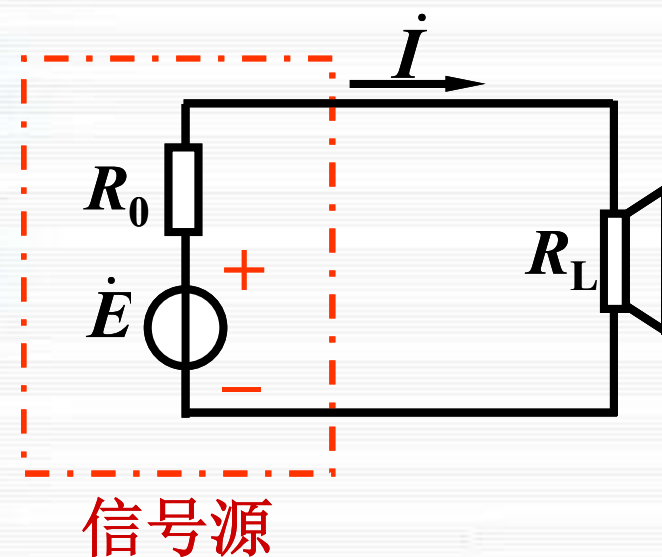
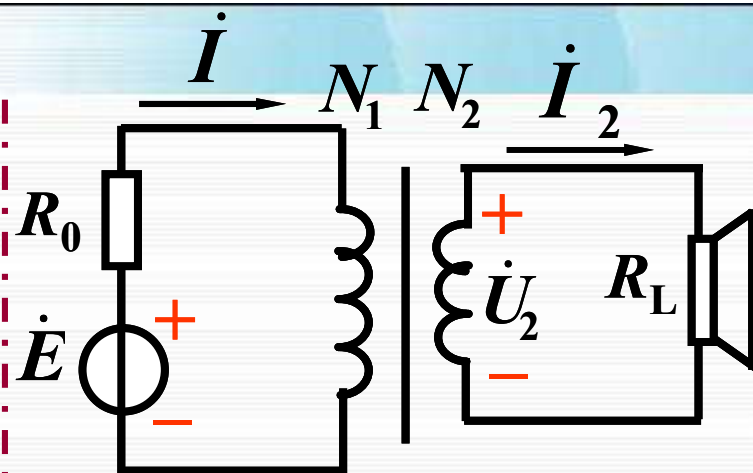
$$I_{2N} = K I_{1N} = \frac{6\,000}{400} 15.1 = 227 \text{ A}$$

(3)
$$U_2 = \frac{P}{I_{2N} \cos\varphi} = \frac{39 \times 10^3}{227 \times 0.8} = 215 \text{ V}$$

例2: 如图, 交流信号源的电动势 $E = 120\text{V}$, 内阻 $R_0 = 800\Omega$, 负载为扬声器, 其等效电阻为 $R_L = 8\Omega$ 。要求: (1) 当 R_L 折算到原边的等效电阻 $R'_L = R_0$ 时, 求变压器的匝数比和信号源输出的功率; (2) 当将负载直接与信号源联接时, 信号源输出多大功率?

解: (1) 变压器的匝数比应为

$$K = \frac{N_1}{N_2} = \sqrt{\frac{R'_L}{R_L}} = \sqrt{\frac{800}{8}} = 10$$



信号源的输出功率为

$$P = \left(\frac{E}{R_0 + R'_L} \right)^2 \times R'_L = \left(\frac{120}{800 + 800} \right)^2 \times 800 = 4.5 \text{ W}$$

(2) 将负载直接接到信号源上时输出功率

$$P = \left(\frac{E}{R_0 + R_L} \right)^2 R_L = \left(\frac{120}{800 + 8} \right)^2 \times 8 = 0.176 \text{ W}$$

