



变压器

变压器是一种静止电器,它通过线圈间的电磁感应,将一种电压等级的交流电能转换成同频率的另一种电压等级的交流电能.

3.1 变压器的基本工作原理和结构

3.2 单相变压器的空载运行

3.3 单相变压器的负载运行

3.4 变压器的参数测定

3.5 变压器的运行特性

3.6 三相变压器

3.7 变压器的并联特性

3.8 其他用途的变压器



3.1 变压器

基本工作原理和结构

第三章 变压器

3.1 变压器的基本工作原理和结构

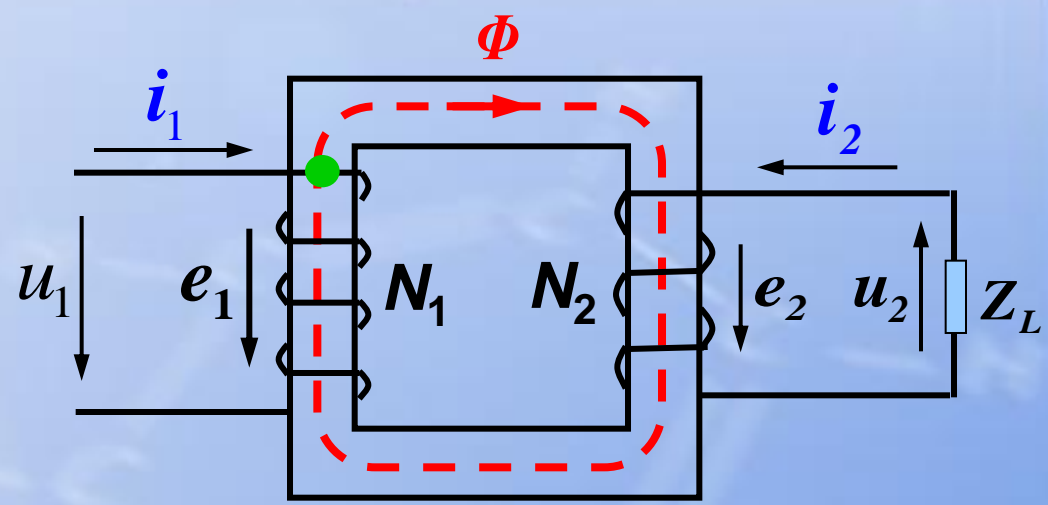
3.1.1 基本工作原理

主要部件：铁心；一次绕组（ N_1 匝）、二次绕组（ N_2 匝）。

工作原理简述：

$u_1 \rightarrow i_1 \rightarrow \Phi \rightarrow$

$$\rightarrow \begin{cases} e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \approx u_1 \\ e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt} \approx u_2 \end{cases}$$



有效值比： $\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$

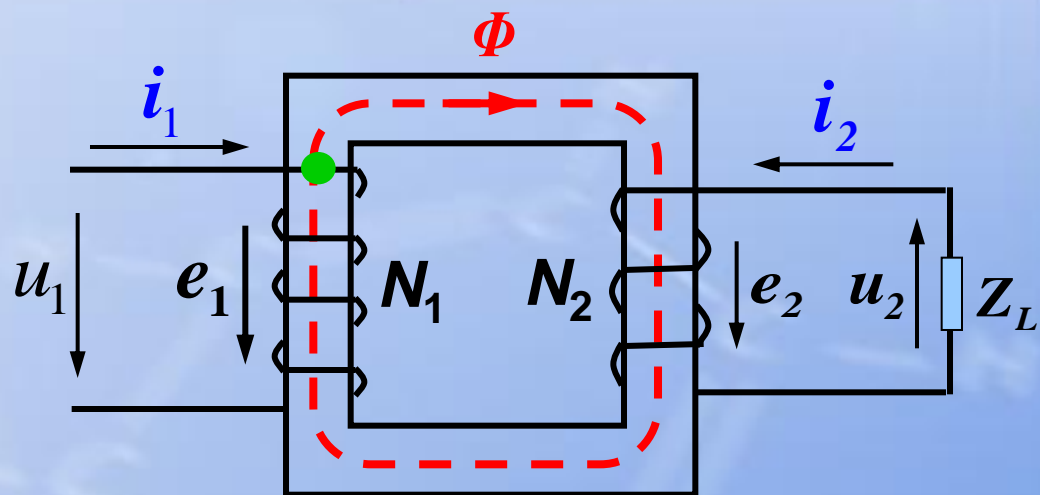
可见：只要磁通有变化量，一、二次绕组匝数不同，即可实现改变电压。

3.1 变压器的基本工作原理和结构

3.1.1 基本工作原理

主要部件：铁心；一次绕组（ N_1 匝）、二次绕组（ N_2 匝）。

变压器在传递电能的过程中，一、二次测的电功率基本相等，当两侧电压不等时，两侧电流势必不等，高压测的电流小，低压测的电流大，故变压器在改变电压的同时，也改变了电流。



3.1.2 基本结构



铁心

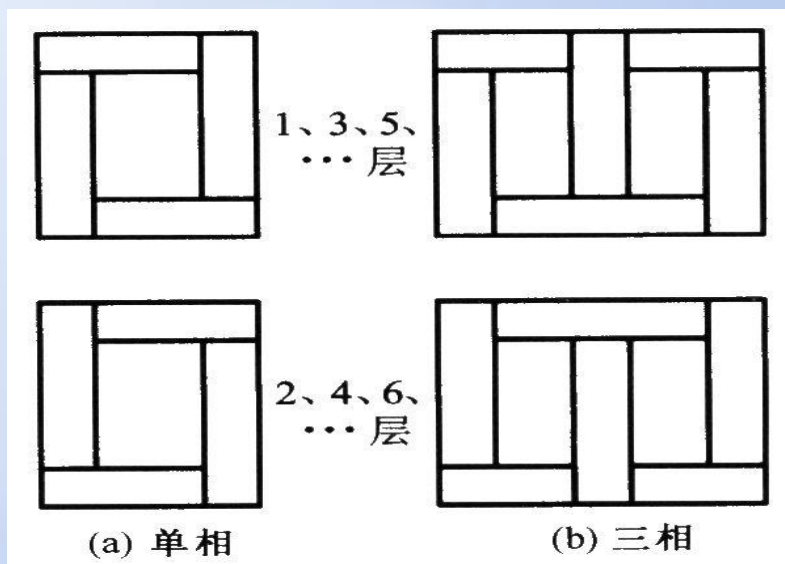
绕组

其他部件

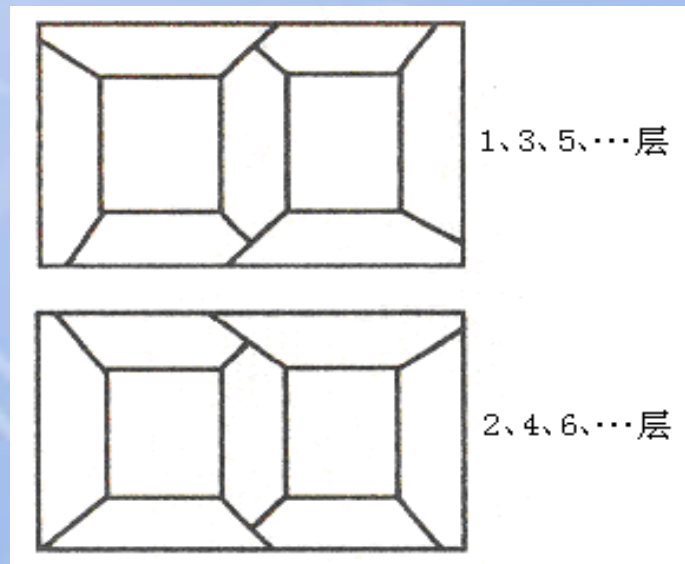
3.1.2 基本结构

一、铁心

变压器的主磁路，为了提高导磁性能和减少铁损，用厚为0.35-0.5mm、表面涂有绝缘漆的硅钢片叠成。



交错叠装



冷轧硅钢片斜角接缝叠装

3.1.2 基本结构

二、绕组

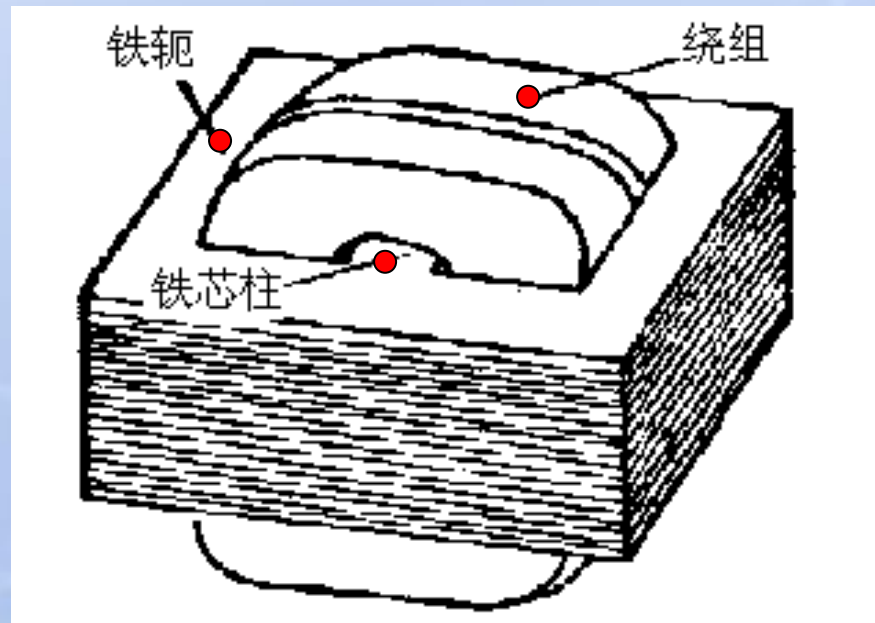
变压器的电路，一般用绝缘铜线或铝线绕制而成。

有圆筒式、螺旋式、连续式和纠结式，如图3-6

高压绕组 { 匝数多
 { 导线细

低压绕组 { 匝数少
 { 导线粗

单相壳式变压器



3.1.2 基本结构

三、绝缘套管

将线圈的高、低压引线引到箱外，是引线对地的绝缘，担负着固定的作用。套管由瓷质的绝缘套管和导电杆组成。



3.1.2 基本结构

四、油箱

油浸式变压器的器身浸在变压器油的油箱中。油箱用钢板焊成，为了增强冷却效果，油箱壁上焊有散热管或装设散热器。

油为矿物油，是冷却介质，又是绝缘介质。



3.1.2 基本结构

四、油箱

此外，还有储油柜、吸湿器、安全气道、净油器和气体继电器。



第三章 变压器



3.1.3 分类

按用途分： 电力变压器、特种变压器。

按绕组数分： 单绕组(自耦)、双绕组、三绕组变压器。

按相数分： 单相变压器、三相变压器。

按冷却方式分： 干式、油浸式、充气式变压器。

按高低侧电压分： 升压变压器、降压变压器。

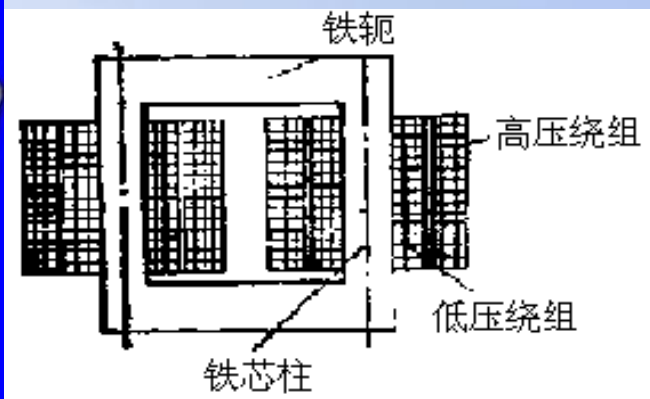
按容量大小分： 小型(630kVA以下)、中型(800~6300kVA)、
大型(8000~63000kVA)、特大型(90000以上)。

第三章 变压器

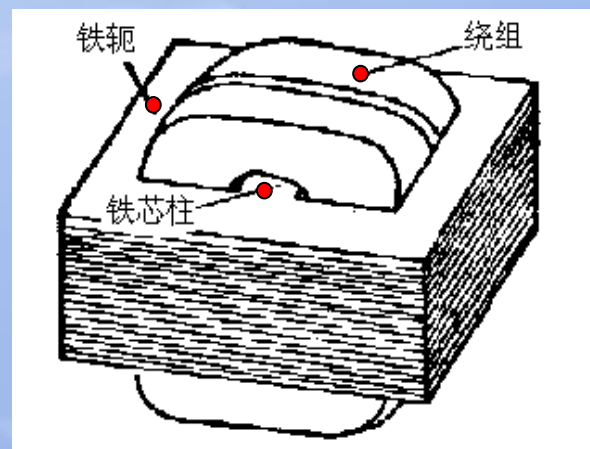
3.1.3 分类

按铁心结构分：心式变压器和壳式变压器。

单相心式变压器



单相壳式变压器



3.1.3 分类

按调压方式分：无励磁调压变压器和有载调压变压器。

无励磁调压指的就是**无载调压**，变压器不带电的时候才能调压。

变压器**在负载运行中能完成分接电压切换**的称为有载调压变压器。随着地区负荷增减变化，配合无功补偿设备并联电容器及低压电抗器的投切，调整分接头，以便随时保证对用户的供电电压质量。

按冷却介质和冷却方式分：

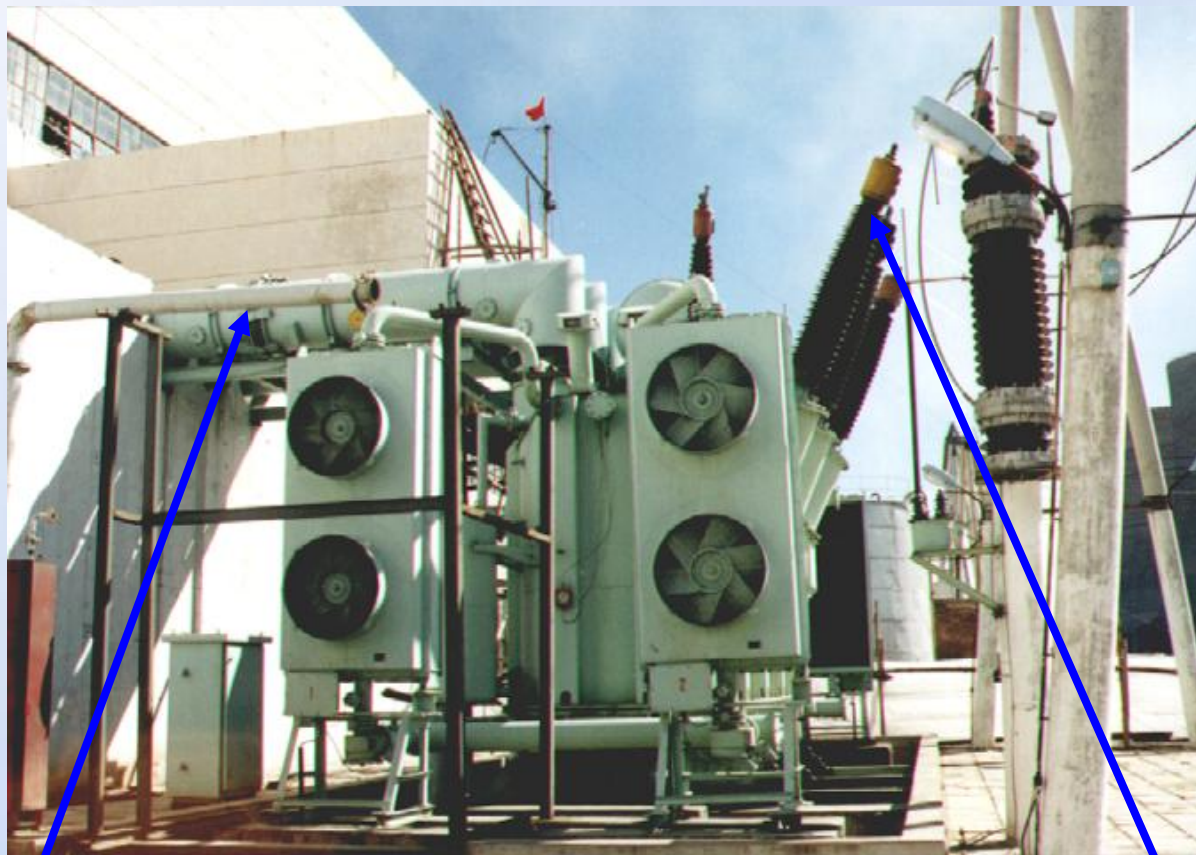
干式变压器、油浸式变压器和充气式变压器。

三相干式变压器



接触调压器





连接发电机与电网的升压变压器

连接发电机的
封闭母线

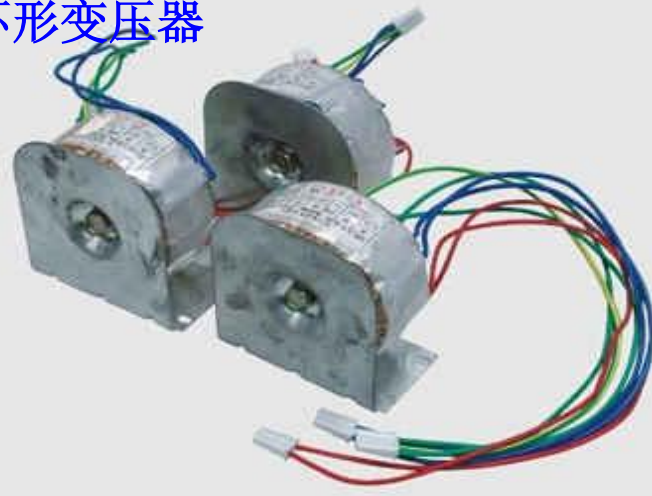
与电网相连
的高压出线端

第三章 变压器

电源变压器



环形变压器



控制变压器

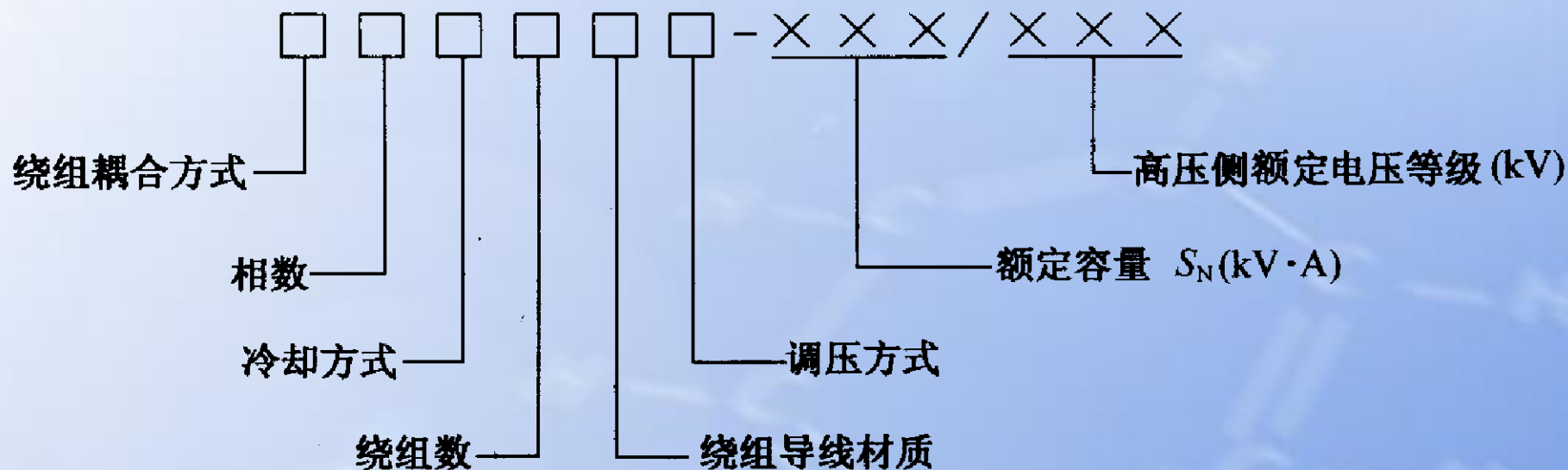


第三章 变压器

3.1.4 型号与额定值

一、型号

型号表示一台变压器的结构、额定容量、电压等级、冷却方式等内容，表示方法为



“-”前表示：结构信息，见下页表所示；

“-”后表示：额定容量/高压额定值。

第三章 变压器

电力变压器分类及代表符号

| 代表符号排列顺序 | 分 类 | 类 别 | 代表符号 |
|----------|--------|---|-----------------------------------|
| 1 | 绕组耦合方式 | 自耦 | O |
| 2 | 相数 | 单相 三相 | D S |
| 3 | 冷却方式 | 油浸自冷 干式空气自冷 干式浇注式绝缘 油浸风冷 油浸水冷 强迫油循环风冷 强迫油循环水冷 | — G C F S FP SP |
| 4 | 绕组数 | 双绕组 三绕组 | — S |
| 5 | 绕组导线材质 | 铜 铝 | — L |
| 6 | 调压方式 | 无励磁调压 有载调压 | — Z |

如OSFPSZ-250000/220表明自耦三相强迫油循环风冷三绕组铜线有载调压，额定容量250000kVA，高压额定电压220kV电力变压器

二、额定值

额定容量 S_N (kVA)：额定运行时所能输出的视在功率。

额定电压 U_{1N}/U_{2N} (kV) $\left\{ \begin{array}{l} U_{1N} \text{ 是一次侧所加的额定电压;} \\ U_{2N} \text{ 是在加 } U_{1N} \text{ 时二次侧的开路电压。} \end{array} \right.$