结论：接入变压器以后，输出功率大大提高。

原因：满足最大功率输出条件： $R'_L = R_0$

电子线路中，常利用阻抗匹配实现最大输出功率。

第6章 变压器

6.1 变压器的结构和工作原理

6.2 变压器的外特性与效率

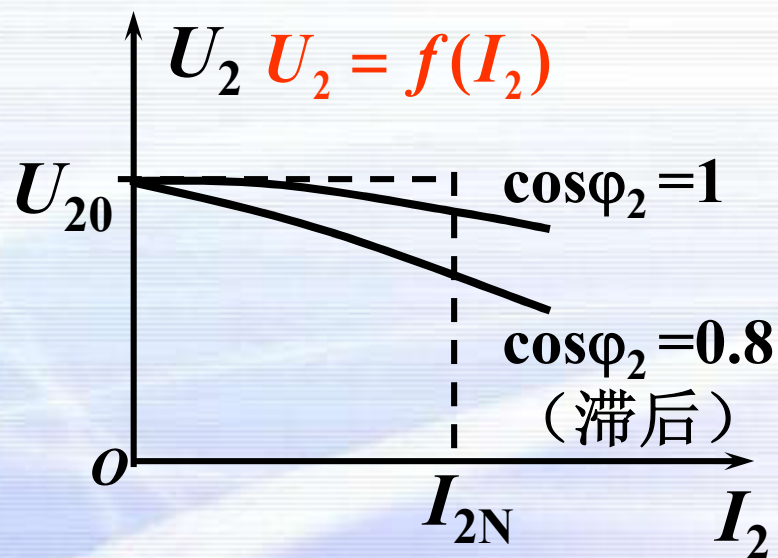
6.3 变压器绕组的极性

6.4 特殊变压器

6.2 变压器的外特性与效率

一、变压器的外特性

当一次侧电压 U_1 和负载功率因数 $\cos\varphi_2$ 保持不变时，二次侧输出电压 U_2 和输出电流 I_2 的关系， $U_2 = f(I_2)$ 。



U_{20} : 一次侧加额定电压、二次侧开路时的输出电压。

电压变化率:

$$\Delta U\% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \times 100\%$$

一般供电系统希望要硬特性（随 I_2 的变化， U_2 变化不大），电压变化率约在5%左右。

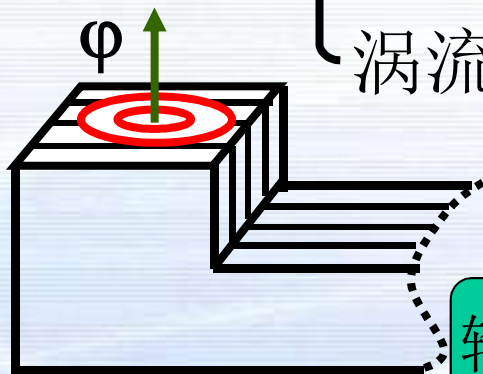
电压变化率越小，供电电压稳定性越好。

变压器的损耗和效率

变压器的损耗包括两部分：

铜损 (ΔP_{Cu})：绕组导线电阻的损耗。

铁损 (ΔP_{Fe})：{ 磁滞损耗：磁滞现象引起铁芯发热，造成的损耗。
涡流损耗：交变磁通在铁芯中产生的感应电流(涡流)造成的损耗。



输出功率

为减少涡流损耗，铁心一般由导磁钢片叠合成。

变压器的效率为

输入功率

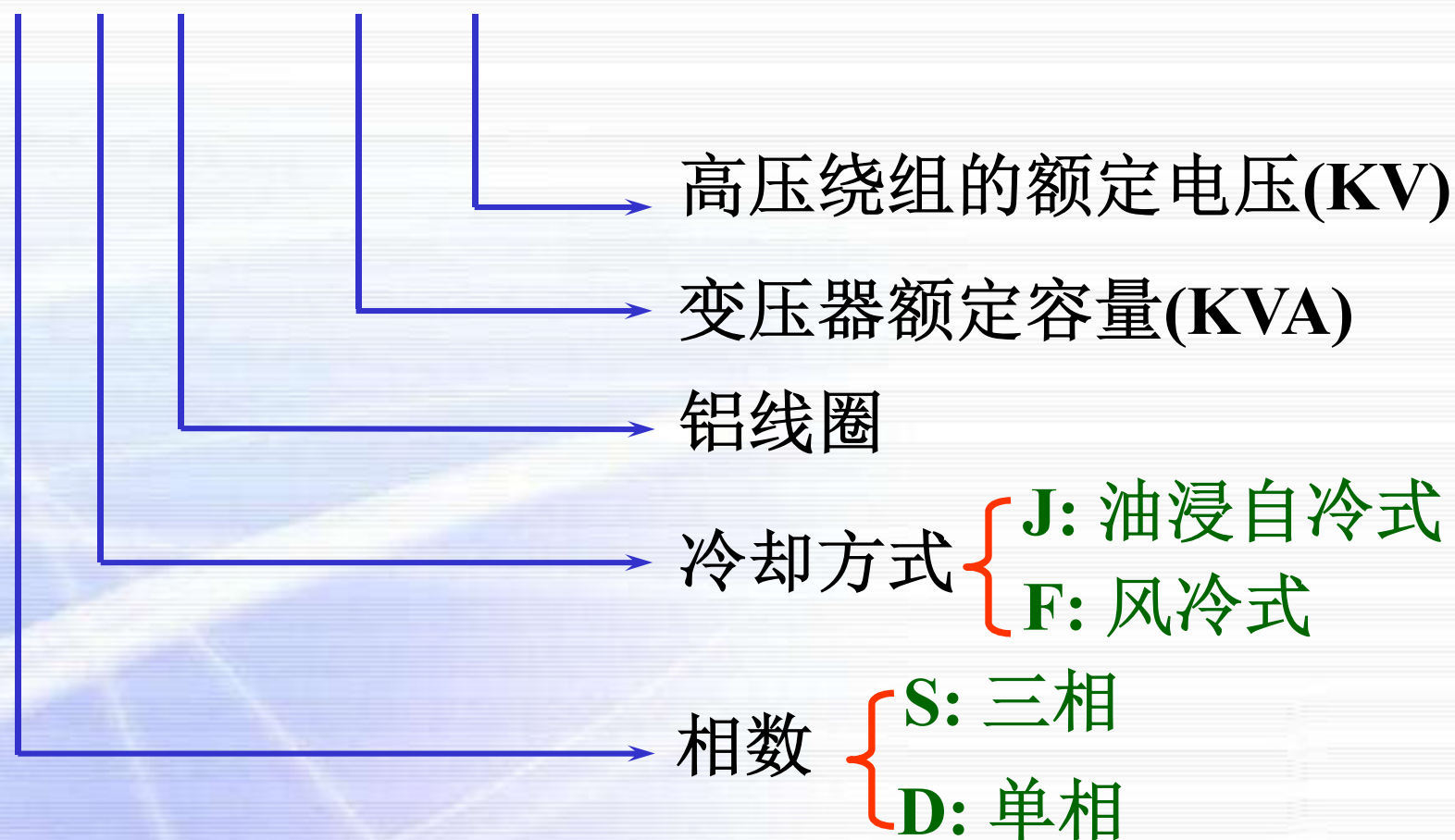
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe}}$$

一般 $\eta \geq 95\%$ ，负载为额定负载的 (50~75)% 时， η 最大。

三、变压器的铭牌和技术数据

(1) 变压器的型号

S J L—1000/10



变压器额定值

额定电压 U_{1N} 、 U_{2N}

变压器二次侧开路（**空载**）时，一次、二次侧绕组允许的电压值

{ 单相： U_{1N} ，一次侧电压，
 U_{2N} ，二次侧空载时的电压
三相： U_{1N} 、 U_{2N} ，一次、二次侧的**线电压**

额定电流 I_{1N} 、 I_{2N}

变压器**满载**运行时，一次、二次侧绕组允许的电流值。

{ 单相：一次、二次侧绕组允许的电流值
三相：一次、二次侧绕组**线电流**

(2) 额定值

额定容量 S_N

传送功率的最大能力。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{单相: } S_N = U_{2N} I_{2N} \approx U_{1N} I_{1N} \\ \text{三相: } S_N = \sqrt{3} U_{2N} I_{2N} \approx \sqrt{3} U_{1N} I_{1N} \end{array} \right.$$

注意：变压器几个功率的关系(单相)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{容量: } S_N = U_{1N} \times I_{1N} \\ \text{输出功率: } P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi \\ \text{一次侧输入功率: } P_1 = \frac{P_2}{\eta} \end{array} \right.$$

容量 $S_N \neq$ 输出功率 P_2

一次侧输入功率 $P_1 \neq$ 输出功率 P_2

变压器运行时的功率取决于负载的性质

效率

【例】 有一带电阻负载的三相变压器，其额定数据如下： $S_N=100\text{kVA}$ ， $U_{1N}=6000\text{V}$ ， $f=50\text{Hz}$ 。 $U_{2N}=U_{20}=400\text{V}$ ，绕组连接成Y / Y₀。由试验测得： $\Delta P_{\text{Fe}}=600\text{ W}$ ，额定负载时的 $\Delta P_{\text{Cu}}=2400\text{W}$ 。
试求 (1) 变压器的额定电流；
(2) 满载和半载时的效率。

【解】 (1) 额定电流

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{2N}} = \frac{100 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 400} = 144 \text{ A}$$

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{1N}} = \frac{100 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 6000} = 9.62 \text{ A}$$