额定电流 I_{1N}/I_{2N} (A) 在额定容量下允许长期通过的电流。

额定频率 $f_N=50 \text{ Hz}$

三相变压器

单相： $S_N = U_{1N} I_{1N} = U_{2N} I_{2N}$ 额定电压指线电压；

三相： $S_N = \sqrt{3} U_{1N} I_{1N} = \sqrt{3} U_{2N} I_{2N}$ 额定电流指线电流。



3.2

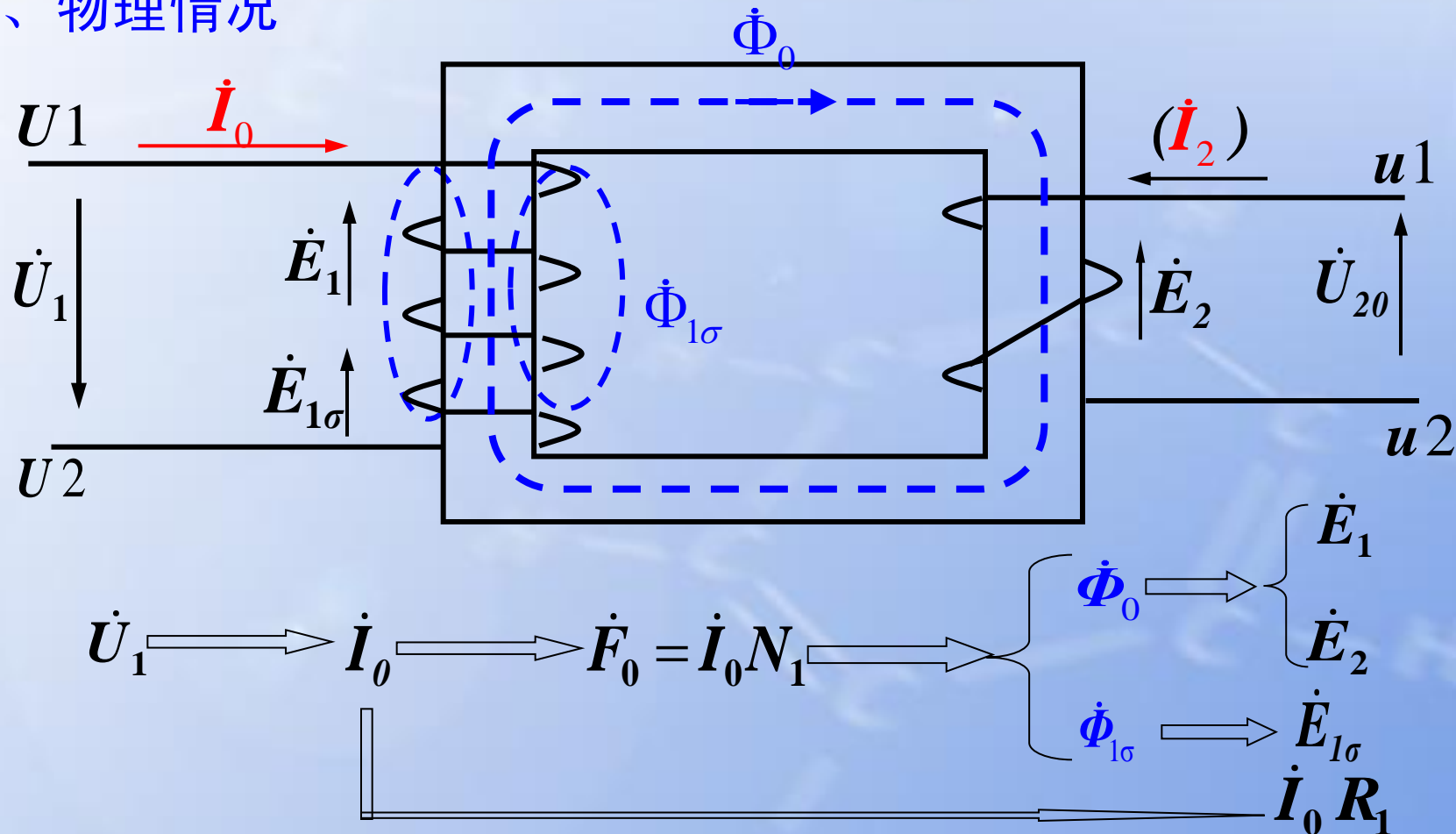
变压器的运行原理

第三章 变压器

3.2.1 单相变压器的空载运行

3.2.1 电磁关系

一、物理情况



主磁通与漏磁通的区别

- 1) 性质上: Φ_0 与 I_0 成非线性关系; $\Phi_{1\sigma}$ 与 I_0 成线性关系;
- 2) 数量上: Φ_0 占99%以上, $\Phi_{1\sigma}$ 仅占1%以下;
- 3) 作用上: Φ_0 起传递能量的作用, $\Phi_{1\sigma}$ 起漏抗压降作用。

二、各电磁量参考方向的规定 (见课本p65)

一次侧遵循电动机惯例, 二次侧遵循发电机惯例。

强调: 磁通与产生它的电流之间符合右手螺旋定则; 电动势与感应它的磁通之间符合右手螺旋定则。

第三章 变压器

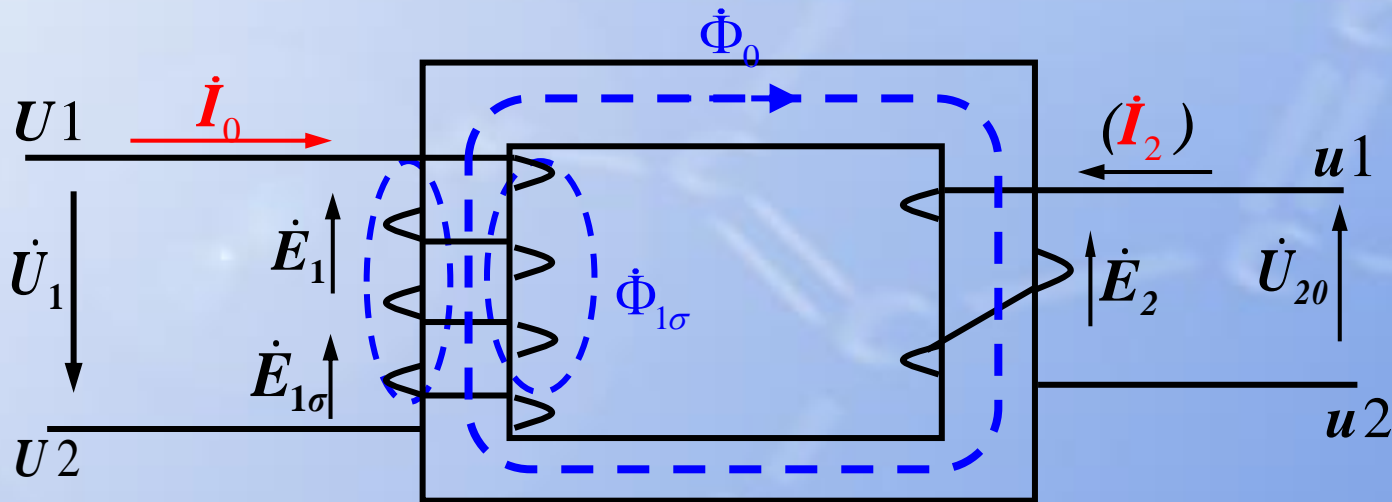
三、感应电动势分析

1. 主磁通感应的电动势——主电动势

设 $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$

则 $e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} = 2\pi f N_1 \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) = E_{1m} \sin(\omega t - 90^\circ)$

有效值 $E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$ 相量 $\dot{E}_1 = -j 4.44 f N_1 \dot{\Phi}_m$



第三章 变压器

三、感应电动势分析

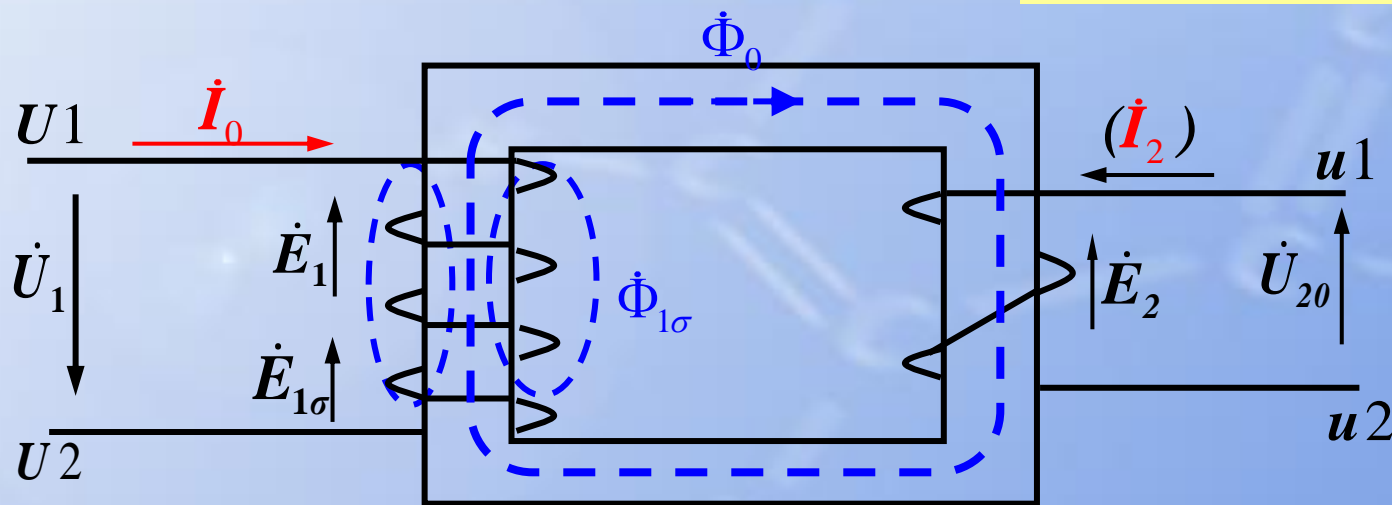
1. 主磁通感应的电动势——主电动势

有效值 $E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$

可见，当主磁通按正弦规律变化时，所产生的一次主电动势也按正弦规律变化，时间相位上滞后主磁通 90° 。主电动势的大小与电源频率、绕组匝数及主磁通的最大值成正比。

同理，二次主电动势也有同样的结论。

$$E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$$



2.漏磁通感应的电动势——漏电动势

根据主电动势的分析方法，同样有

$$E_{1\sigma} = 4.44 f N_1 \Phi_{1\sigma}$$

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j 4.44 f N_1 \dot{\Phi}_{1\sigma m}$$

漏电动势也可以用漏抗压降来表示，即

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j\omega L_{1\sigma} \dot{I}_0 = -j \dot{I}_0 X_1$$

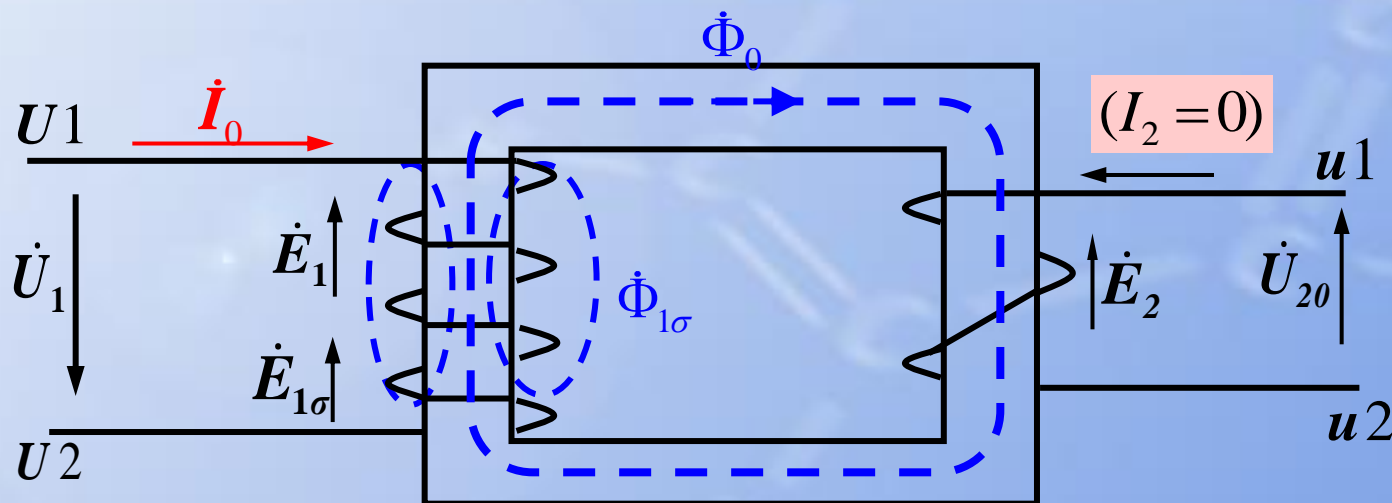
由于漏磁通主要经过非铁磁路径，磁路不饱和，故磁阻很大且为常数，所以漏电抗 X_1 很小且为常数，它不随电源电压负载情况而变。

3.2.2 空载电流和空载损耗

一、空载电流

1. 作用与组成

空载电流 I_0 包含两个分量，一个是励磁分量 I_{0r} ，作用是建立磁场，另一个是铁损耗分量 I_{0a} ，主要作用是供铁损耗。



第三章 变压器

3.2.2 空载电流和空载损耗

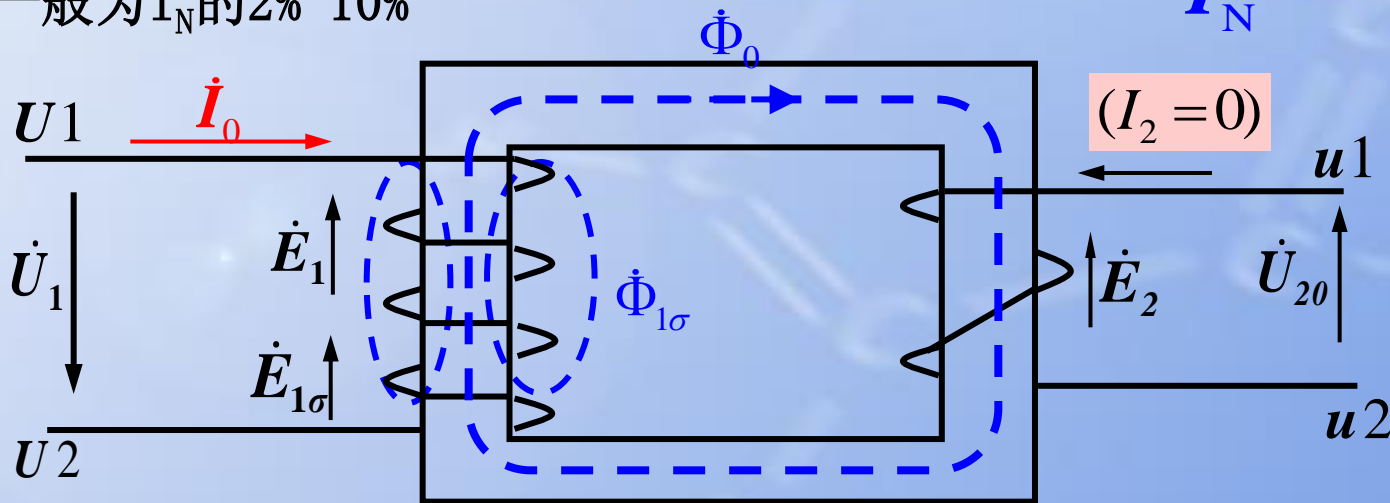
一、空载电流 2、性质和大小

性质： 由于空载电流的无功分量远大于有功分量，所以空载电流主要是感性无功性质——也称**励磁电流**；

大小： 与电源电压和频率、线圈匝数、磁路材质及几何尺寸有关，用空载电流百分数 $I_0\%$ 来表示：

$$I_0\% = \frac{I_0}{I_N} \times 100\%$$

空载电流一般为 I_N 的2%~10%



第三章 变压器

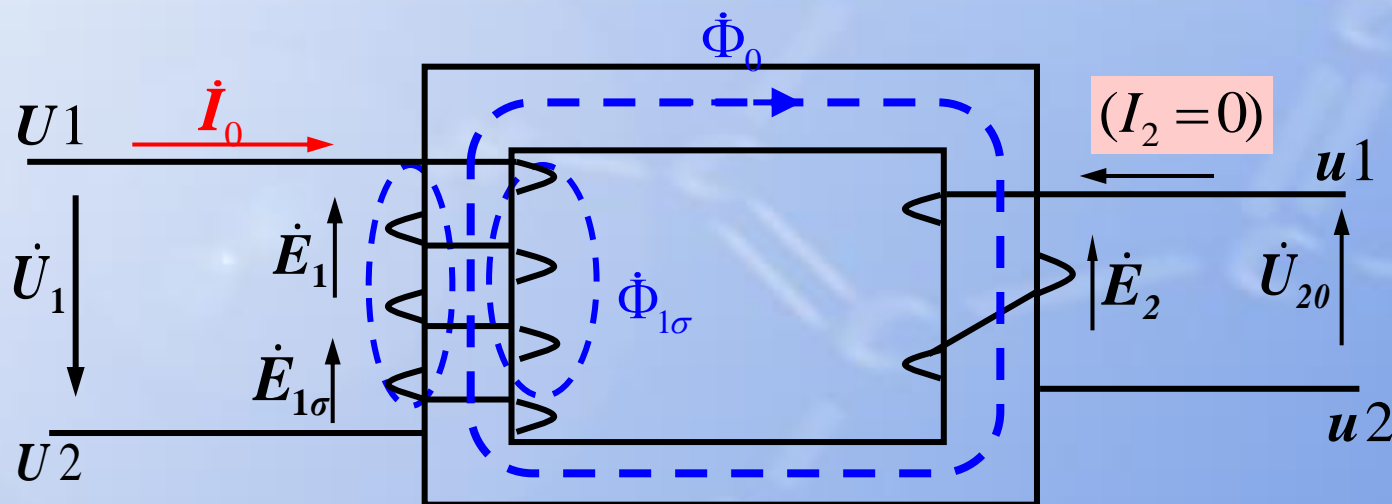
二、空载损耗

变压器在传递能量过程中有铁耗与铜耗。

铁耗：磁滞损耗与涡流损耗，近似等于空载损耗；

铜耗：一、二侧绕组内电流引起的直流电阻损耗；

空载损耗约占额定容量的0.2%~1%，而且随变压器容量的增大而下降。为减少空载损耗，改进设计结构的方向是采用优质铁磁材料：优质硅钢片、激光化硅钢片或应用非晶态合金。



- 三、空载磁动势 F_0
- 空载磁动势是指一次测空载电流 I_0 建立的磁动势，它产生主磁通和只与一次测绕组自身交链的漏磁通。
- 变压器空载运行是，仅有这一空载磁动势产生磁场。

3.2.3 空载时的电动势方程、等效电路和相量图

一、电动势平衡方程和变比

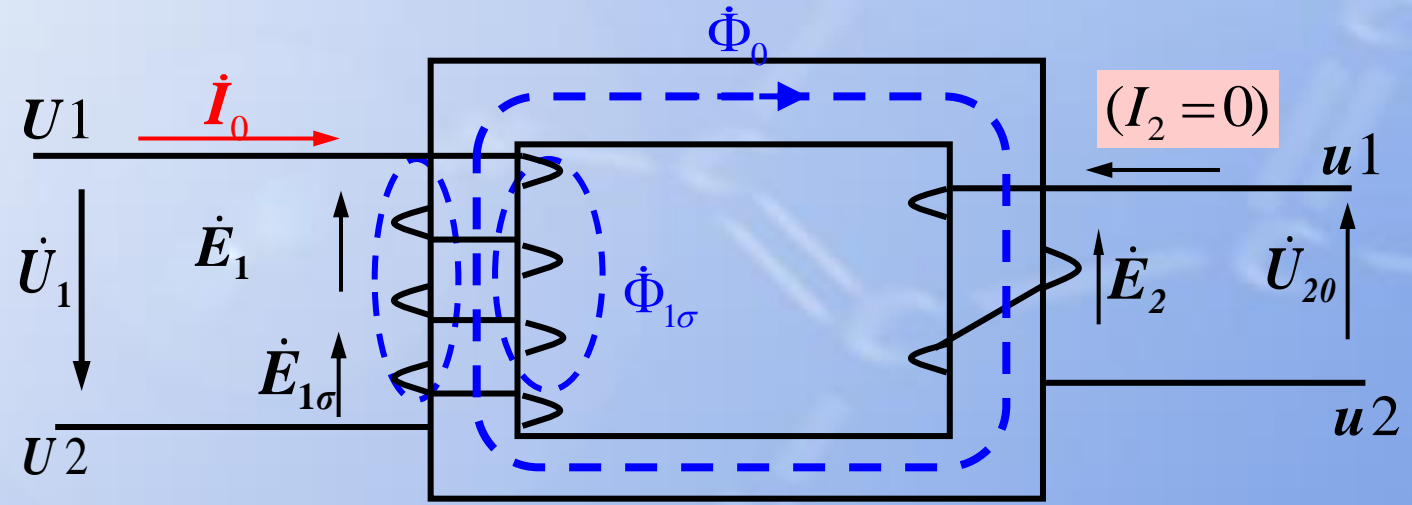
1、电动势平衡方程

(1) 一次侧电动势平衡方程

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1\sigma} + \dot{I}_0 R_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 R_1 + j\dot{I}_0 X_1 = -\dot{E}_1 + \mathbf{Z}_1 \dot{I}_0$$

忽略很小的漏阻抗压降，并写成有效值形式，有

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



第三章 变压器

3.2.3 空载时的电动势方程、等效电路和相量图

一、电动势平衡方程和变比

1、电动势平衡方程

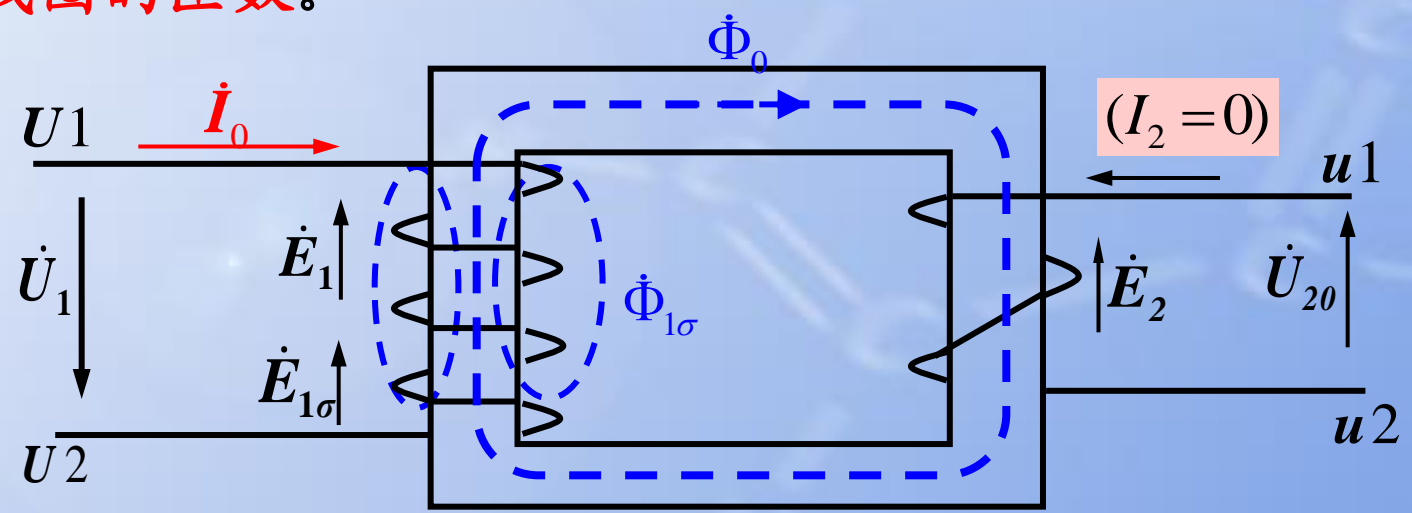
$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$$

则

$$\Phi_m = \frac{E_1}{4.44 f N_1} \approx \frac{U_1}{4.44 f N_1}$$

重要公式

可见，影响主磁通大小的因素有电源电压和频率，以及一次线圈的匝数。



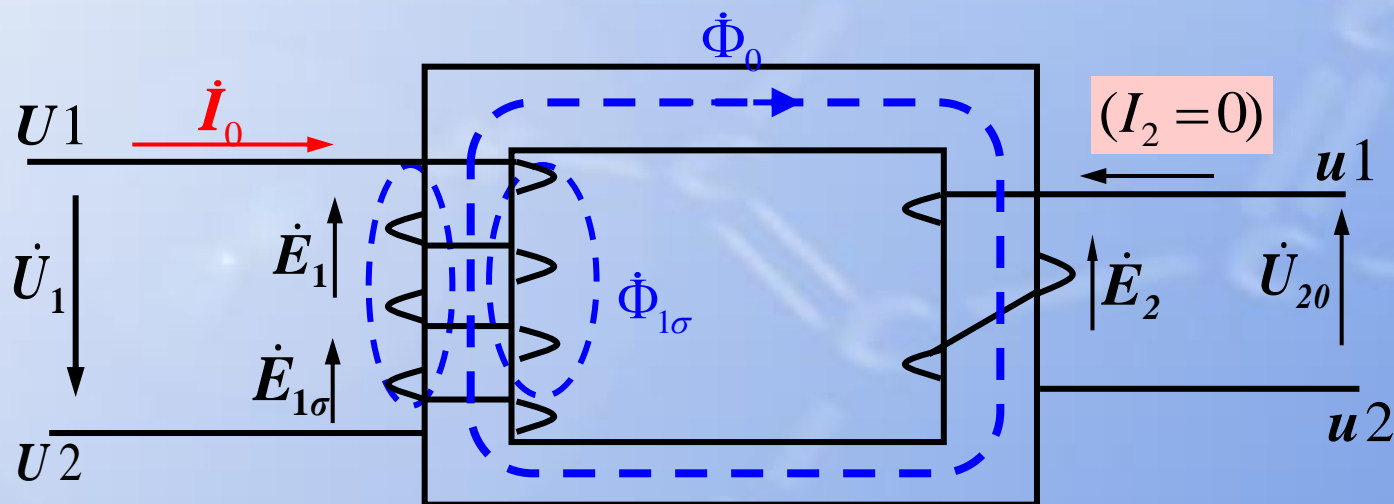
第三章 变压器

(2) 二次侧电动势平衡方程

$$\dot{U}_{20} = \dot{E}_2$$

2. 变比

定义 $k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \approx \frac{U_1}{U_{20}} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}}$



(2) 二次侧电动势平衡方程

$$\dot{U}_{20} = \dot{E}_2$$

2、变比

定义 $k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \approx \frac{U_1}{U_{20}} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}}$

对三相变压器，变比为一、二次侧的相电动势之比，近似为额定相电压之比，具体为

Y, d接线 见课本p85 $k = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}U_{2N}}$

D, y接线 $k = \frac{\sqrt{3}U_{1N}}{U_{2N}}$

二、空载时的等效电路和相量图

1、等效电路

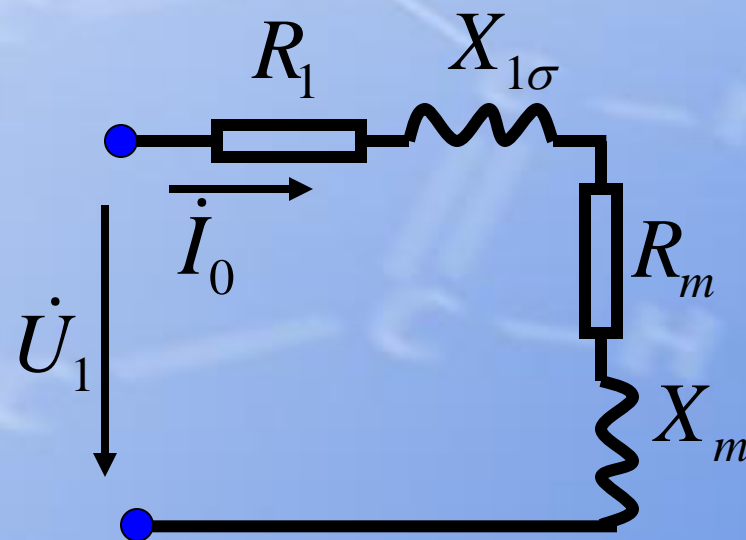
基于 $\dot{E}_{1\sigma} = -j\dot{I}_0 X_{1\sigma}$ 表示法 $\dot{\Phi}$ 感应的电动势 \dot{E}_1 也用电抗压降表示,由于 $\dot{\Phi}$ 在铁心中引起铁损 P_{Fe} ,所以还要引入一个电阻 R_m ,用 $\dot{I}_0^2 R_m$ 等效 P_{Fe} ,即

$$\dot{E}_1 = -\dot{I}_0(R_m + jX_m) = -\dot{I}_0 Z_m$$

一次侧的电动势平衡方程为

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1 \\ &= (R_m + jX_m)\dot{I}_0 + (R_1 + jX_1)\dot{I}_0\end{aligned}$$

空载时等效电路为

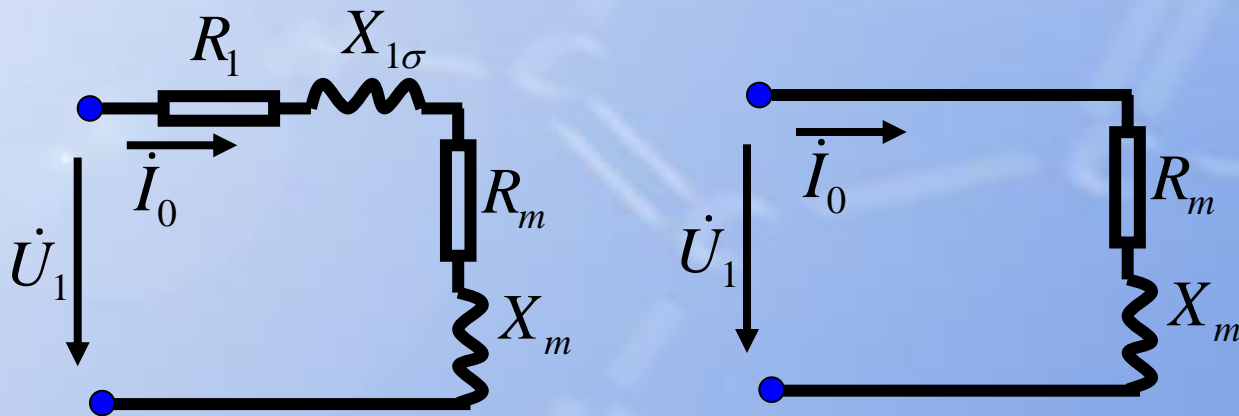


第三章 变压器

R_m, X_m, Z_m —励磁电阻、励磁电抗、励磁阻抗。由于磁路具有饱和特性，所以 $Z_m = R_m + jX_m$ 不是常数，随磁路饱和程度增大而减小。

由于 $R_m \gg R_1, X_m \gg X_1$ ，所以有时忽略漏阻抗，空载等效电路只是一个 Z_m 元件的电路。在 U_1 一定的情况下， I_0 大小取决于 Z_m 的大小。从运行角度讲，希望 I_0 越小越好，所以变压器常采用高导磁材料，增大 Z_m ，减小 I_0 ，提高运行效率和功率因数。

例3-1



空载运行小结

(1) 一次侧主电动势与漏阻抗压降总是与外施电压平衡,若忽略漏阻抗压降,则一次主电势的大小由外施电压决定。

(2) 主磁通大小由电源电压、电源频率和一次线圈匝数决定,与磁路所用的材质及几何尺寸基本无关。

(3) 空载电流大小与主磁通、线圈匝数及磁路的磁阻有关,铁心所用材料的导磁性能越好,空载电流越小。

(4) 电抗是交变磁通所感应的电动势与产生该磁通的电流的比值,线性磁路中,电抗为常数,非线性电路中,电抗的大小随磁路的饱和而减小。



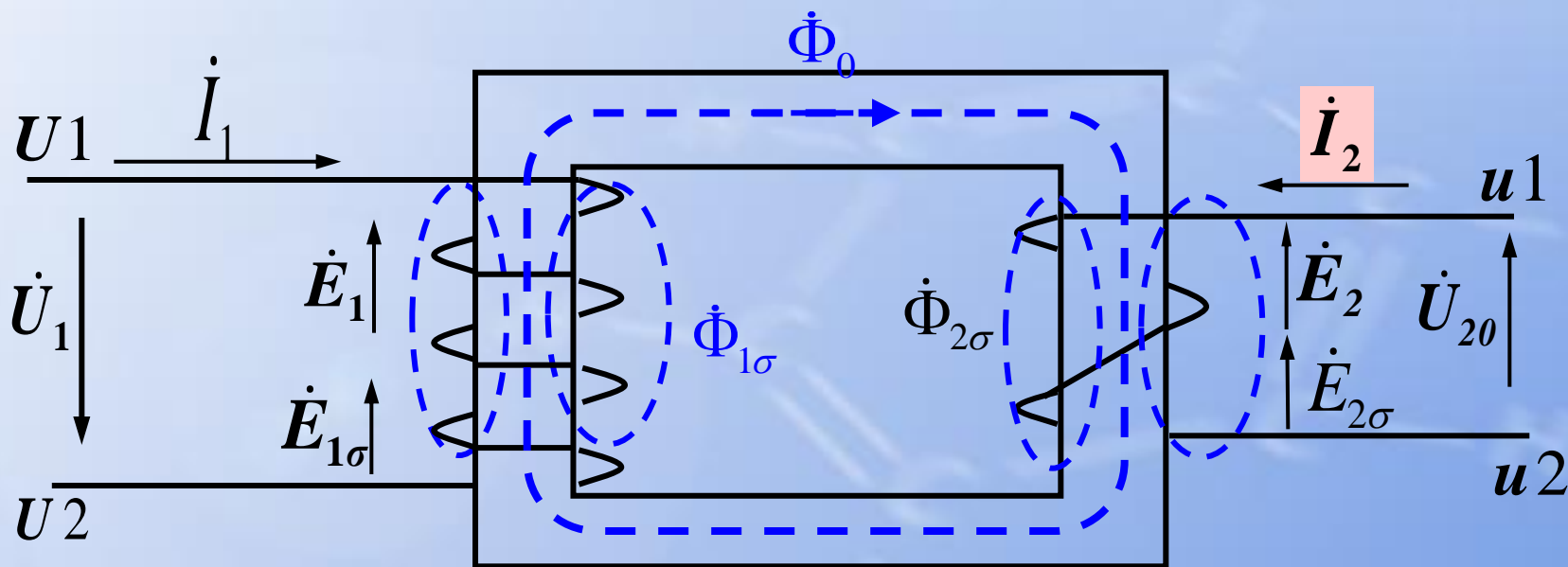
3.3

单相变压器的负载运行

3.3 单相变压器的负载运行

变压器一次侧接在额定频率、额定电压的交流电源上，二次接上负载的运行状态，称为**负载运行**。

3.3.1 负载运行时的电磁关系 (如课本p72)



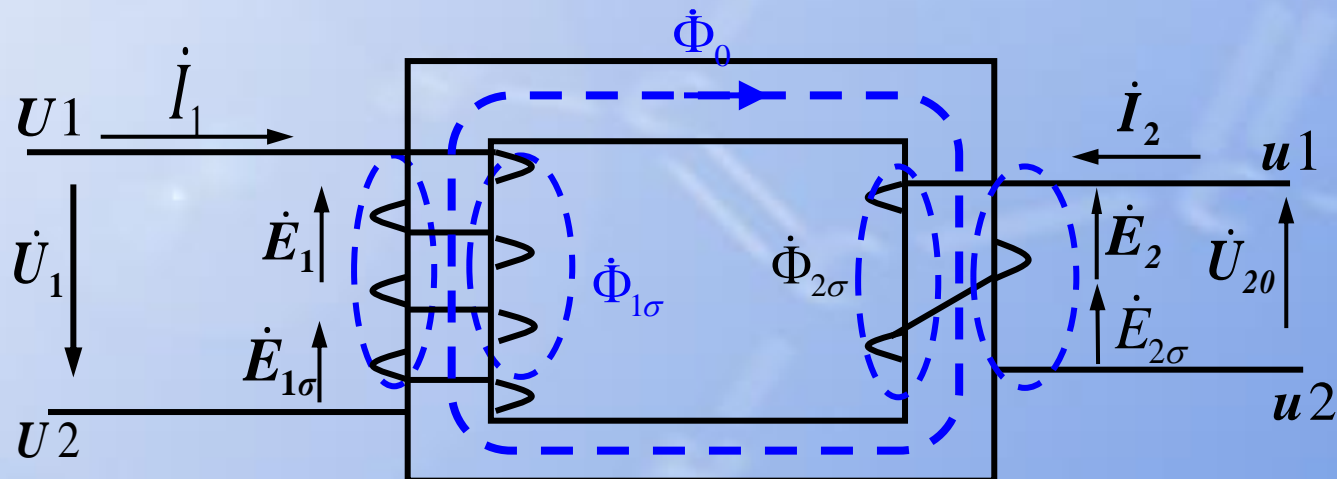
3.3.2 基本方程

一、磁动势平衡方程

空载时,一次磁动势 \dot{F}_0 产生主磁通 $\dot{\Phi}_0$;负载时一次磁动势 \dot{F}_1 和二次磁动势 \dot{F}_2 共同作用产生 $\dot{\Phi}_0$. $\dot{\Phi}_0$ 大小主要取决于 \dot{U}_1 ,只要 U_1 保持不变,由空载到负载 $\dot{\Phi}_0$ 大小基本不变因此有磁动势平衡方程

$$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_0 \quad \text{或} \quad N_1 \dot{I}_1 + N_2 \dot{I}_2 = N_1 \dot{I}_0$$

用电流形式表示 $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \left(-\frac{N_2}{N_1}\right) \dot{I}_2 = \dot{I}_0 + \left(-\frac{\dot{I}_2}{k}\right) = \dot{I}_0 + \dot{I}_{1L}$



第三章 变压器

用电流形式表示
$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \left(-\frac{N_2}{N_1}\right)\dot{I}_2 = \dot{I}_0 + \left(-\frac{\dot{I}_2}{k}\right) = \dot{I}_0 + \dot{I}_{1L}$$

表明：变压器的负载电流包括两个分量：一个是励磁电流 \dot{I}_0 ，它用来产生主磁通；另一个是负载分量 \dot{I}_{1L} ，它起平衡二次磁动势的作用。

电磁关系将一、二次联系起来，二次电流增加或减少必然引起一次电流的增加或减少。

负载运行时，忽略空载电流有：
$$\dot{I}_1 \approx -\frac{\dot{I}_2}{k} \text{ 或 } \frac{I_1}{I_2} \approx \frac{1}{k} = \frac{N_2}{N_1}$$

表明，一、二次电流比近似与匝数成反比。可见，匝数不同，不仅能改变电压，同时也能改变电流。

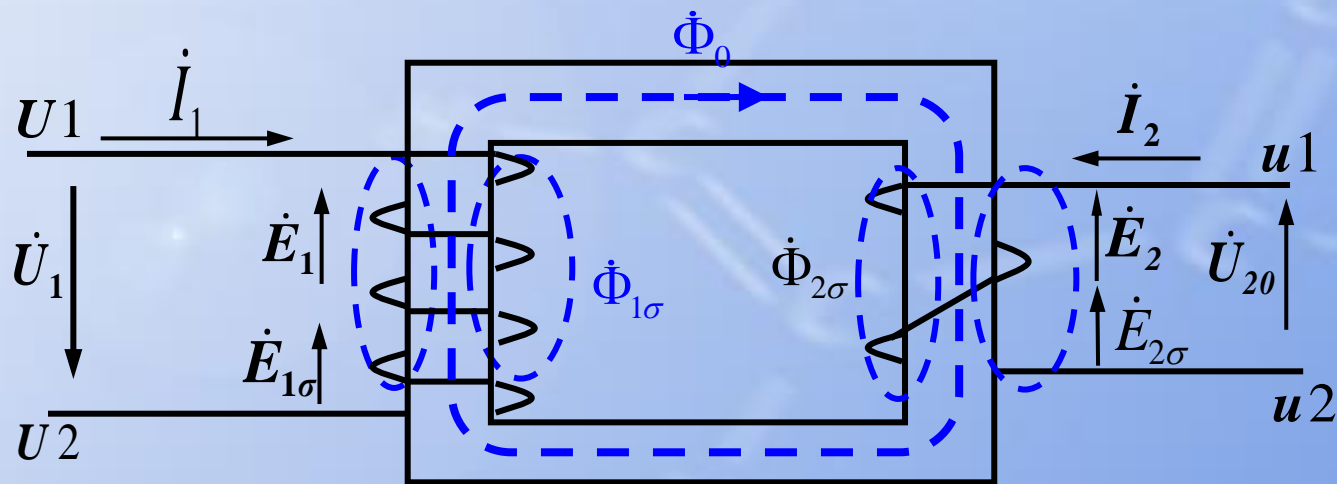
二、电动势平衡方程

根据基尔霍夫电压定律可写出一、二次侧电动势平衡方程

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 R_2 - j\dot{I}_2 X_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2$$

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_L$$



二、电动势平衡方程

上式说明一、二次侧能量传递的关系，当变压器空载运行时， $I_2=0$ ，二次侧没有功率输出和功率损耗，此时 $I_1=I_0$ ，说明变压器一次侧从电源吸取不大的空载电流，用于建立空载磁场和提供空载损耗所需的电能。

变压器负载运行时，二次侧电流 I_2 的增加必然引起一次侧电流 I_1 的相应的增加，因此一次侧除了从电源吸取 I_0 以外，还要吸取一个负载分量电流 I_{1L} ，于是，二次侧对电能需求的变化，就由磁动势平衡关系反映到一次侧。

变压器一、二次侧绕组之间，虽然没有电的联系，但借助于磁耦合，实现了一、二次侧绕组间的能量传递和电压、电流的变换。

3.3.3 等效电路及相量图

根据式3-19已可以对变压器运行状态进行计算。但对于一、二次侧匝数不等，且是求解复数的联立方程组，实际运算相当复杂困难。

故常用的变压器分析方法是折算法，用它可以得到较简单的等值电路和一些变压器的参数，便于对变压器进行分析计算。

从磁动势平衡关系中，二次侧绕组的负载电流是通过它的磁动势来影响一次侧绕组的电流的，所以，只要 F_2 不变，则从一次侧来观察二次侧的作用是完全一样的。

3.3.3 等效电路及相量图

一、折算

折算：将变压器的二次（或一次）绕组用另一个绕组($N_2=N_1$)来等效，同时对该绕组的电磁量作相应的变换，以保持两侧的电磁关系不变，用一个等效的电路代替实际的变压器。

常将实际的变压器的一、二次侧绕组的匝数变换为同一匝数，这样变压器的变比 = 1，可使变压器的计算大为简化。

3.3.3 等效电路及相量图

一、折算

折算原则： 1) 保持二次侧磁动势不变； 2) 保持二次侧各功率或损耗不变。

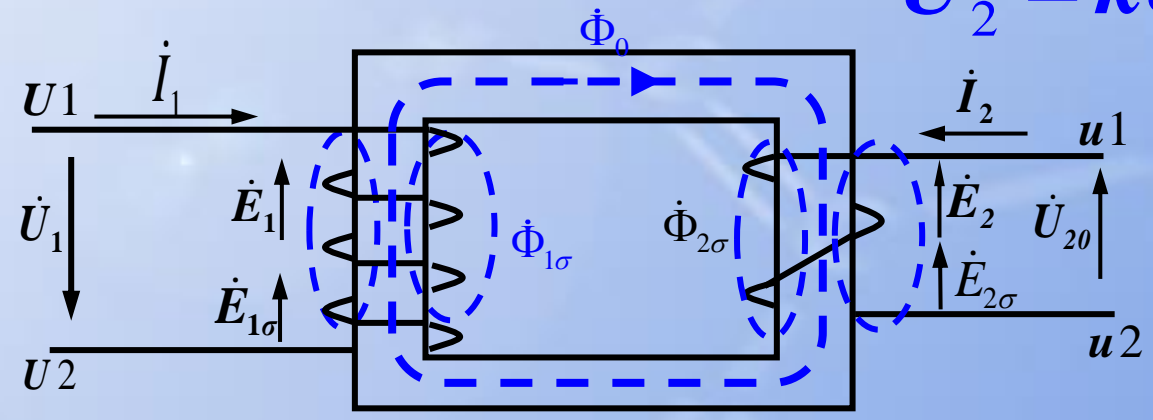
方法： (将二次侧折算到一次侧)