(2) 满载和半载时的效率

$$\begin{aligned}\eta_1 &= \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{\text{Fe}} + \Delta P_{\text{Cu}}} \\ &= \frac{100 \times 10^3}{100 \times 10^3 + 600 + 2400} = 97.1\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\eta_{\frac{1}{2}} &= \frac{\frac{1}{2} \times 100 \times 10^3}{\frac{1}{2} \times 100 \times 10^3 + 600 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \times 2400} = 97.6\%\end{aligned}$$

第6章 变压器

6.1 变压器的结构和工作原理

6.2 变压器的外特性与效率

6.3 变压器绕组的极性

6.4 特殊变压器

6.3 变压器绕组的极性

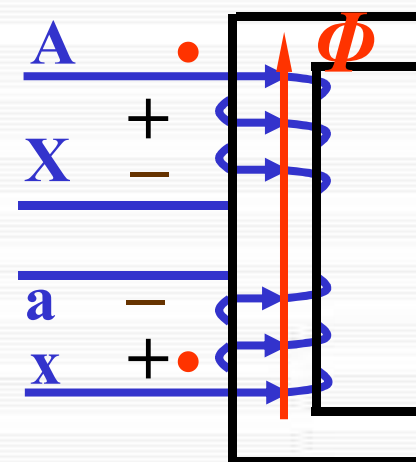
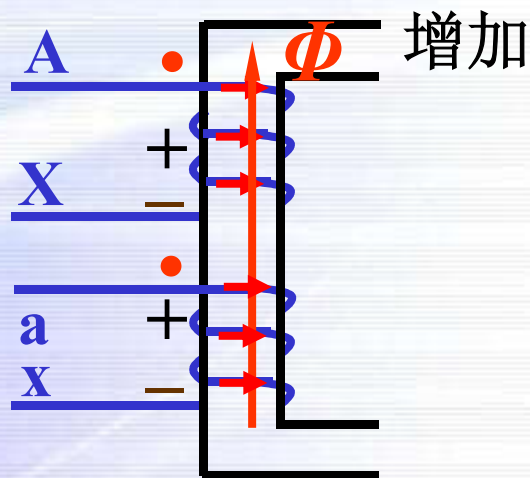
一、同极性端 (同名端)

当电流流入(或流出)两个线圈时,若产生的磁通方向相同,则两个流入(或流出)端称为同极性端。

或者说,当铁心中磁通变化时,在两线圈中产生的感应电动势极性相同的两端为同极性端。

同极性端用“ \bullet ”表示。

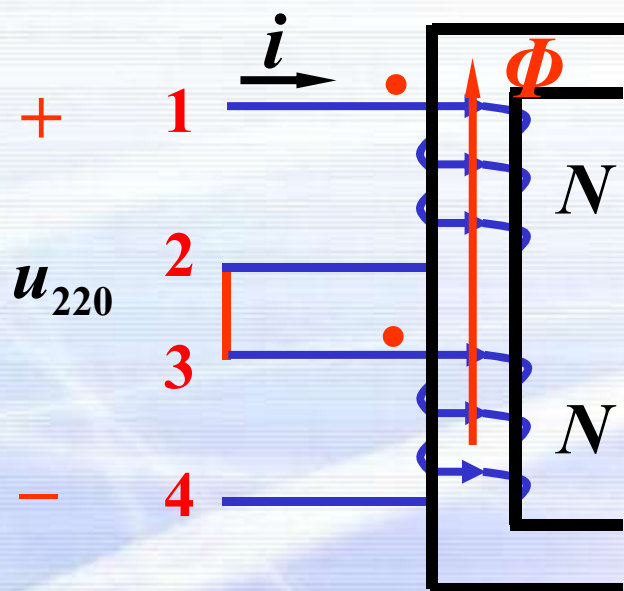
同极性端
和绕组的绕
向有关。



二、线圈的接法

变压器一次侧有两个额定电压为 **110V** 绕组的连接
当电源电压为**220V**时:

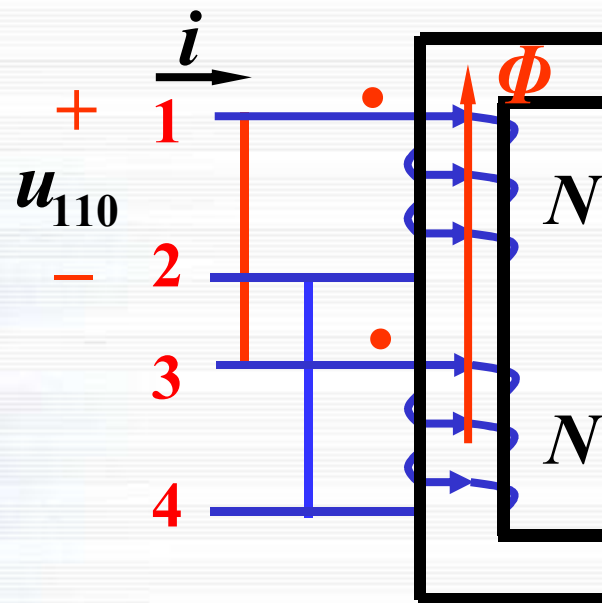
联接 **2—3**



$$\Phi_m = \frac{U_{220}}{4.44 f (2N)}$$

电源电压为**110V**时:

联接 **1—3, 2—4**

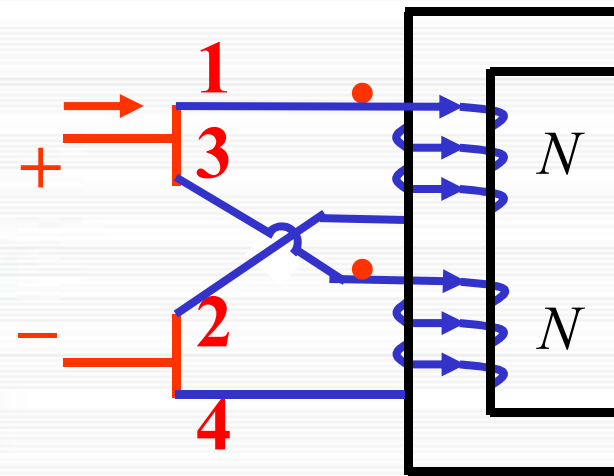


$$\Phi_m = \frac{U_{110}}{4.44 f (N)}$$

原边有两个相同绕组的电源变压器(220/110)，使用中应注意的问题：

问题1： 在110V 情况下，如果只用一个绕组(N)，行不行？

答： 不行（两绕组必须并接）

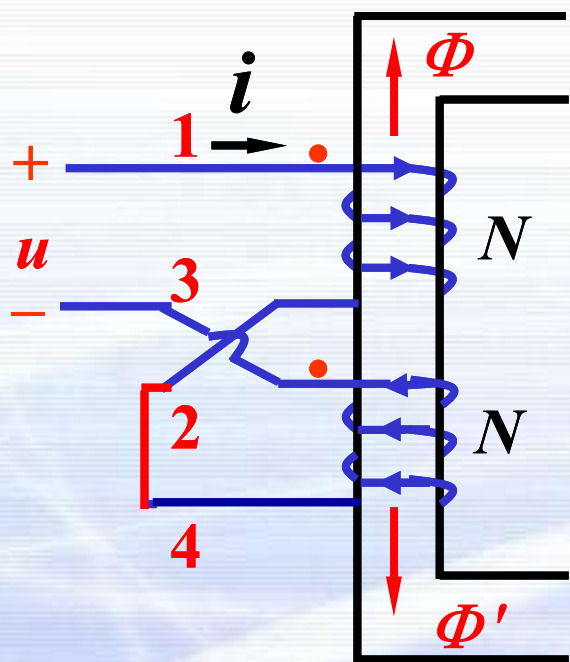


若两种接法铁芯中的磁通相等，则：

$$(i_{220} \cdot 2N) = (i_{110} \cdot N) \Rightarrow \frac{i_{110}}{i_{220}} = 2$$

问题：如果两绕组的极性端接错，结果如何？

答：有可能烧毁变压器



原因：

两个线圈中的磁通抵消

→ 感应电势 $e = 0$

$$u = iR - e$$

→ 电流 $i = \frac{u}{R}$ 很大

→ 烧毁变压器

结论：在同极性端不明确时，一定要先测定同极性端再进行连接。

三、同极性端的测定方法

交流法

把两个线圈的任意两端 (X - x) 连接, 然后在 AX 上加一低电压 u_{AX} 。

测量: U_{AX} 、 U_{Aa} 、 U_{ax}

结论: 若 $U_{Aa} = |U_{AX} - U_{ax}|$

说明 A 与 a 或 X 与 x 为同极性端。

若 $U_{Aa} = |U_{AX} + U_{ax}|$

说明 A 与 x 或 X 与 a 是同极性端。