电动势的折算

$$E'_2 = kE_2 = E_1$$

二次侧电压的折算

$$U'_2 = kU_2$$



3.3.3 等效电路及相量图

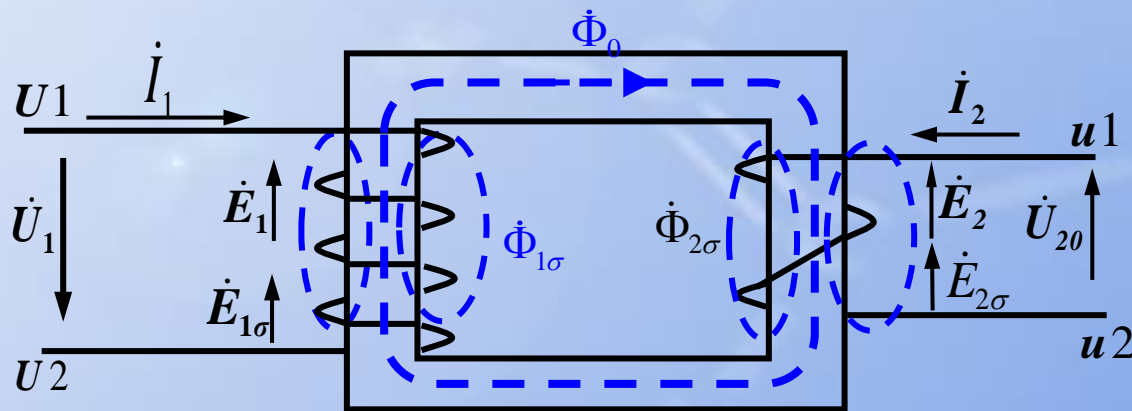
一、折算

折算原则： 1) 保持二次侧磁动势不变； 2) 保持二次侧各功率或损耗不变。

电流的折算

折算前后磁动势不变

$$I_2' = \frac{I_2}{k}$$



3.3.3 等效电路及相量图

一、折算

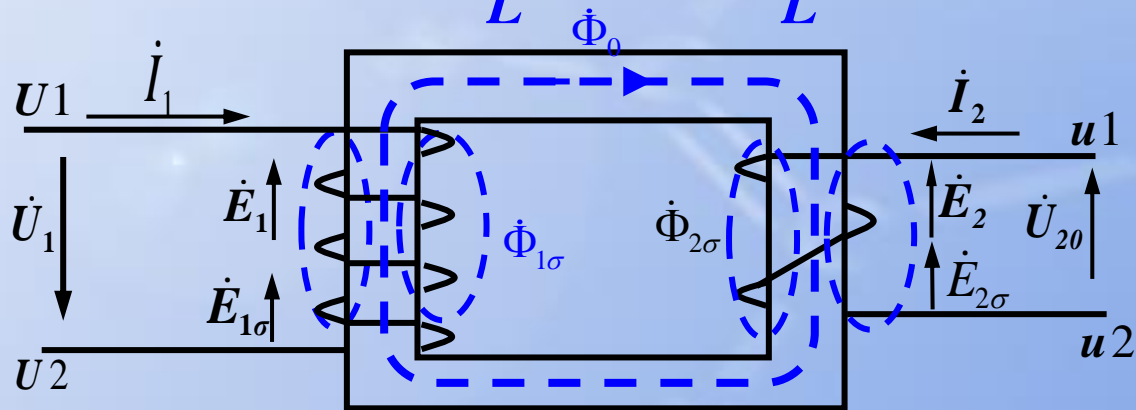
折算原则：1) 保持二次侧磁动势不变；2) 保持二次侧各功率或损耗不变。

阻抗的折算

$$r'_2 = k^2 r_2$$

$$x'_2 = k^2 x_2$$

$$Z'_L = k^2 Z_L$$



3.3.3 等效电路及相量图

综上所述，把低压侧各物理量折算到高压侧时，凡单位时伏特的物理量折算值等于原值乘以变比 k ，凡单位为安培的物理量折算值等于原值除以变比 k ，凡单位为欧姆的物理量折算值等于原值乘以变比的平方。

折算后的方程式为

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$$

$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 R'_2 - j\dot{I}'_2 X'_2 = \dot{E}'_2 + \dot{I}'_2 Z'_2$$

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_0$$

$$\dot{E}'_2 = \dot{E}_1$$

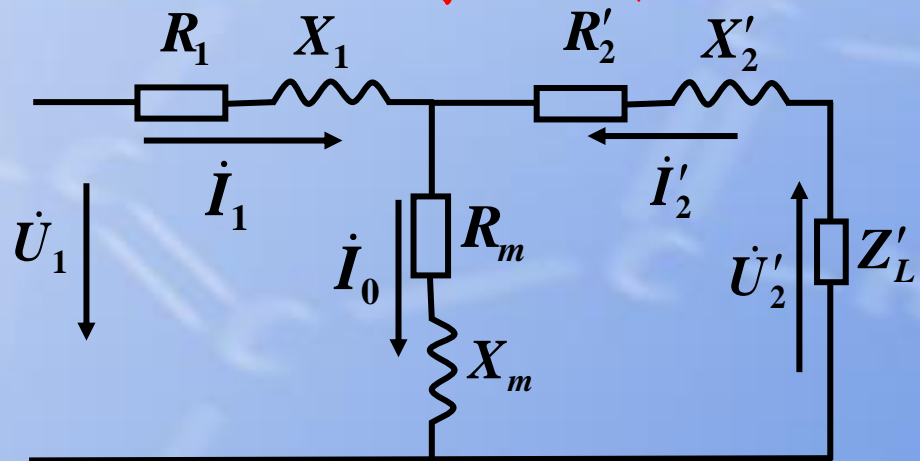
$$\dot{E}_1 = -Z_m \dot{I}_0$$

$$\dot{U}'_2 = \dot{I}'_2 Z'_L$$

二、等效电路

根据折算后的方程，可以作出变压器的等效电路。

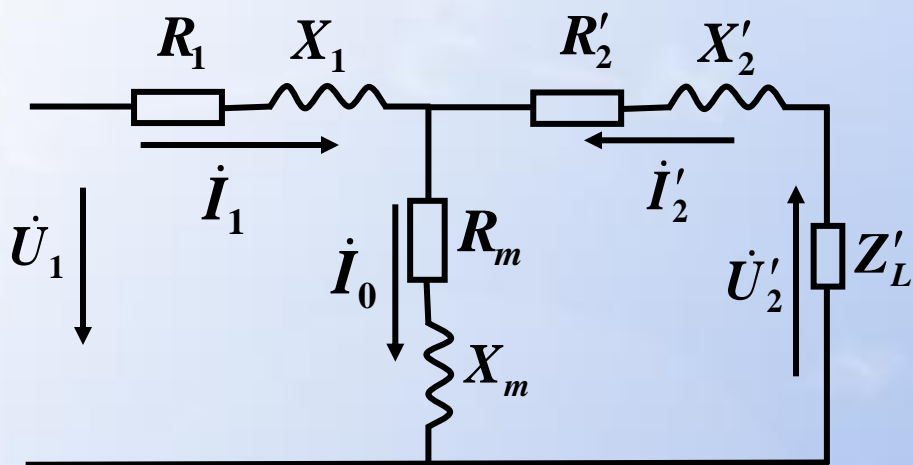
T型等效电路:



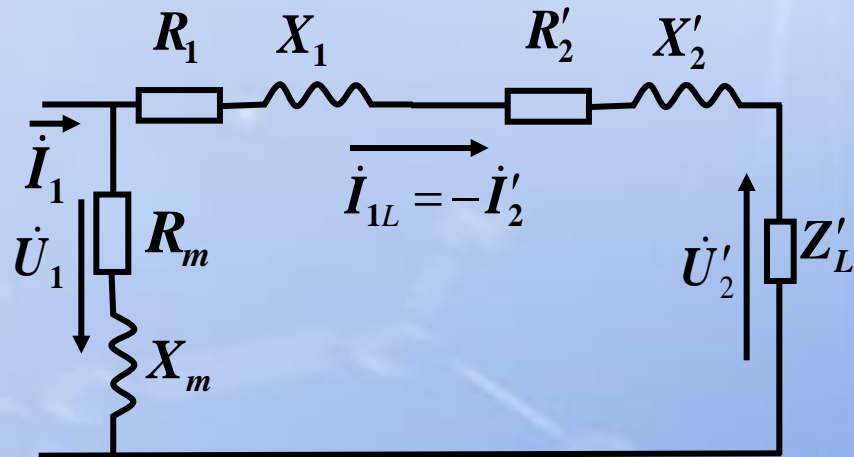
第三章 变压器

二、等效电路

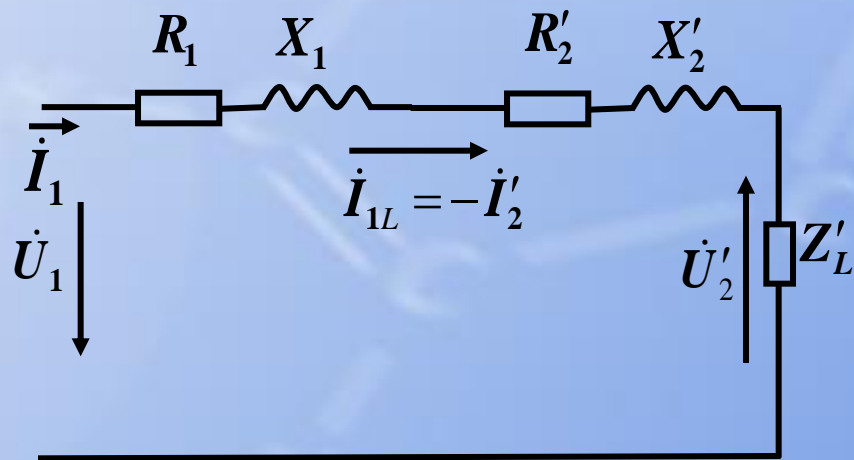
T型等效电路:



近似等效电路

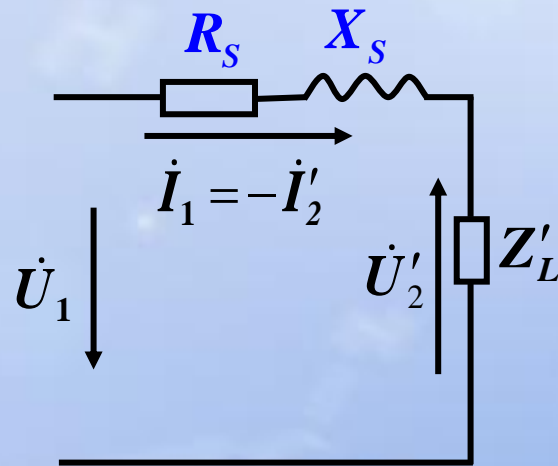
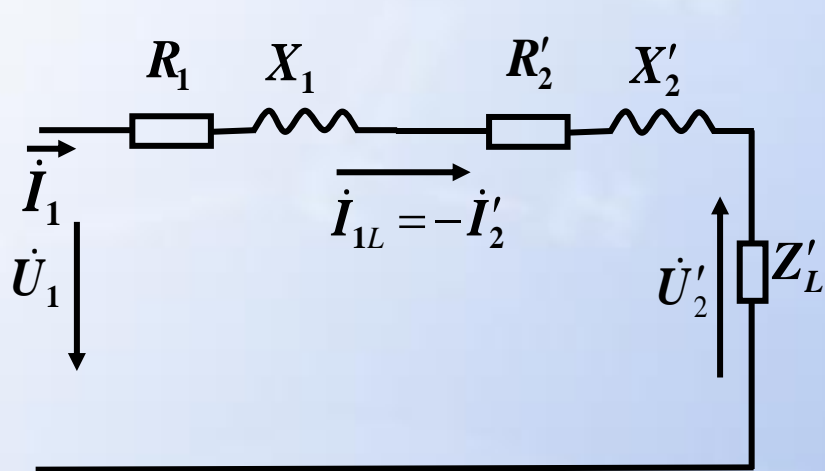


简化等效电路



第三章 变压器

简化等效电路:



其中

$$\begin{aligned} R_S &= R_1 + R_2' \\ X_S &= X_1 + X_2' \\ Z_S &= R_S + jX_S \end{aligned}$$

短路电阻

短路电抗

短路阻抗

由简化等效电路可知，短路阻抗起限制短路电流的作用，由于短路阻抗值很小，所以变压器的短路电流值较大，一般可达额定电流的10~20倍。



3.4

变压器的参数测定

3.4 变压器的参数测定

解基本方程式，画等值电路等必须要知道变压器的各阻抗参数，对已制造出来的变压器，可通过空载实验和短路实验测定参数。

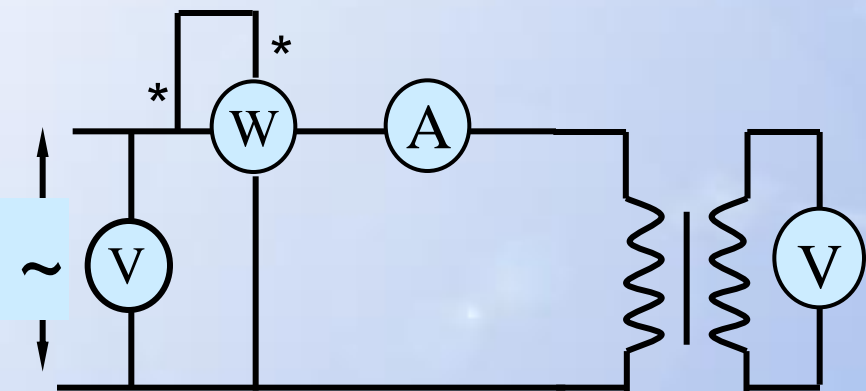
第三章 变压器

3.4 变压器的参数测定

3.4.1 空载实验

一、目的：通过测量空载电流和一、二次电压及空载功率来计算变比、空载电流百分数、铁损和励磁阻抗。

二、接线图



如需高压侧数值，则应乘以k平方

三、要求及分析

低压侧加电压，高压侧开路；

忽略 R_1 和 X_1 ，即 $P_0 \approx P_{Fe}$

$$k = \frac{U_{20}}{U_{1N}}$$

$$I_0 \% = \frac{I_0}{I_{1N}} 100\%$$

$$Z_m = \frac{U_{1N}}{I_0}$$

$$R_m = \frac{P_0}{I_0^2}$$

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}$$

第三章 变压器

3.4.2 短路实验

1. 目的：通过测量短路电流、短路电压及短路功率来计算变压器的阻抗电压、铜损（负载损耗）和短路阻抗 Z_k 。

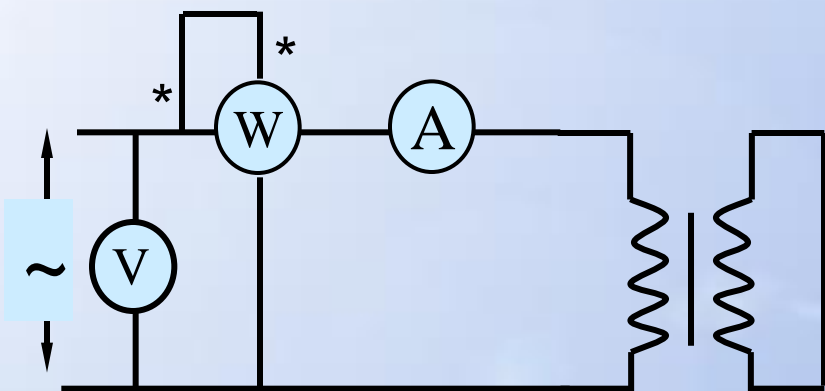
3. 要求及分析

高压侧加电压，低压侧短路；

由于外加电压很小，主磁通很少，铁损耗很少，忽略铁损，认为

$$P_S = p_{Cu}。$$

如式3-29



3.4.2 短路实验

阻抗电压 u_k 是指额定电流在 $Z_k(75^\circ\text{C})$ 上的阻抗电压降占额定电压的百分比，阻抗电压有电阻电压和电抗电压两个分量，如式(3-31)。

阻抗电压是变压器的重要参数之一，从正常运行角度来看，希望它小一些，即变压器的漏抗压降小一些，使二次侧电压随负载变化的波动程度小一些，而从限制短路电流的角度来看，又希望它大一些。

一般中小型变压器的阻抗电压为 $4\% \sim 10.5\%$ 。

大型变压器为 $12.5\% \sim 17.5\%$ 。

3.4.2 短路实验

变压器短路试验时，由于二次侧短路，因此无功率输出，输入功率全部变成功率损耗，称为短路损耗。

短路损耗包括铜损耗和铁损耗，但作短路试验时，外加试验电压很低，主磁通大大低于正常运行的数值，铁损耗很小，可以忽略不计，因而认为短路损耗就是铜损耗。由于电阻与温度有关，一般将它换算为 75°C 时的值。

额定短路损耗是指额定电流在 r_k (75°C) 上的铜损耗。如式
(3-32)

若是三相总的短路损耗需为单相的三倍



标么值

一、定义

在电力工程计算中，往往不用各个物理量的实际值，而是用实际值与同一单位的某一选定的基值之比，称为标么值。

标么值，就是指某一物理量的实际值与选定的同一单位的基准值的比值，即

$$\text{标么值} = \frac{\text{实际值}}{\text{基准值}}$$

标么值是个相对值，没有单位，某物理量的标么值，用原来符号的右上角加“*”表示。

二、基准值的确定

- 1、通常以额定值为基准值。
- 2、各侧的物理量以各自侧的额定值为基准；

线值以额定线值为基准值，相值以额定相值为基准值；

单相值以额定单相值为基准值，三相值以额定三相值为基准值；

3. 电阻、电抗、阻抗共用一个基值，这些都是一相的值，故阻抗基值应是额定相电压与额定相电流之比。

4. 有功功率、无功功率、视在功率公共一个基值，以额定视在功率为基值，单相功率的基值为 $U_p I_p$ 三相功率基值为单相的三倍。

即 U 和 E 的基准值为 U_B ， R ， X 和 Z 的基准值为 Z_B ， P ， Q 和 S 的基准值为 S_B 。

第三章 变压器

三、优点

- 1、额定值的标么值为1。即额定电压、额定电流、额定视在功率的标么值为1
- 2、百分值=标么值 $\times 100\%$;
- 3、折算前、后的标么值相等。线值的标么值=相值的标么值;
单相值的标么值=三相值的标么值;
- 4、某些意义不同的物理量标么值相等

$$Z_m^* = \frac{1}{I_0^*}$$

$$Z_s^* = U_{SN}^*$$

$$P_N^* = \cos \varphi_N$$

$$R_m^* = \frac{P_0^*}{I_0^{*2}}$$

$$R_s^* = P_{SN}^*$$

$$Q_N^* = \sin \varphi_N$$

四、缺点

标么值没有单位，物理意义不明确。

顺便指出，在变压器的分析与计算中，常用负载系数之一概念，用 β 表示，其定义为（设二次电压为额定值）

$$\beta = \frac{I_1}{I_{1N}} = \frac{I_2}{I_{2N}} = \frac{S_1}{S_N} = \frac{S_2}{S_{2N}}$$

可见

$$\beta = I_1^* = I_2^* = S_1^* = S_2^*$$

课本例3-2



3.5

变压器的运行特性

3.5 变压器的运行特性

变压器带负载运行时，主要的性能有两个，一是二次侧电压随负载变化的关系，即外特性，二是效率随负载变化的关系，即效率特性。

外特性通常用**电压变化率**来表示二次侧电压的变化程度，反映变压器供电电压的质量指标；效率特性反映变压器运行时的经济指标。

3.5 变压器的运行特性

3.5.1 电压变化率

定义：是指一次侧加50Hz额定电压时、二次侧额定电压与二次侧带负载时的实际电压之差的标么值，即

$$\Delta U = \frac{U_{20} - U_2}{U_{2N}} = \frac{U_{2N} - U_2}{U_{2N}}$$

见式3-33和3-34

电压变化率是表征变压器运行性能的重要指标之一，它大小反映了供电电压的稳定性。

电压变化率的大小与负载大小、性质及变压器的本身参数有关。

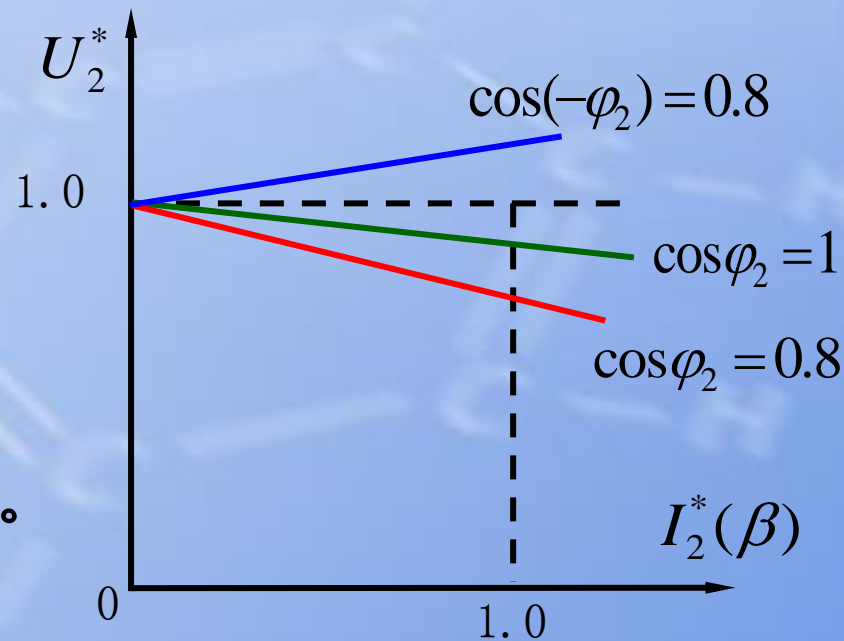
第三章 变压器

当变压器带阻性负载 ($\varphi_2=0$) 和阻感性负载 ($\varphi_2>0$) 时, ΔU 为正值, 这时二次端电压比空载时低。

当变压器带阻容性负载 ($\varphi_2<0$) 时, ΔU 可能为正, 也可能为负值。当 ΔU 为负值, 说明二次电压比空载时高。

$$\Delta U = \frac{U_{20} - U_2}{U_{2N}} = \frac{U_{2N} - U_2}{U_{2N}}$$

当电源电压和负载功率因数一定时, 二次端电压随负载电流变化的规律, 即 $U=f(I_2)$, 称为变压器的外特性。



可知，变压器在运行时，二次侧电压将随负载的变化而变化。

如果变化范围太大，将给用户带来不利影响，因此必须进行电压调整，一般电压变化率为5%

3.5.2 电压调整

为了保证二次端电压在允许范围之内,通常在变压器的高压侧设置抽头,并装设分接开关,调节变压器高压绕组的工作匝数,来调节变压器的二次电压。

中、小型电力变压器一般有三个分接头,记作 $U_N \pm 5\%$ 。大型电力变压器采用五个或多个分接头,例 $U_N \pm 2 \times 2.5\%$ 或 $U_N \pm 8 \times 1.5\%$ 。

分接开关有两种形式:一种只能在断电情况下进行调节,称为无载分接开关——这种调压方式称为无励磁调压;另一种可以在带负荷的情况下进行调节,称为有载分接开关——这种调压方式称为有载调压。

3.5.3 损耗、效率及效率特性

一、变压器的损耗

变压器的损耗主要是**铁损耗**和**铜损耗**两种。

铁损耗包括基本铁损耗和附加铁损耗。基本铁损耗为磁滞损耗和涡流损耗。附加损耗包括由铁心叠片间绝缘损伤引起的局部涡流损耗、主磁通在结构部件中引起的涡流损耗等。

铁损耗与外加电压大小有关，而与负载大小基本无关，故也称为不变损耗。

铜损耗分基本铜损耗和附加铜损耗。基本铜损耗是在电流在一、二次绕组直流电阻上的损耗；附加损耗包括因集肤效应引起的损耗以及漏磁场在结构部件中引起的涡流损耗等。

集肤效应即趋肤效应。导线内部实际上电流很小，电流集中在临近导线外表的一薄层。结果使它的电阻增加。导线电阻的增加，使它的损耗功率也增加。这一现象称为趋肤效应

铜损耗大小与负载电流平方成正比，故也称为可变损耗。

第三章 变压器

二、效率及效率特性

效率是指变压器的输出功率与输入功率的比值。 $\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$

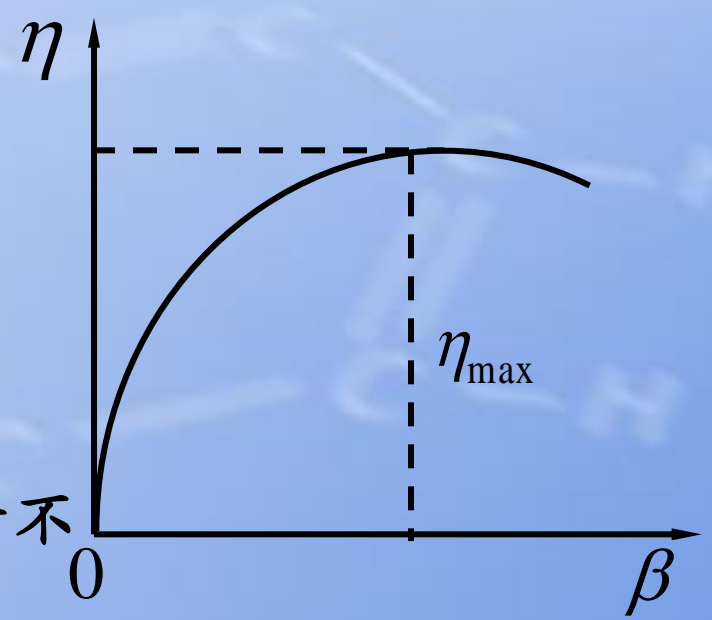
效率大小反映变压器运行的经济性能的好坏，是表征变压器运行性能的重要指标之一。

变压器效率的大小与负载的大小、功率因数及变压器本身参数有关。式3-36

效率特性：在功率因数一定时，变压器的效率与负载电流之间的关系 $\eta = f(\beta)$ ，称为变压器的效率特性。

式中 $\beta = \frac{I_2}{I_{2N}}$ 称为负载系数

当铜损耗等于铁损耗(可变损耗等于不变损耗)时，变压器效率最大：式3-38





例 3-3



3.6

三相变压器

3.6 三相变压器

目前电力系统均采用三相制，所以三相变压器得到了广泛的应用。

三相变压器由三台单相变压器组合而成，称为三相组式变压器，还有一种三柱式铁芯变压器，称为三相芯式变压器。

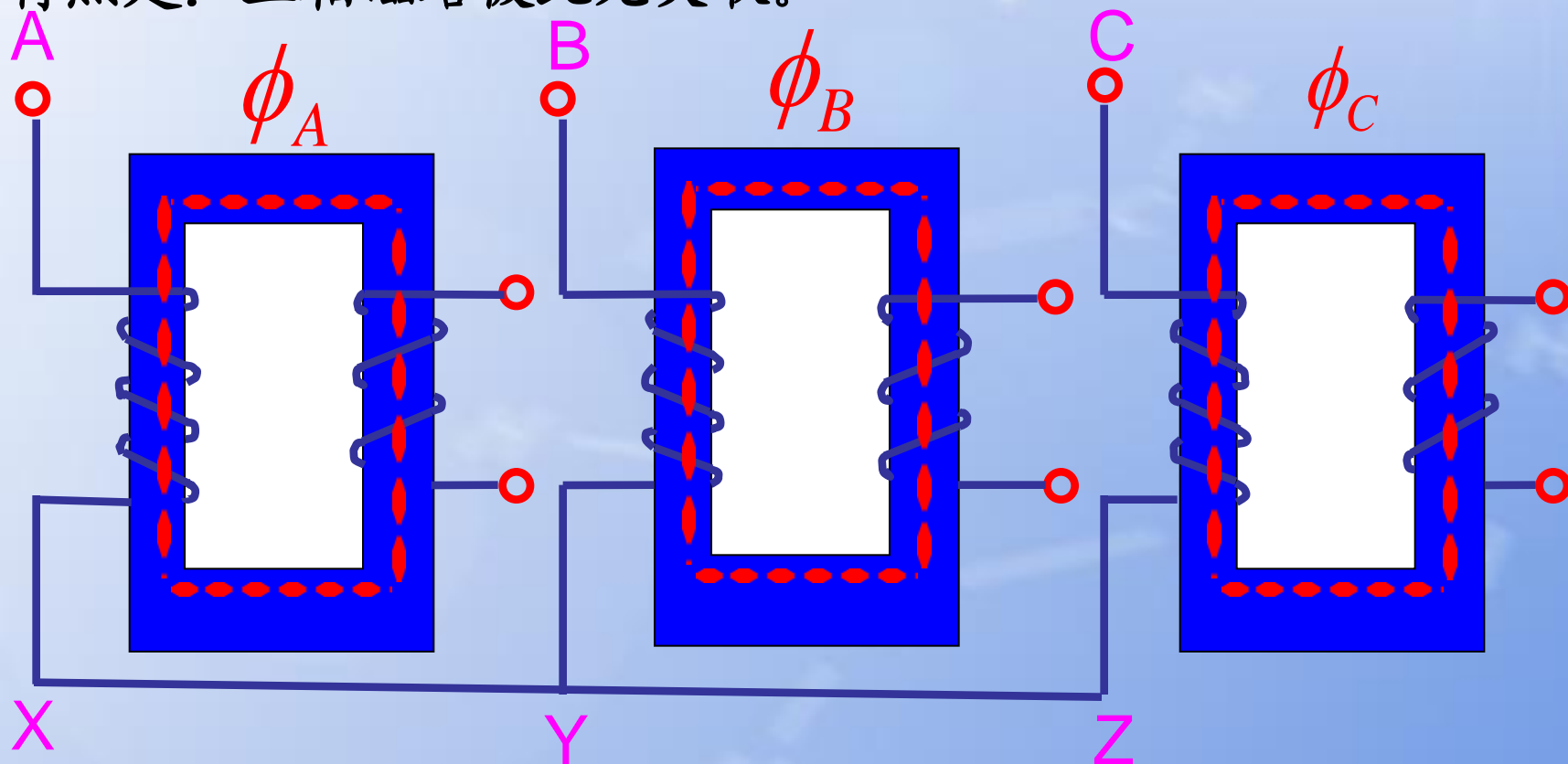
单相变压器的电磁关系的方法及有关结论，完全适用于对称运行的三相变压器，本单元讲述有关三相变压器的特殊问题，即三相变压器的磁路关系，三相变压器的连接组别，感应电动势的波形。

3.6 三相变压器

3.6.1 磁路系统

一、组式磁路变压器，由三台单相变压器铁芯组合而成

特点是：三相磁路彼此无关联。

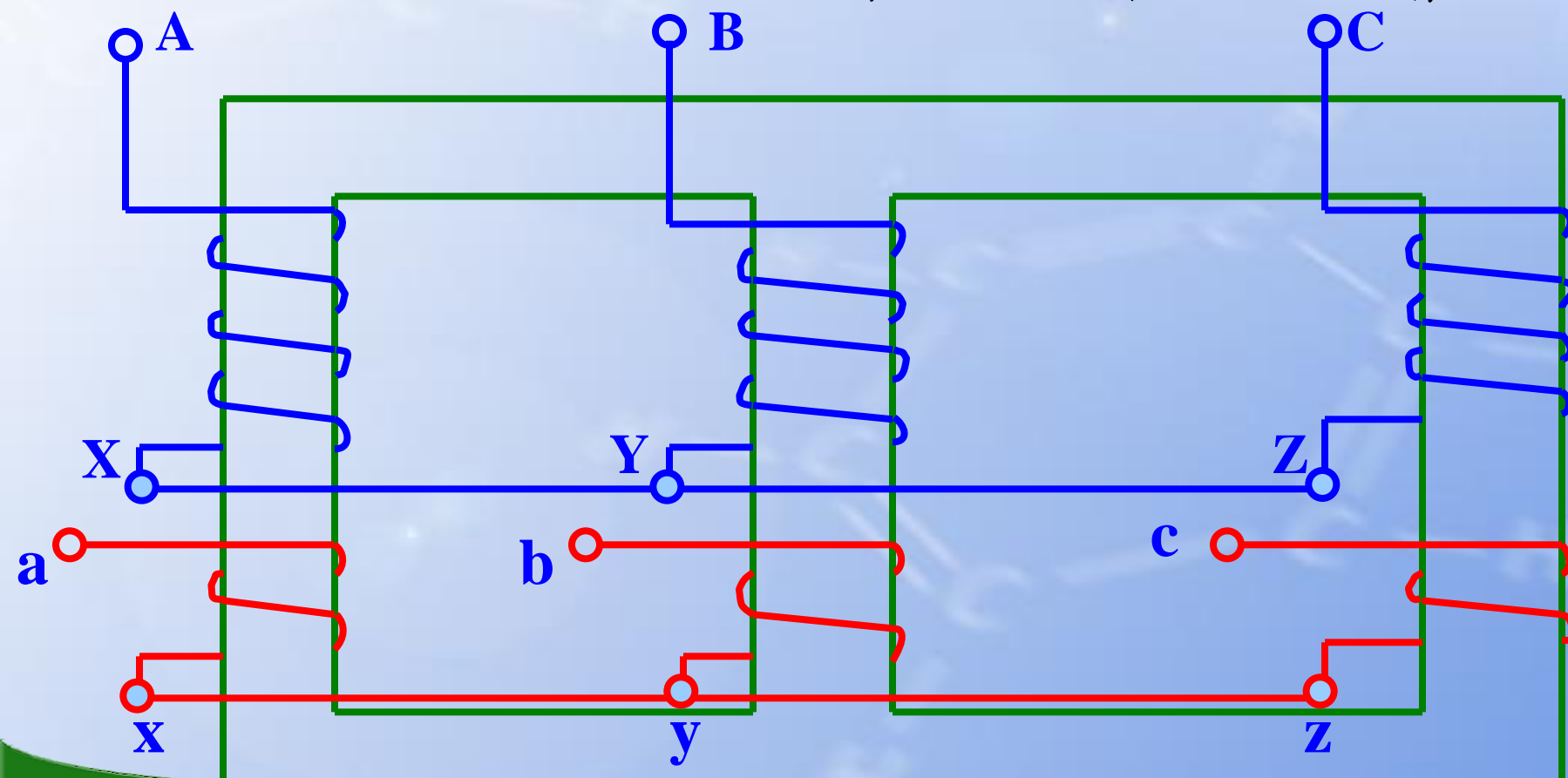


第三章 变压器

3.6 三相变压器

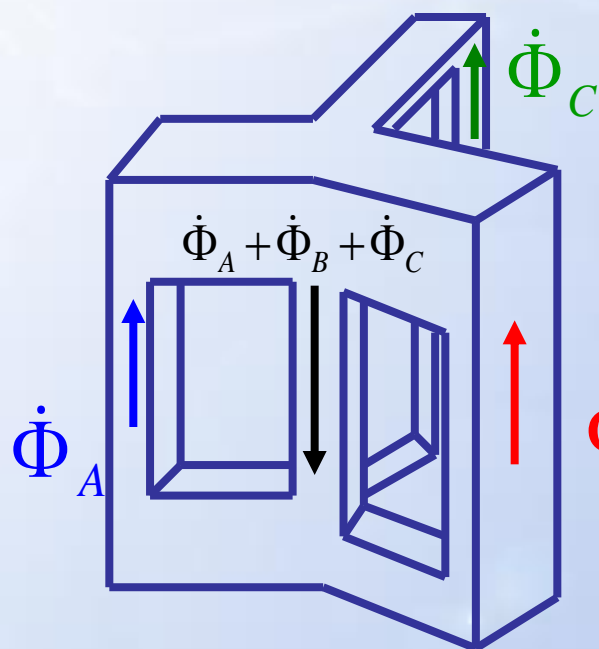
3.6.1 磁路系统

二、芯式磁路变压器，由三个单相铁芯演变而成，通过中间铁芯柱的是三相磁通之和
特点是：三相磁路彼此有关联。

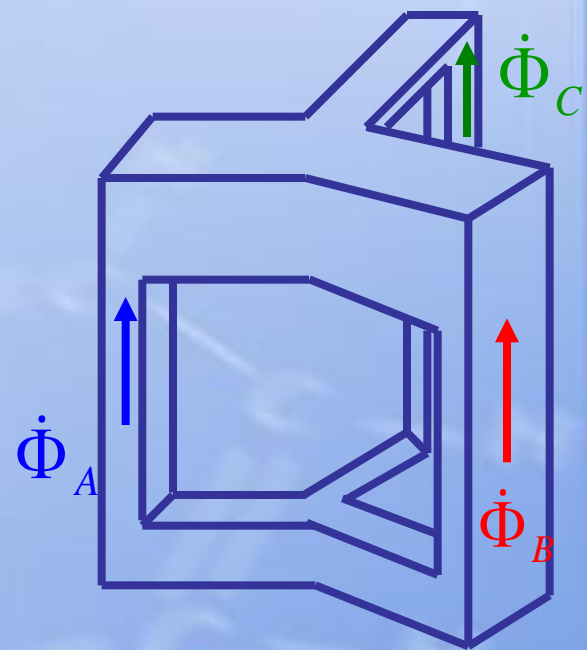
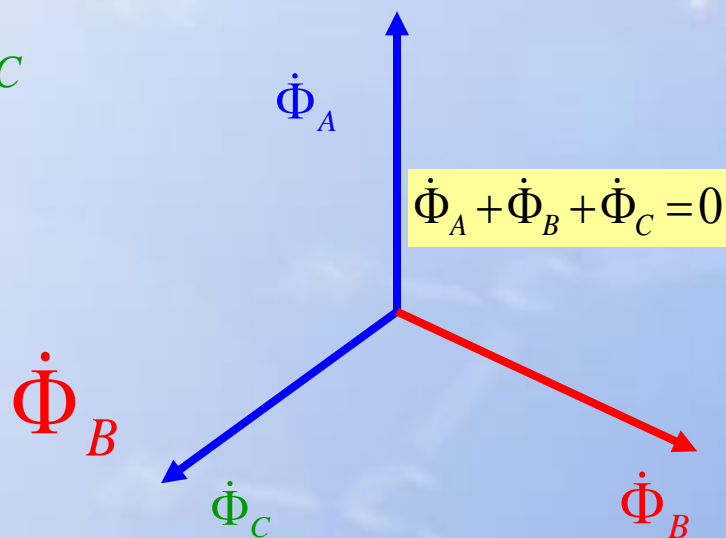


三相心式变压器的磁路

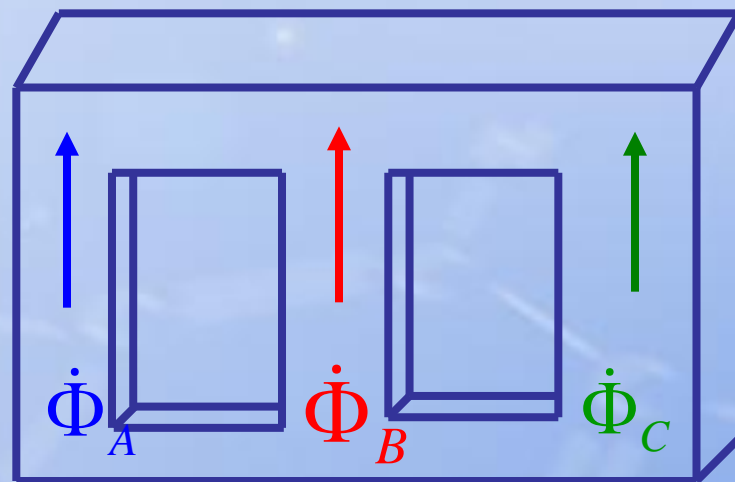
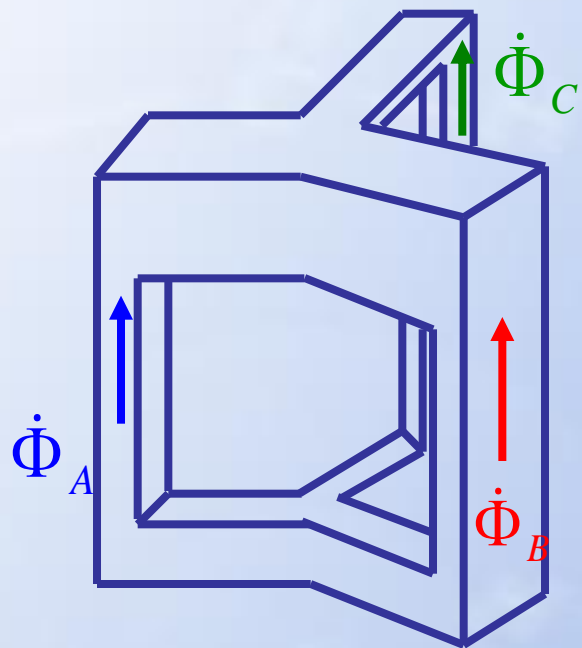
a) 三相星形磁路



b) 三相磁通的相量图



c) 实际心式变压器的磁路



目前应用较多的是三相芯式变压器，因它具有耗材少，效率高，占地面积小，维护简单等优点。

3.6.2 电路系统

一、变压器的端头标号

| 绕组名称 | 单相变压器 | | 三相变压器 | | 中性点 |
|------|-------|-------|-----------------------|-----------------------|-------|
| | 首端 | 末端 | 首端 | 末端 | |
| 高压绕组 | A | X | A、B、C | X、Y、Z | N |
| 低压绕组 | a | x | a、b、c | x、y、z | n |
| 中压绕组 | A_m | X_m | A_m 、 B_m 、 C_m | X_m 、 Y_m 、 Z_m | N_m |

3.6.2 电路系统

或

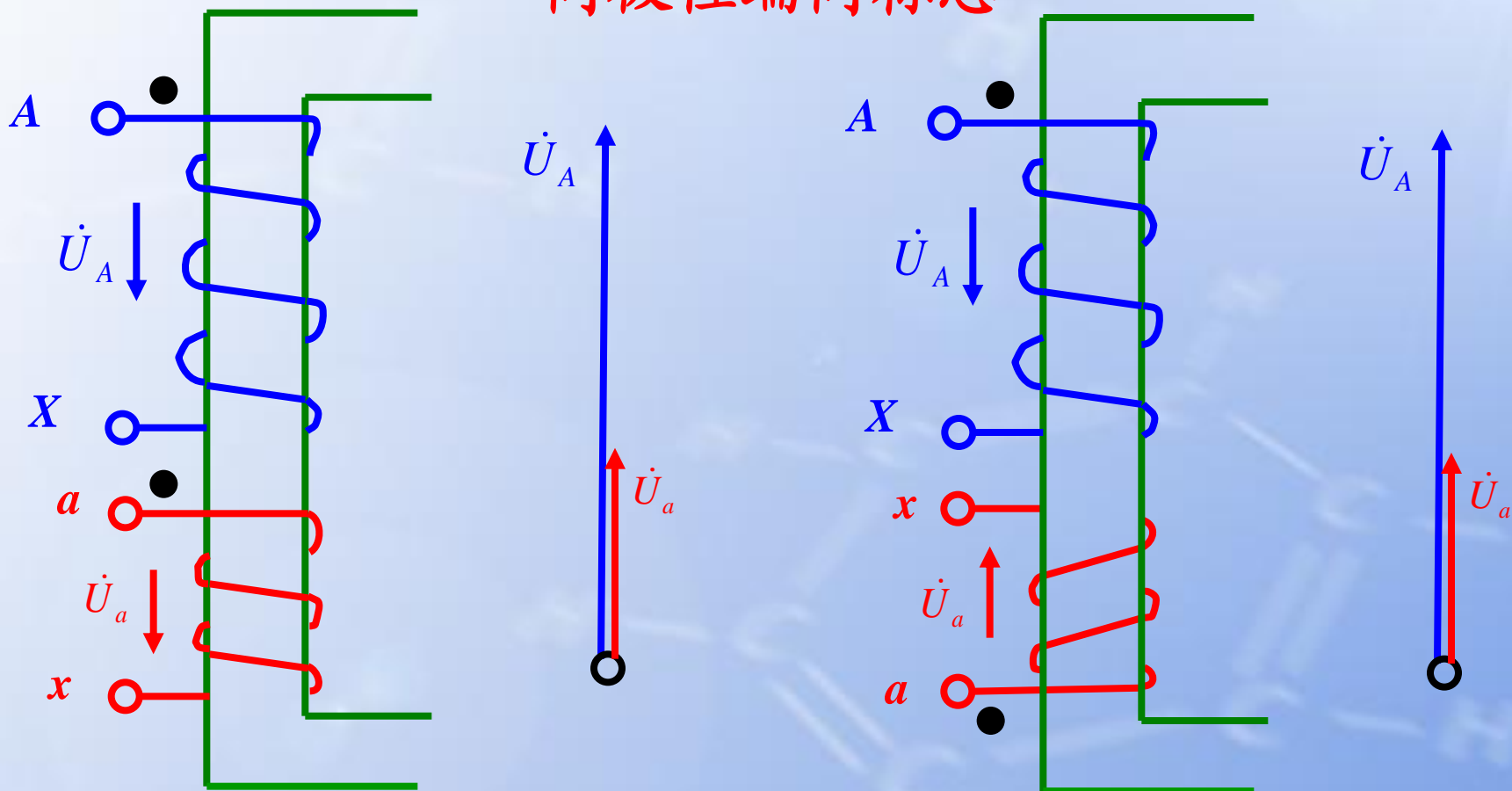
一、变压器的端头标号

| 绕组名称 | 单相变压器 | | 三相变压器 | | 中性点 |
|------|--------|--------|--------------------------|--------------------------|-------|
| | 首端 | 末端 | 首端 | 末端 | |
| 高压绕组 | U1 | U2 | U1、V1、W1 | U2、V2、W2 | N |
| 低压绕组 | u1 | u2 | u1、v1、w1 | u2、v2、w2 | n |
| 中压绕组 | $U1_m$ | $U2_m$ | $U1_m$ 、 $V1_m$ 、 $W1_m$ | $U2_m$ 、 $V2_m$ 、 $W2_m$ | N_m |

第三章 变压器

二、高低压绕组的同名端和相电压的相位关系

同极性端同标志



一、二次绕组的同极性端同标志时，一、二次绕组的电动势同相位。

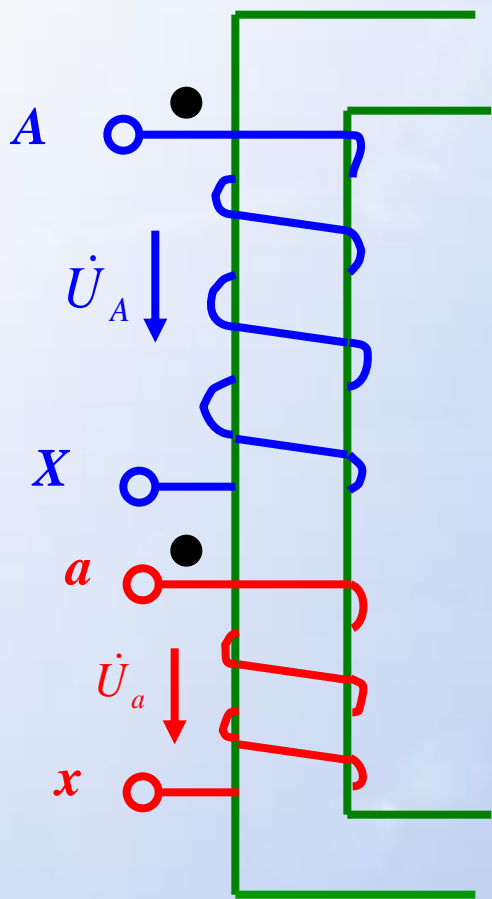
二、高低压绕组的同名端和相电压的相位关系

单相变压器高、低压绕组连接用II表示。组别标号用时钟的点数表示，其含义是把高压绕组相电动势 E_A 看成为时钟上的长针，低压绕组相电动势 E_a 看成为时钟上的短针，并且令 E_A 指向时钟盘面上的数字12，那么低压绕组相电动势 E_a 指向时钟的数字，即为组别号。

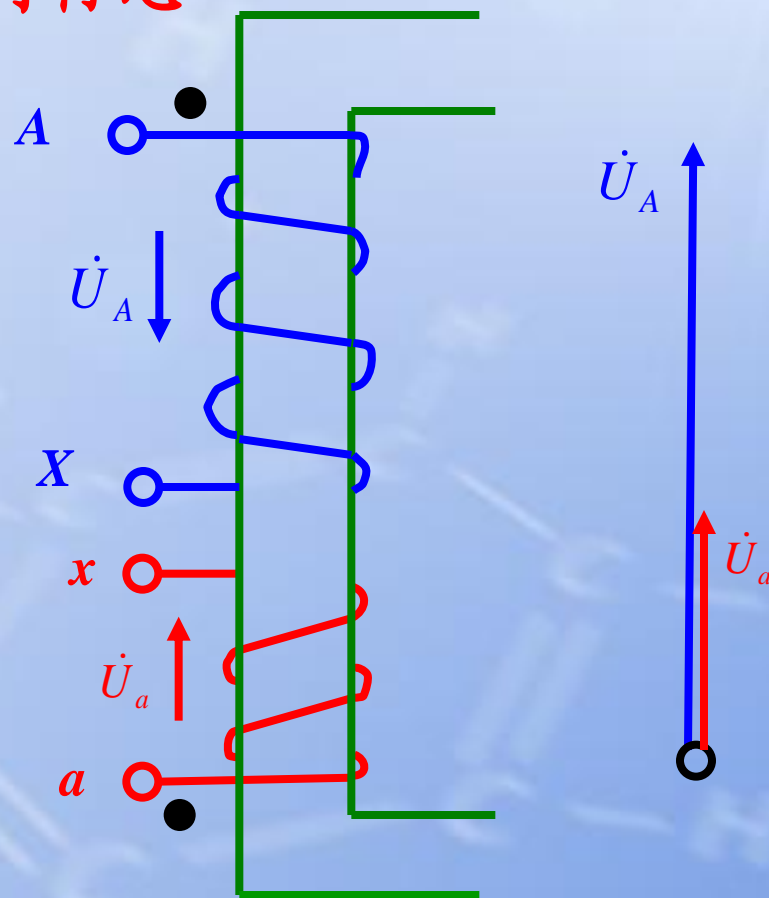
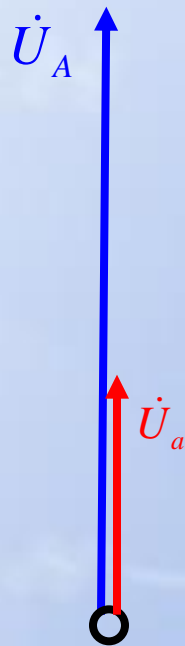
第三章 变压器

二、高低压绕组的同名端和相电压的相位关系

同极性端同标志



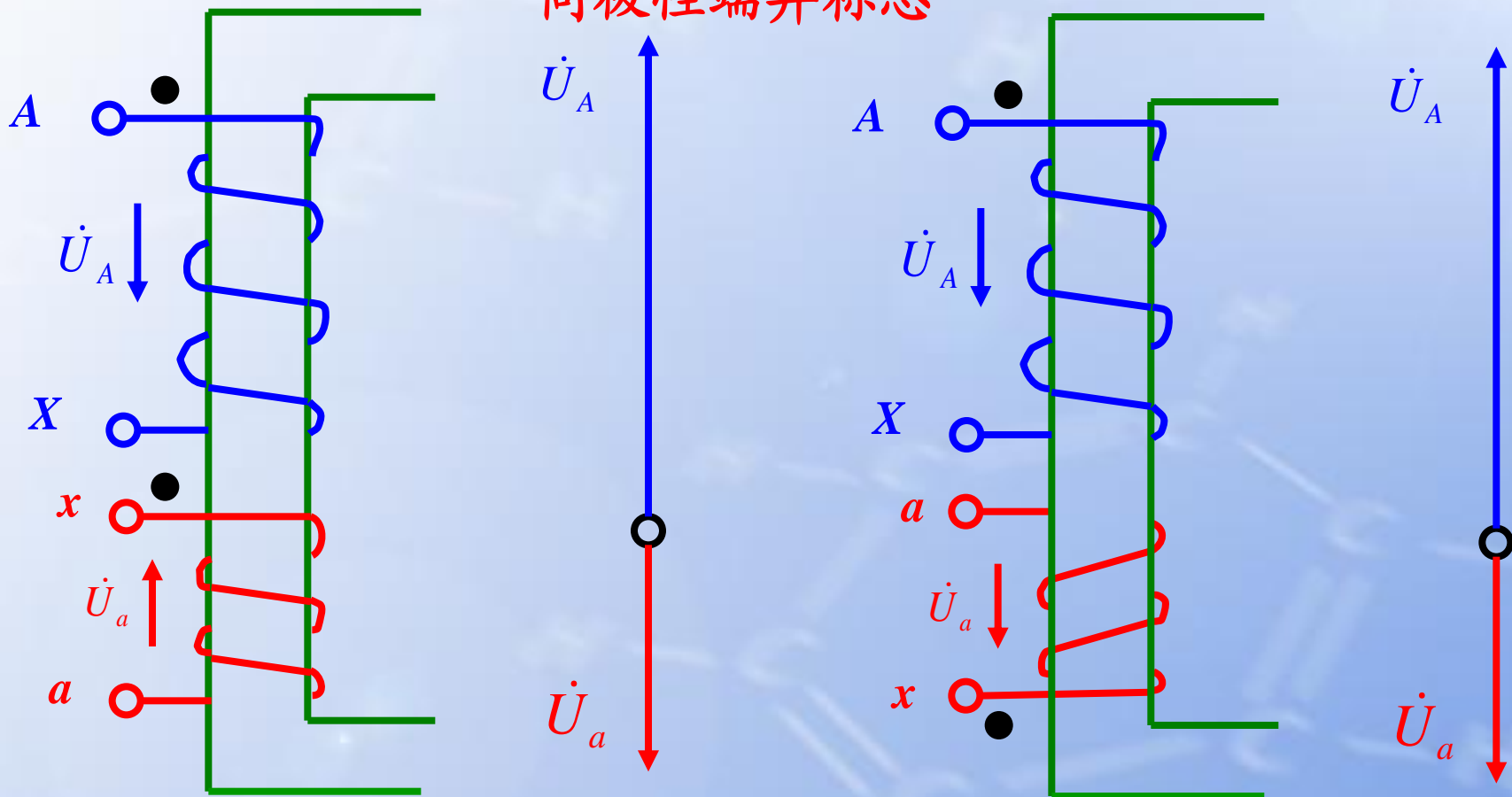
组别号为110



第三章 变压器

二、高低压绕组的同名端和相电压的相位关系

同极性端异标志



一、二次绕组的同极性端异标志时，一、二次绕组的电动势反相位。组别号为Ii6

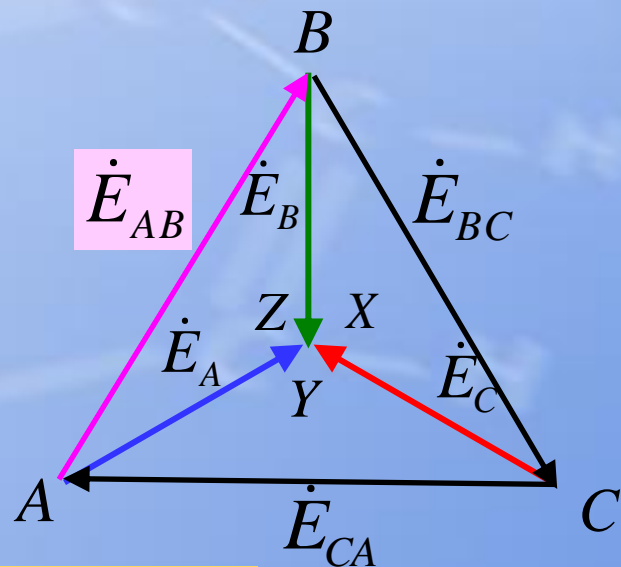
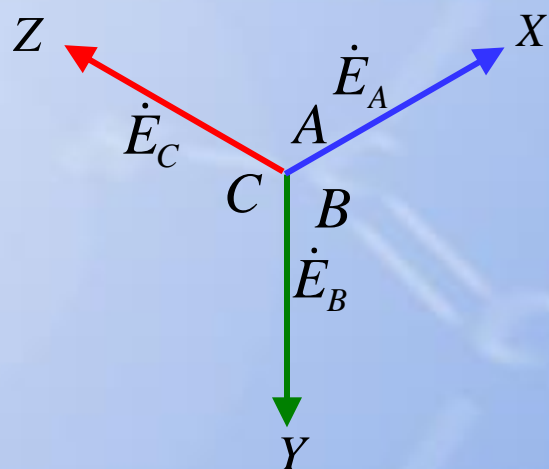
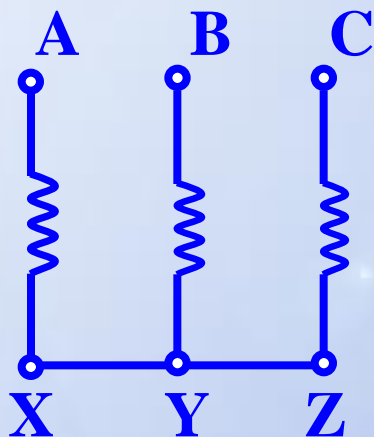
第三章 变压器

三、三相变压器的连接组别

三相绕组两种接线：**星形联结**、**三角形联结**

1、星形联结

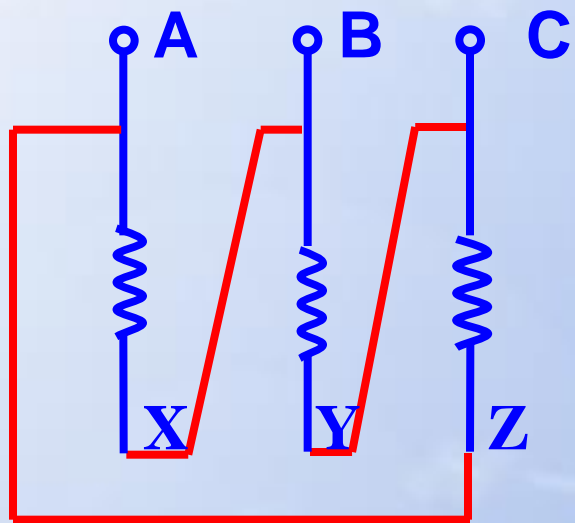
把三相绕组的三个末端连在一起，而把它们的首端引出，三个末端连接在一起形成中性点，如果将中性点引出，就形成了三相四线制了，表示为 Y_N 或 y_n 。



顺时针方向：C滞后B滞后A各120°

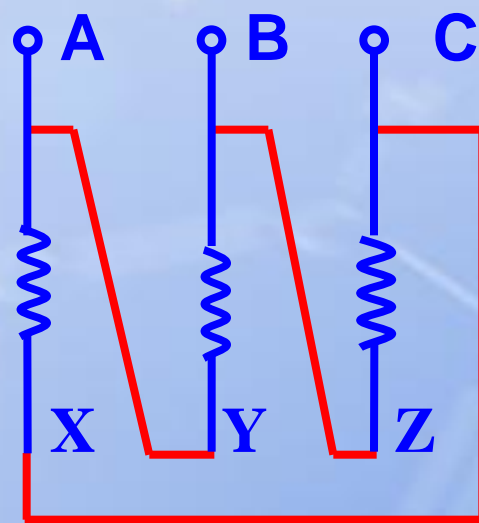
2、三角形联结

把一相的末端和另一相的首端连接起来，顺序连接成一闭合电路。两种接法：



AX-BY-CZ

顺序三角形联结
左向三角形连接



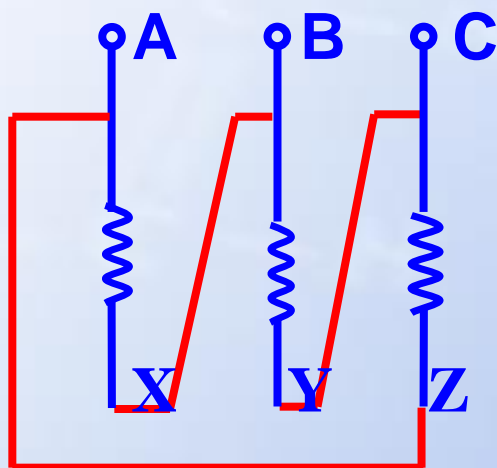
AX-CZ-BY

逆序三角形联结
右向三角形连接

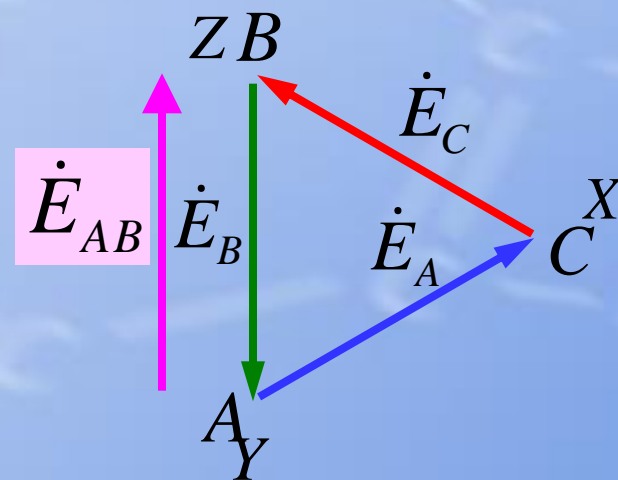
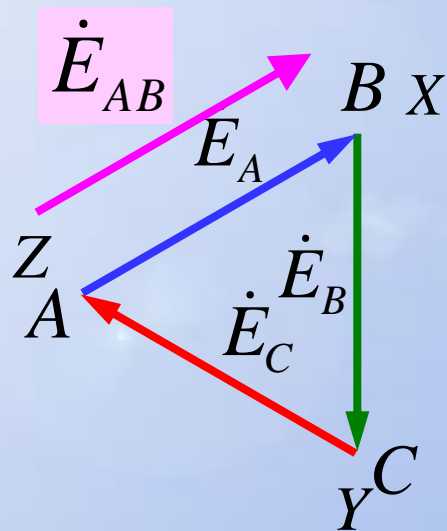
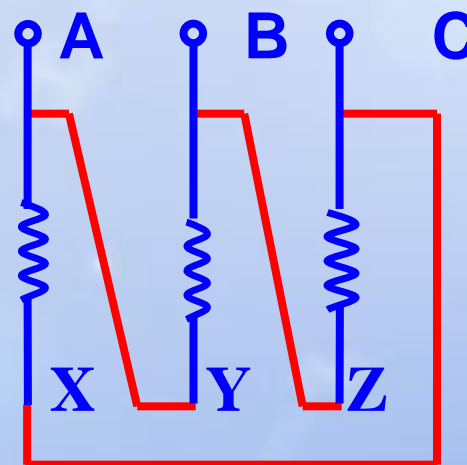
第三章 变压器

2、三角形联结

顺序



逆序



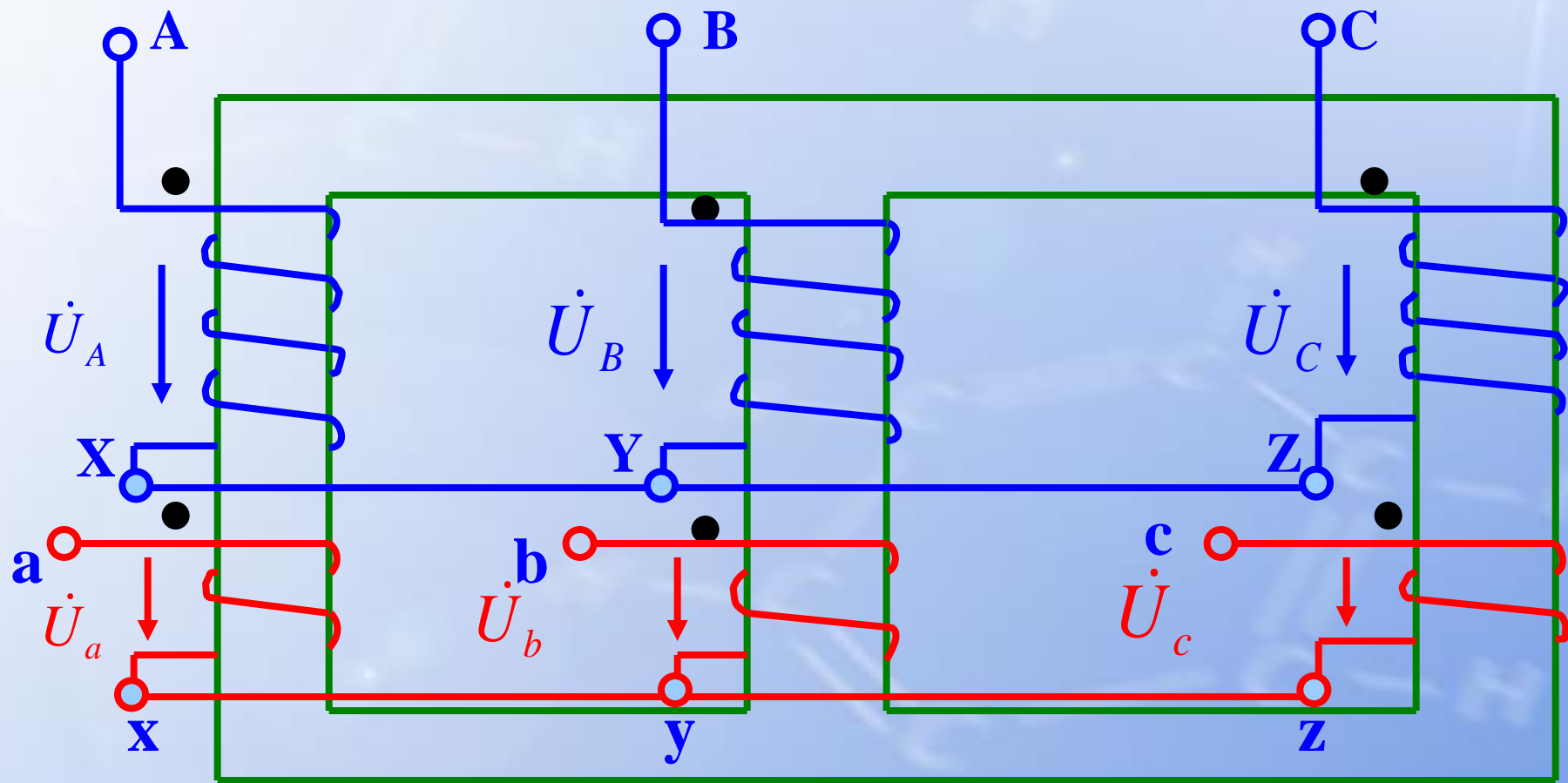
三、三相变压器的连接组别

连接组别：反映三相变压器连接方式及一、二次线电动势（或线电压）的相位关系。

三相变压器的**连接组别**不仅与绕组的绕向和首末端标志有关，而且还与三相绕组的连接方式有关。

理论和实践证明，无论采用怎样的连接方式，一、二次侧线电动势（线电压）的相位差总是 30° 的整数倍。因此可以采用**时钟表示法**—— \dot{E}_{AB} 作为时钟的分针，指向12点， \dot{E}_{ab} 作为时钟的时针，其指向的数字就是三相变压器的组别号。组别号的数字乘以 30° ，就是二次绕组的线电动势滞后于一次侧电动势的相位角。

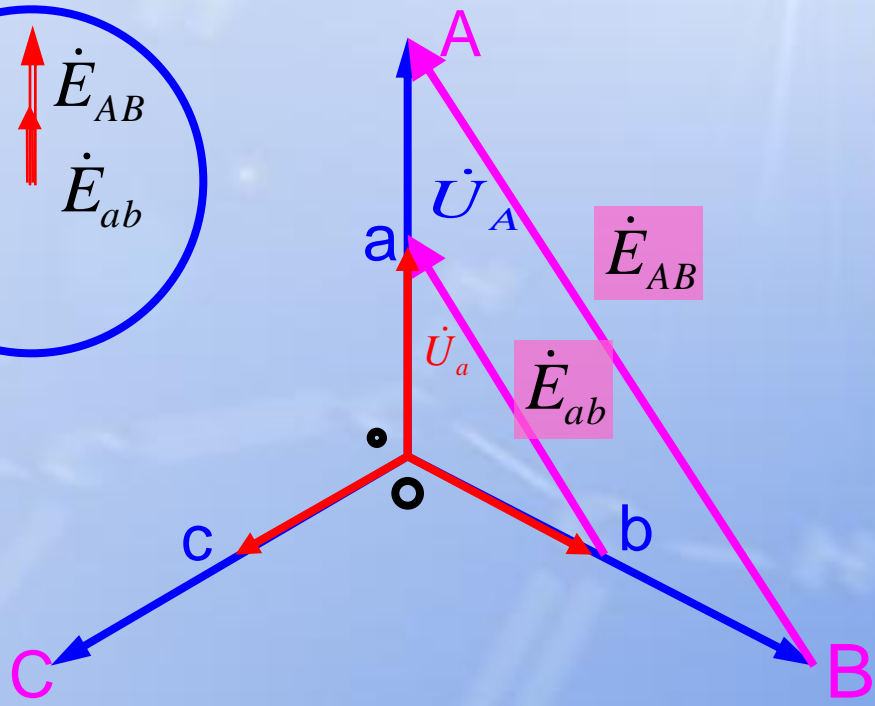
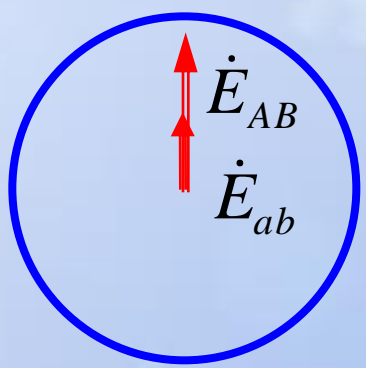
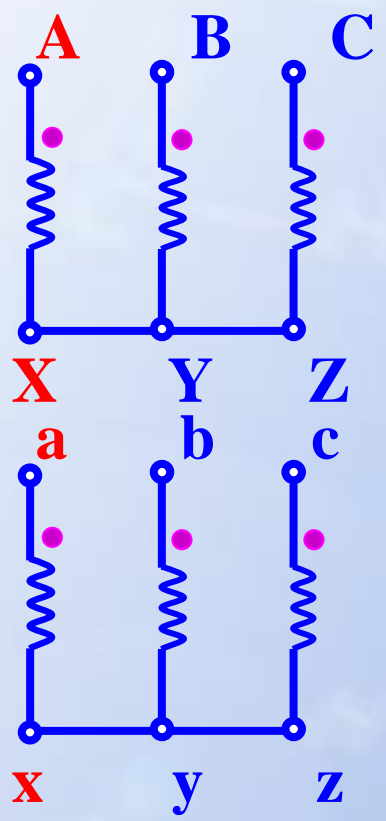
1、Y,y0联结组 绕组联结图



第三章 变压器

1、Y,y0联结组

连接组别可以用相量图来判断：
绕组相量图

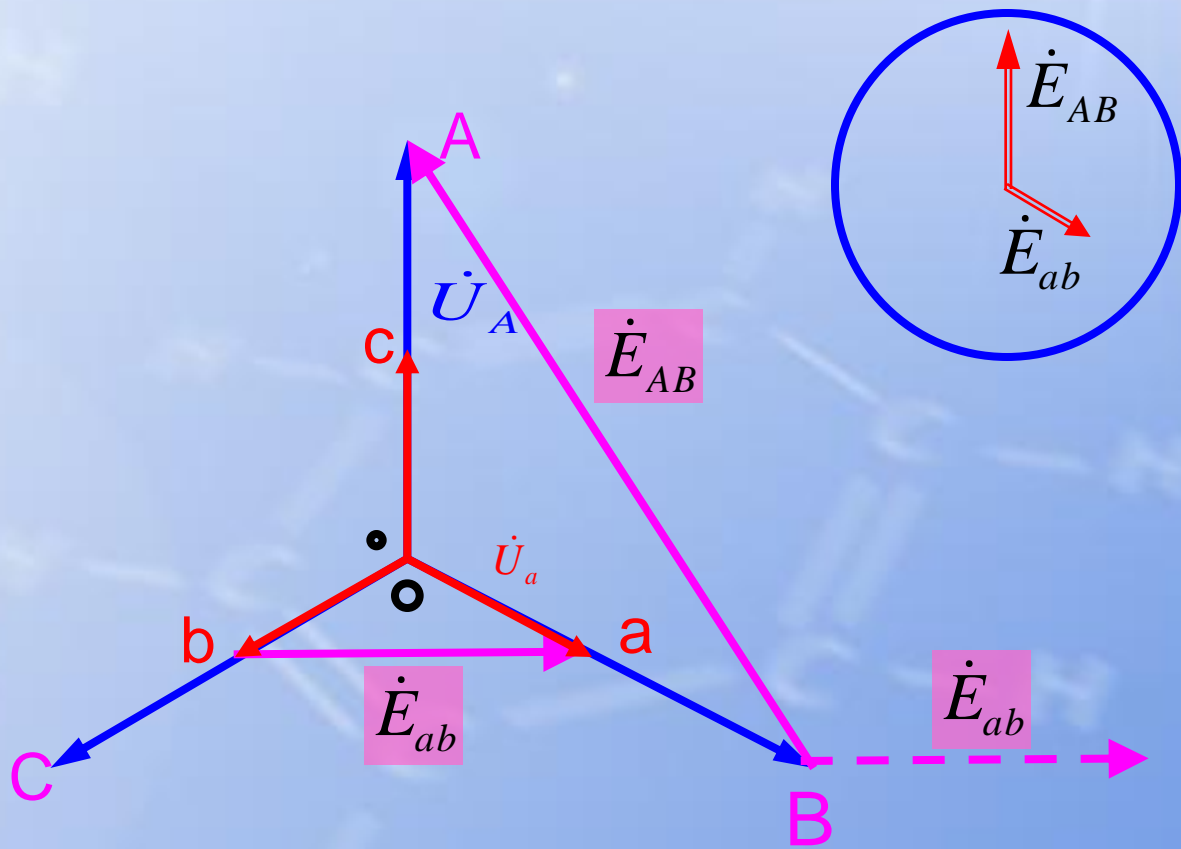
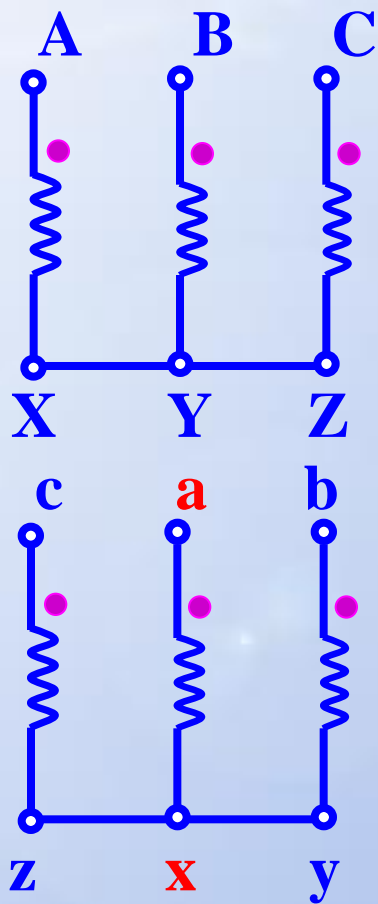


同名端在对应端，对应的相电动势同相位，线电动势 \dot{E}_{AB} 和 \dot{E}_{ab} 也同相位，连接组别为Y, y0。

第三章 变压器

连接组别可以用相量图来判断:

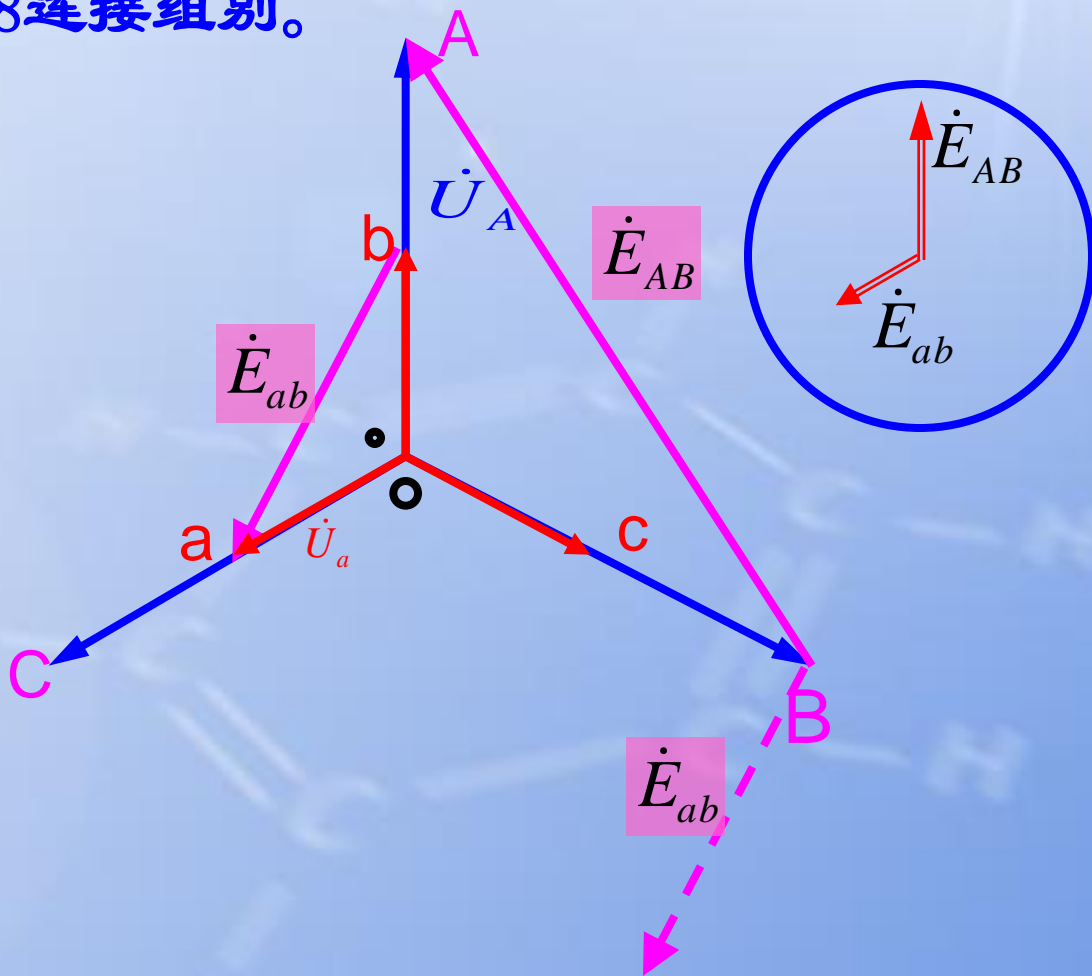
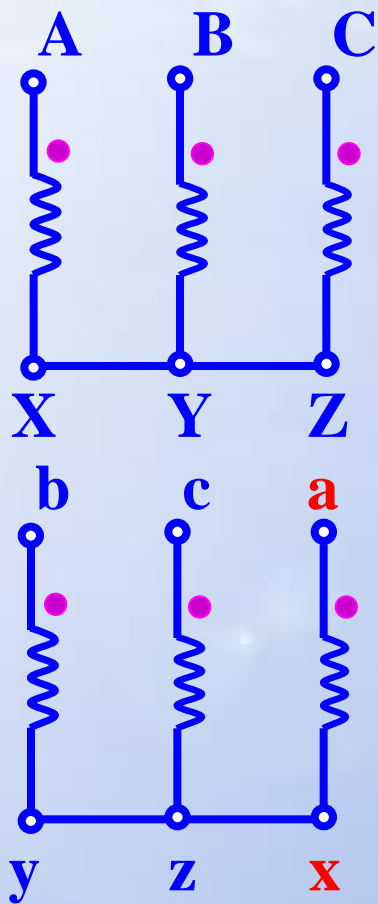
若高压绕组三相标志不变, 低压绕组三相标志依次后移, 可以得到Y, y4、Y, y8连接组别。



第三章 变压器

连接组别可以用相量图来判断:

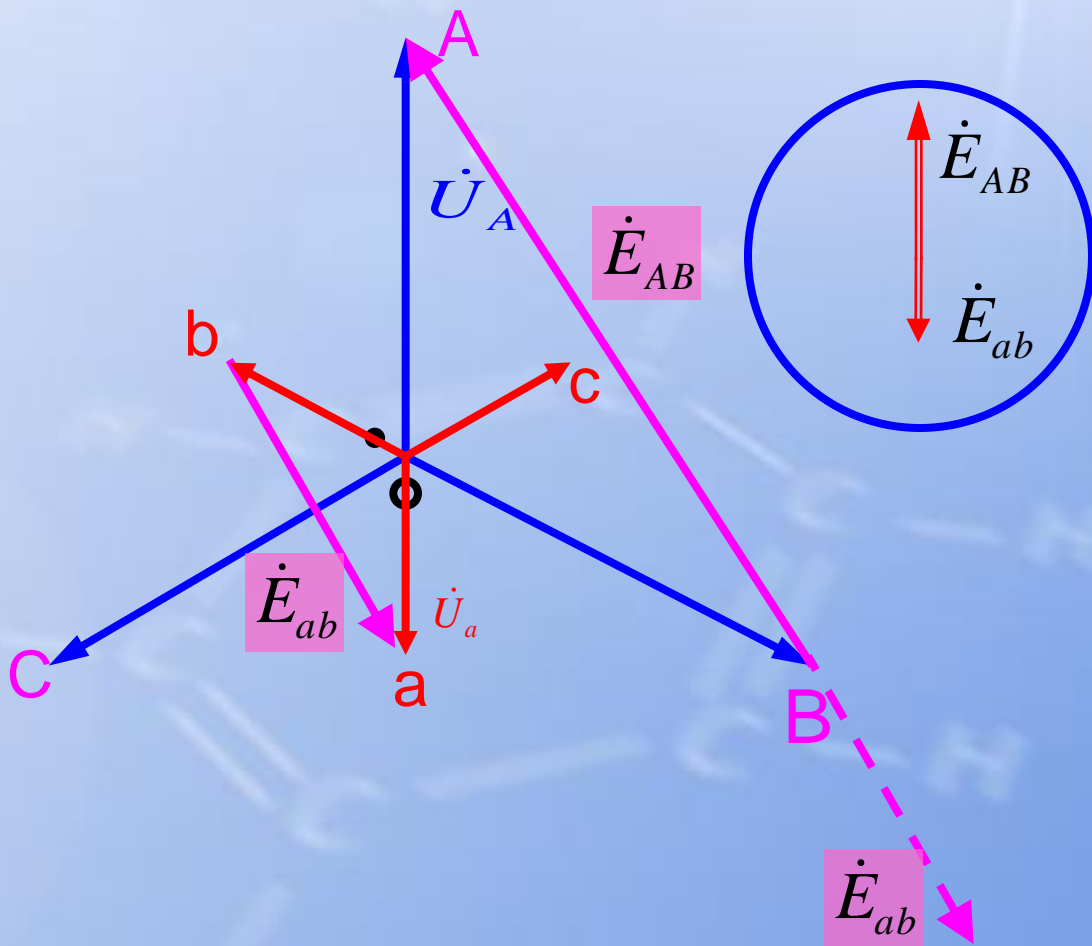
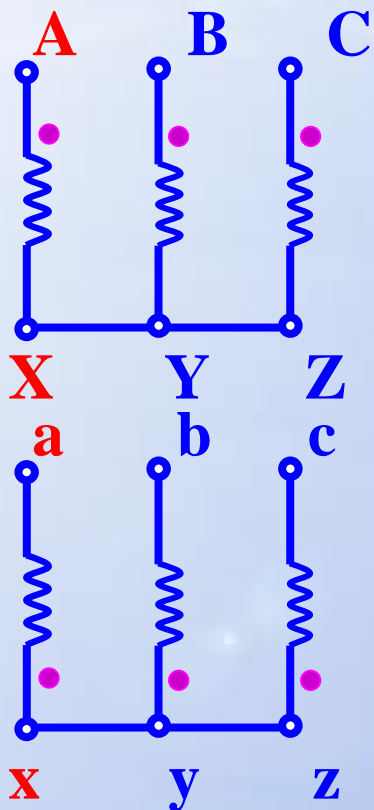
若高压绕组三相标志不变, 低压绕组三相标志依次后移, 可以得到Y, y4、Y, y8连接组别。



第三章 变压器

连接组别可以用相量图来判断:

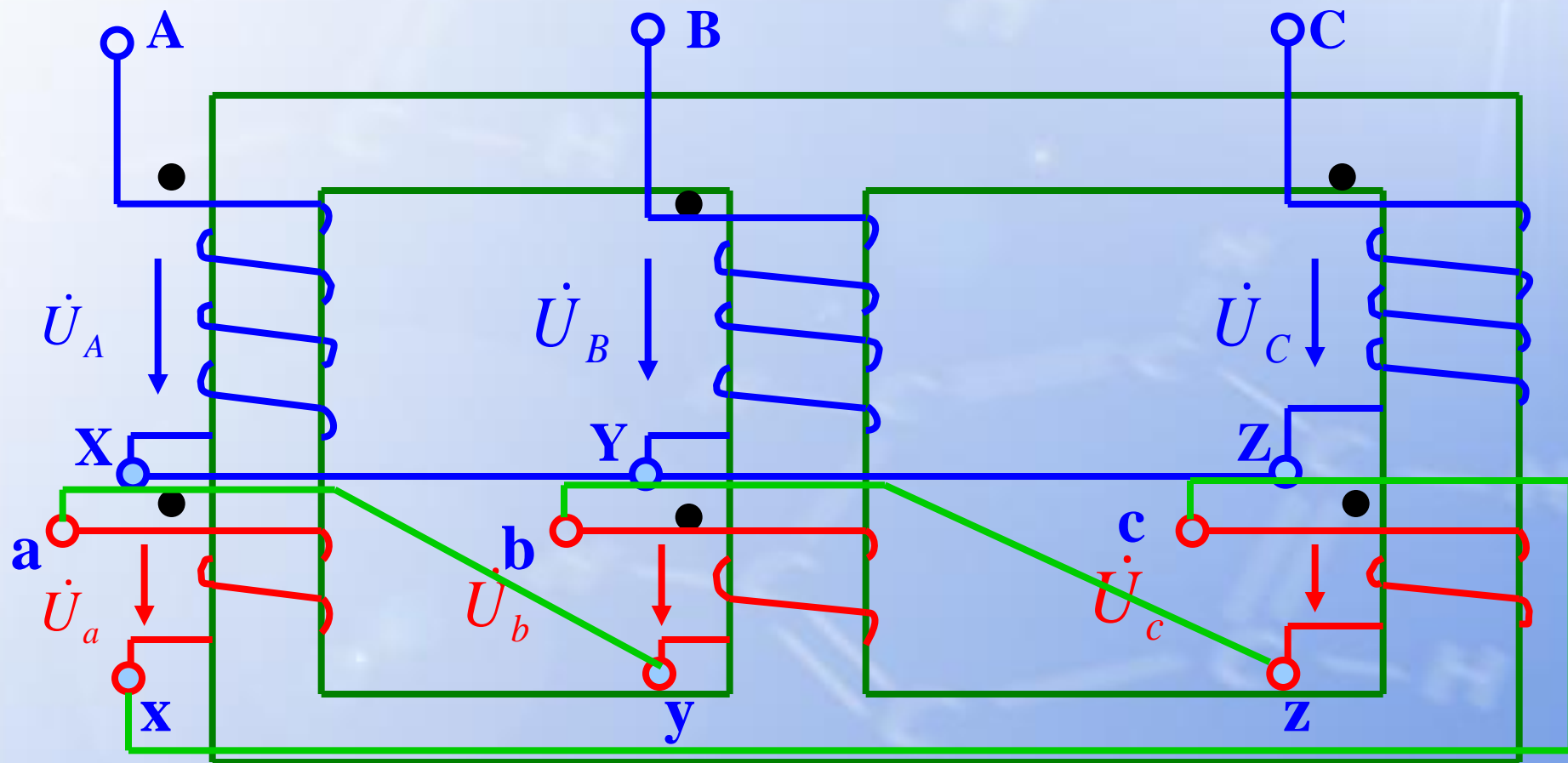
同理, 若异名端在对应端, 可得到Y, y6、Y, y10和Y, y2连接组别。



第三章 变压器

2、Y,d11联结组

绕组联结图

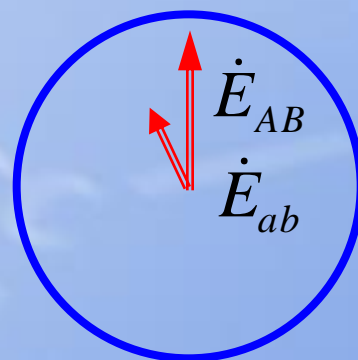
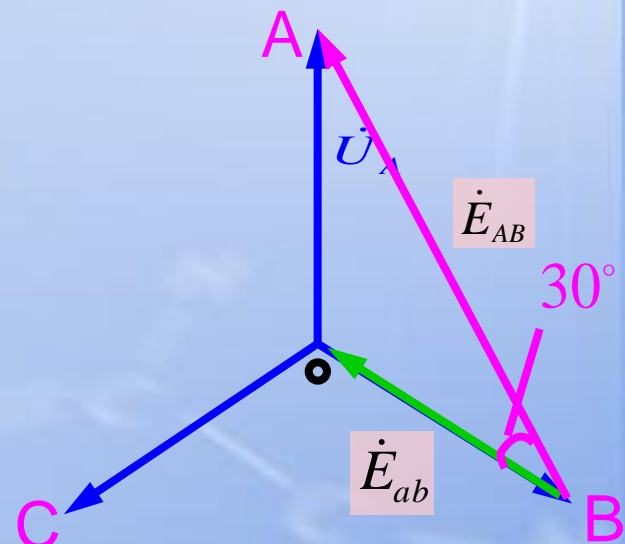
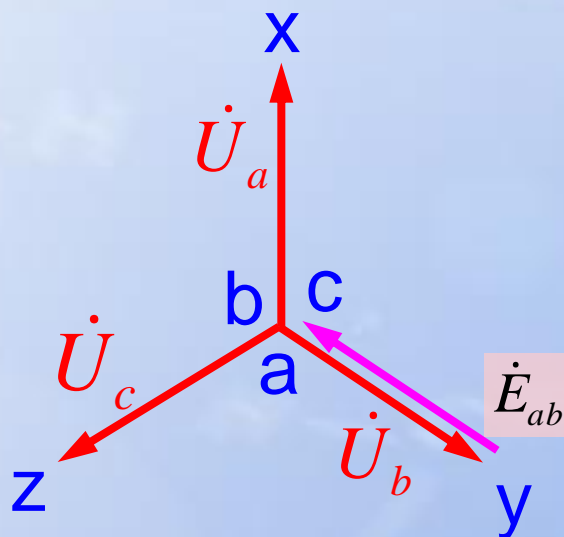
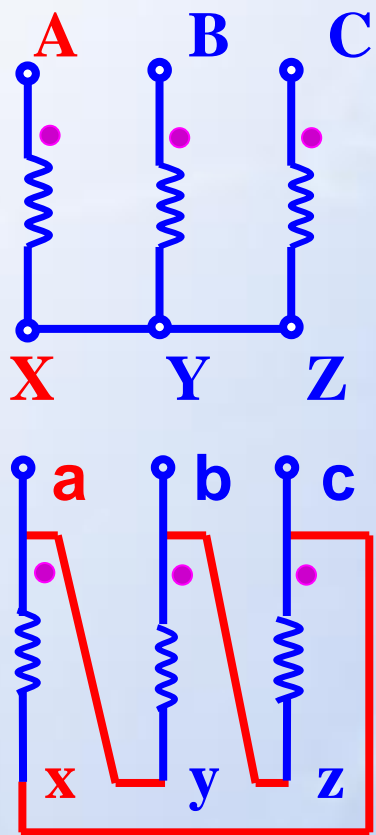


第三章 变压器

2、Y,d11联结组

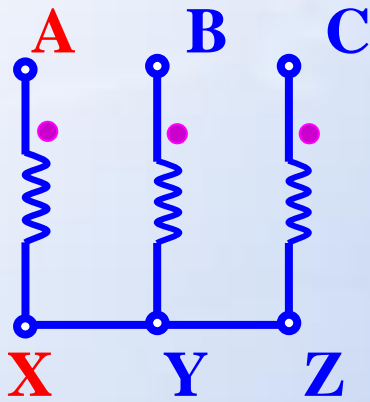
低压侧绕组相量图

高压侧绕组相量图

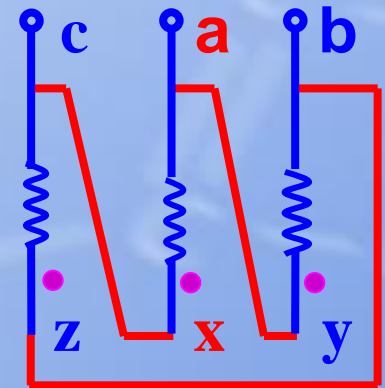
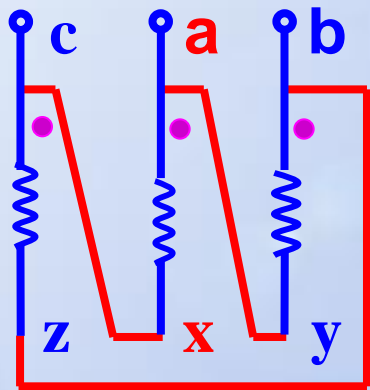
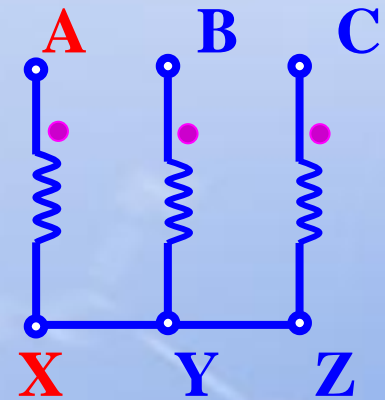


第三章 变压器

同理：若高压绕组三相标志不变，低压绕组三相标志依次后移，可以得到Y, d3、Y, d7连接组别。



若异名端在对应端，
可得到Y, d5、Y, d9
和Y, d1连接组别。

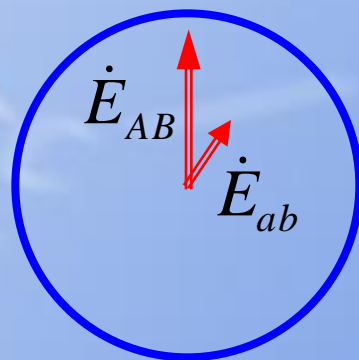
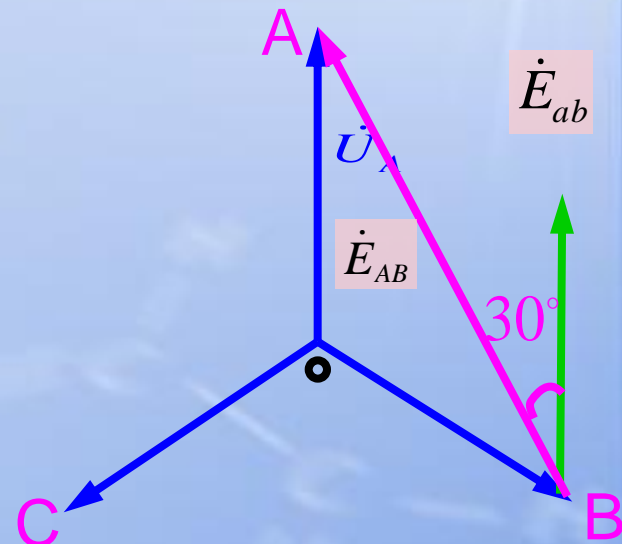
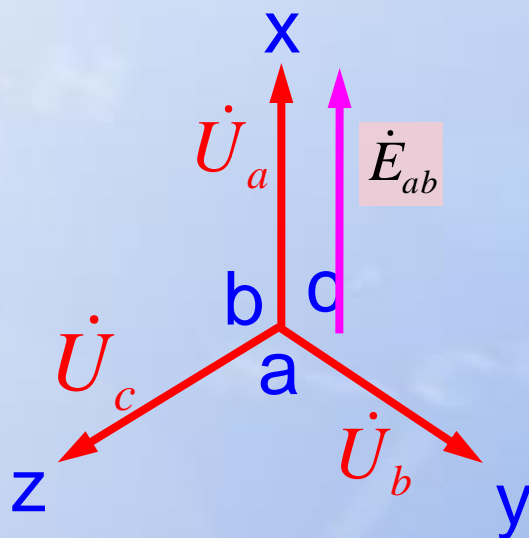
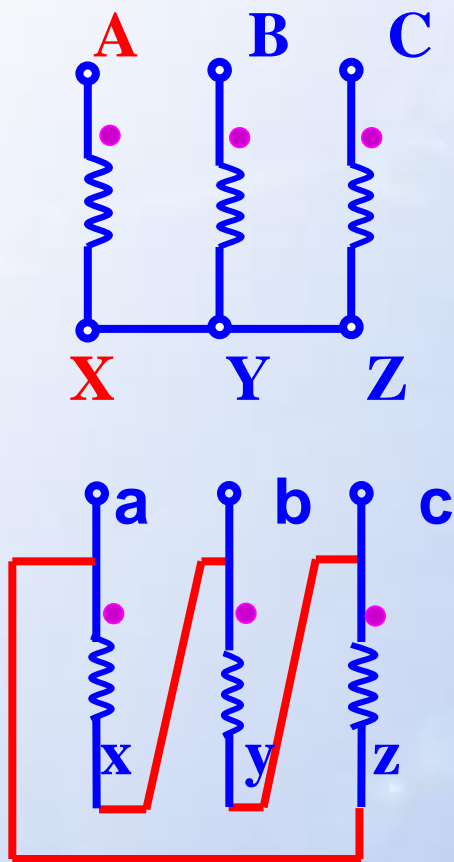


第三章 变压器

3、Y,d1联结组

低压侧绕组相量图

高压侧绕组相量图



3、Y,d1联结组

同理：若高压绕组三相标志不变，低压绕组三相标志依次后移，可以得到Y, d5、Y, d9连接组别。

若异名端在对应端，可得到Y, d7、Y, d11和Y, d3连接组别。

总之，对于Y, y（或D, d）连接，可以得到0、2、4、6、8、10等六个偶数组别；而Y, d（或D, y）连接，可以得到1、3、5、7、9、11等六个奇数组别。

变压器的连接组别很多，为了便于制造和并联运行，国家标准规定，同意铁芯柱上的高、低压绕组为同一相绕组，并采用相同的字母符号为端头标记，其标准连接组别为 $Yy0$ 和 $Yd11$ 。

第三章 变压器

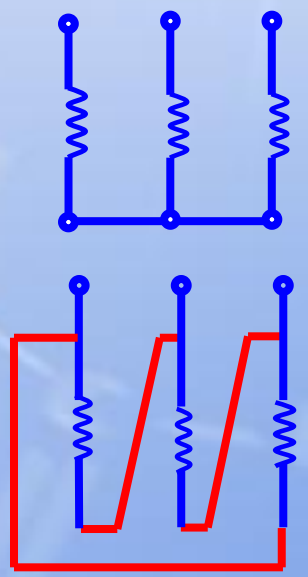
例： 一台三相电力变压器， $S_N = 3150\text{kVA}$ ， $U_{1N}/U_{2N} = 35/6.3\text{kV}$ ，Y/d 联结。试求：一、二次额定电流，一次额定相电压，一、二次额定相电流。

[解]
$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{3150 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 35 \times 10^3} \text{A} = 51.96\text{A}$$

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{3150 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 6.3 \times 10^3} \text{A} = 288.68\text{A}$$

$$U_{1N\phi} = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}} = \frac{35 \times 10^3}{\sqrt{3}} \text{V} = 20207\text{V}$$

$$I_{1N\phi} = I_{1N} = 51.96\text{A} \quad I_{2N\phi} = \frac{I_{2N}}{\sqrt{3}} = \frac{288.68}{\sqrt{3}} \text{A} = 166.67\text{A}$$





3.7

变压器的并联运行

3.7 变压器的并联运行

并联运行是指将几台变压器的一、二次绕组分别接在一、二次侧的公共母线上，共同向负载供电的运行方式。

如图3-36

并联运行的优点：

- 1、提高供电的可靠性；多台变压器并联运行时，当其中一台发生故障需要检修时，另几台变压器仍可照常供电。
- 2、减少能量损耗。可根据负载大小变化，调整投入并联运行的变压器的台数，以减少能量损耗，提高运行效率，保证经济运行。
- 3、减少备用容量。可随着用电量的增加，分批安装变压器，减少初次投资。

3.7 变压器的并联运行

3.7.1 并联运行的理想条件

并联运行的理想情况是：

- 1、空载时各变压器绕组之间无环流；仅有一次侧的空载电流。
- 2、负载后，各变压器的负载系数相等；使变压器设备容量能得到充分利用。
- 3、负载后，各变压器的负载电流与总的负载电流同相位。这样，在总的负载电流一定时，各变压器分担的电流最小。

为了达到上述理想运行情况，**并联运行的变压器需满足以下条件：**

- 1、各变压器一、二次侧的额定电压分别相等，即变比相同；
- 2、各变压器的连接组别相同；
- 3、各变压器的短路阻抗（短路电压）的标么值相等，且短路阻抗角也相等。

其中，**第二条必须绝对满足**。一般规定变压器变比的偏差不得超过 $\pm 0.5\%$ ，短路阻抗标么值不得大于 $\pm 10\%$

3.7.2 并联条件不满足时的运行分析

以两台单相变压器并联运行为例来分析，其结论可推广到三相变压器。

一、变比不等时并联运行

当变压器的变比不等时，在空载时，存在环流。课本式3-40中 I_c 即为环流，它只在两个二次绕组中流通。如图3-37所示。

变比差越大，环流越大。环流的存在，既占用了变压器的容量，又增加了变压器的损耗，这是很不利的。

为了保证空载时环流不超过额定电流的10%，通常规定**并联运行的变压器的变比差不大于1%。**

3.7.2 并联条件不满足时的运行分析

二、连接组别不同时并联运行

连接组别不同时，二次侧线电压之间至少相差 30° ，则二次线电压差为线电压的51.8%，如式3-41所示，

由于变压器的短路阻抗很小，这么大的电压差将产生几倍于额定电流的空载环流，会烧毁绕组，所以连接组别不同绝不允许并联。

3.7.2 并联条件不满足时的运行分析

三、短路阻抗标么值不等时并联运行

变压器的负载系数不同，所分担的负载大小不等。各台变压器所分担的负载大小与其短路阻抗标么值成反比。如式3-42所示。

即短路阻抗标么值大的变压器分担的负载小，而短路阻抗标么值小的变压器分担的负载大，当短路阻抗标么值小的变压器满载时，短路阻抗标么值大的变压器欠载，变压器的容量不能充分利用。当短路阻抗标么值大的变压器满载时，短路阻抗标么值小的变压器必然过载，长时间过载运行是不允许的。

3.7.2 并联条件不满足时的运行分析

三、短路阻抗标么值不等时并联运行

为了充分利用变压器的容量，理想的负载分配，应使各台变压器的负载系数相等，而且短路阻抗标么值相等。

3.7.2 并联条件不满足时的运行分析

变压器运行规程规定：在任何一台变压器都不会过负荷的情况下，变比不同和短路阻抗标么值不等的变压器可以并联运行。

短路阻抗标么值不等的变压器并联运行时，应适当提高短路阻抗标么值大的变压器的二次电压，以使并联运行的变压器的容量均能充分利用。



3.8

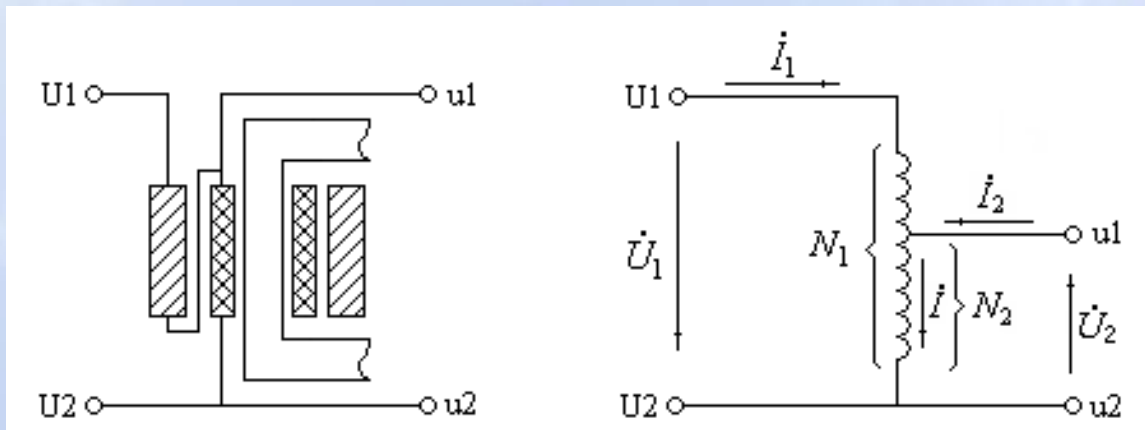
特殊变压器

3.8.1 自耦变压器

一、结构特点与用途

结构特点:

低压绕组是高压绕组的一部分，一、二次绕组之间既有磁耦合，又有电联系。



$U1U2$ 为一次绕组，匝数为 N_1 ；

$u1u2$ 为二次绕组，匝数为 N_2 ，又称为公共绕组；

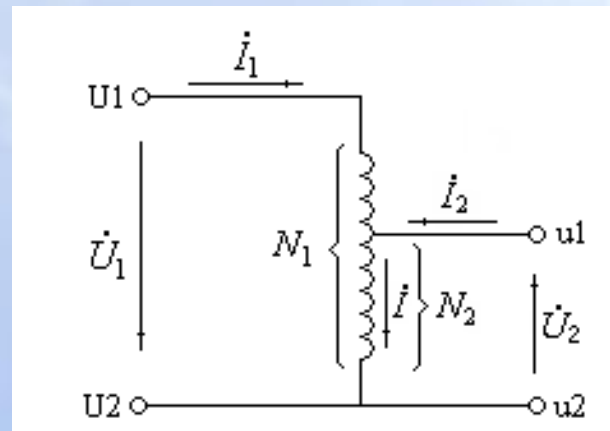
$U1u1$ 称为串联绕组，匝数为 $N_1 - N_2$ 。

用途：用来连接两个电压等级相近的电力网，作为两电网的联络变压器；
在实验室中常采用二次侧有滑动触头的自耦变压器作为调压器；
异步电动机的降压起动设备。

二、变比

$$\text{变比 } k_a = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \approx \frac{U_1}{U_2} = 1.5 \sim 2$$

$$\dot{I}_1 \approx -\frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2 = -\frac{1}{k_a} \dot{I}_2 \quad (\dot{I}_1 \text{ 与 } \dot{I}_2 \text{ 反相位})$$



I_1 与 I_2 的相位总是相差180度。

其中，从数值关系上看， $I_2 = I_1 + I$

可见，自耦变压器的输出电流 I_2 由两部分组成，其中串联绕组流过的电流 I_1 是由于高、低压绕组之间有电的联系，从高压侧直接流入低压侧的，公共绕组流过的电流 I 是通过电磁感应作用传递到低压侧的。

三、容量关系

由式3-52可知， $S_2=U_2I_2=U_2(I_1+I)=U_2I_1+U_2I$

低压侧输出功率由两部分组成：一部分为电磁功率 U_2I ，等于公共绕组的绕组容量，它通过电磁感应作用传递给负载，另一部分为传导功率 U_2I_1 ，它通过电的直接联系传导给负载。

四、自耦变压器的等值电路

如图3-41所示，为自耦变压器的等值电路。

五、自耦变压器的特点

优点： 1.自耦变压器的绕组容量小于额定容量，在额定容量相等的情况下，自耦变压器体积小，质量轻，节省材料，成本低。
2.所用有效材料减少，使铜损耗、铁损耗相应减少，效率较高。
3.体积小，方便运输和安装。

缺点： 1.自耦变压器的高、低压侧有电的联系，高压侧发生故障会直接影响低压侧，为此，其运行方式，继电保护及过电压保护装置等，都比双绕组变压器复杂。

2.自耦变压器的短路阻抗比同容量的双绕组变压器小，其短路电流较大，需采用相应的限制和保护措施。

3.8.2 互感器（是一种测量用的设备）

分 { 电压互感器：实现用小量程电压表测量高电压
 电流互感器：实现用小量程电流表测量大电流

一、电压互感器

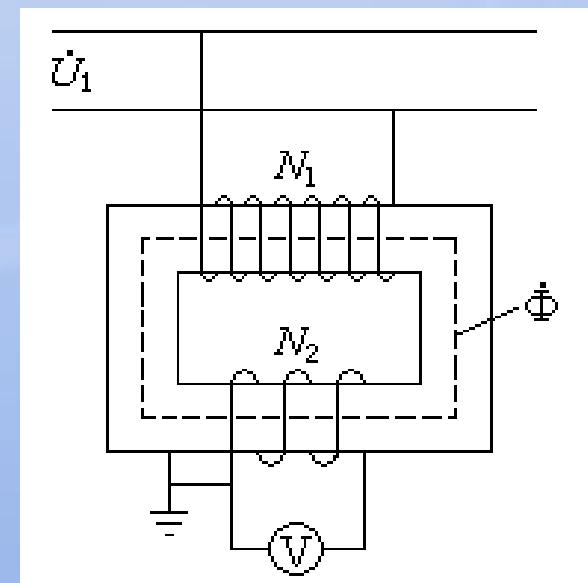
1. 工作原理

一次匝数多，接电网；二次匝数少，接电压表。
电压表阻抗很大，相当于降压变压器空载运行。

$$\text{电压变比: } k_u = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

被测电压: $U_1 = k_u U_2$ 若电压表盘按 $k_u U_2$ 来刻度，可直接读出被测电压 U_1

电压互感器二次侧额定电压都统一设计成100V。



2. 电压互感器的误差

实际的电压互感器一、二次漏阻抗上都有压降，必然存在误差。误差是由 \dot{U}_1 、 \dot{U}_2 之间的变比误差和相角误差引起的。

根据误差的大小，电压互感器的准确度级别有四级：**0.2、0.5、1.0、3.0**，每个等级允许误差可以参考技术标准。

3. 使用电压互感器应注意的问题

(1) 电压互感器**二次侧严禁短路**，否则将产生很大的短路电流。为防止二次侧短路，电压互感器一、二次回路中应串接熔断器。

(2) 电压互感器**二次绕组连同铁心一起必须可靠接地**，以防止绕组绝缘损坏时，高电压侵入低压回路，危及人身和设备的安全。

二、电流互感器

1. 工作原理

一次绕组匝数只有一匝或几匝，串联在被测电路中；
二次绕组匝数很多，接电流表。

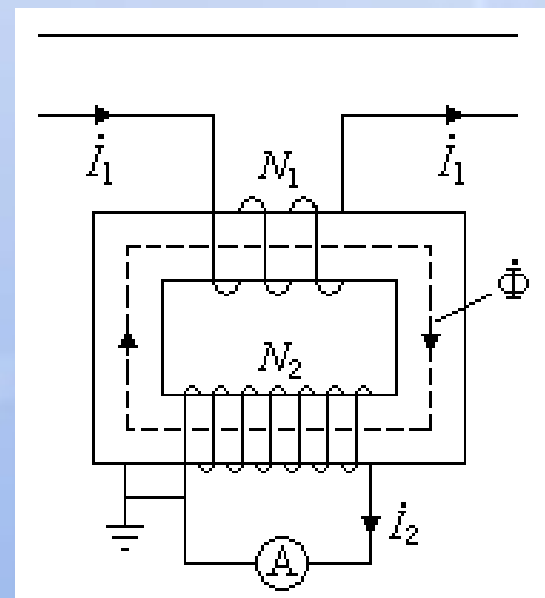
电流表阻抗很小，互感器相当于变压器短路运行。

$$\text{电流变比: } k_i = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

$$\text{被测电流: } I_1 = k_i I_2$$

将电流表表盘按 $k_i I_2$ 来刻度，可直接读出被测电流。

电流互感器二次侧额定电流通常设计成5A或1A。



2. 电流互感器的误差

误差是由 \dot{I}_1 、 \dot{I}_2 之间的变比误差和相角误差引起的。

电流互感器的准确度级别有五级：**0.2、0.5、1、3、10**。如**0.5级**表示在额定电流时 误差最大不超过**±0.5%**。

3. 使用电流互感器应注意的问题

(1) **二次侧绝对不允许开路**。否则为空载状态，一次侧大电流成为励磁电流，使铁心磁密剧增。一方面使铁心严重饱和，铁耗剧增引起过热。另一方面将在匝数很多的二次绕组中感应出很高电压，使绝缘击穿，危及安全。

因此，严禁在二次回路安装保险丝；运行中需要更换测量仪表时，应先把二次绕组短路后才能更换仪表。

(2) **二次绕组及铁心必须可靠接地**，以防止绝缘击穿后，一次侧高电压危及二次侧回路的设备及操作人员的安全。

本章小结:

1. 变压器基本工作原理是基于电磁感应定律
$$e = -N \frac{d\phi}{dt}$$

变压器可以把一种电压等级的交流电能转换成同频率的另一种电压等级的交流电能。一、二次绕组之间虽然没有电的直接联系，却有磁的耦合。变压器能够把一次侧交流电能传递到二次侧是通过磁耦合实现的；能够改变电压是通过一、二次绕组具有不同的匝数来实现的。

2. 变压器可按用途、绕组数、相数、调压方式、冷却方式、容量大小进行分类。

3. 变压器最基本的结构部件是铁心和绕组。铁心是磁路，绕组是电路。

本章小结:

4. 变压器额定值: 额定容量、额定电压、额定电流和额定频率。

三相变压器的额定电压和额定电流是指线电压和线电流。

$$\text{单相: } S_N = U_{1N} I_{1N} = U_{2N} I_{2N}$$

$$\text{三相: } S_N = \sqrt{3} U_{1N} I_{1N} = \sqrt{3} U_{2N} I_{2N}$$

END