



石家莊鐵道大學
SHIJIAZHUANG TIEDAO UNIVERSITY

在线开放课程

电力系统分析

变压器的参数
和数学模型

主讲：田行军

CH2. 电力系统各元件的数学模型



在线开放课程

- 1、电力线路的参数和数学模型
- 2、变压器的参数和数学模型
- 3、发电机的数学模型
- 4、电抗器和负荷的数学模型
- 5、电力网络的数学模型

2.2 变压器的参数和数学模型

- ▶ 三相变压器的绕组可以接成星形或三角形。在电力系统稳态分析中，无论绕组的实际连接方式如何，都一概化成等值的Y，y(即Y/Y)接线方式来进行分析，并且用一相等值电路来反映三相的运行情况。

双绕组变压器的参数和数学模型

三绕组变压器的参数和数学模型

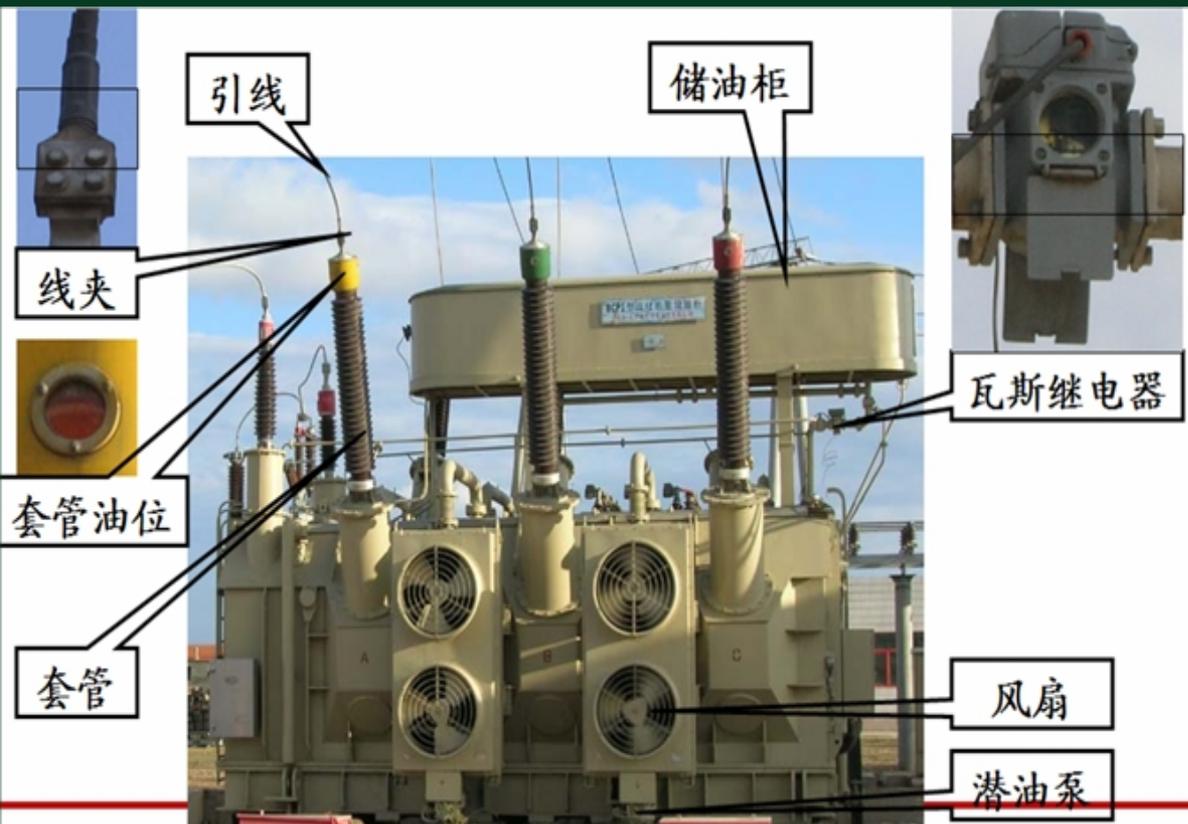
自耦变压器的参数和数学模型

变压器II型等值电路



220KV油浸电力变压器

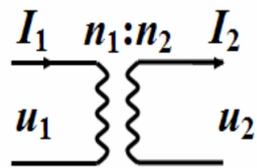
2.2 变压器的参数和数学模型



2.2 变压器的参数和数学模型

一、双绕组变压器

1、理想变压器



$$\left\{ \begin{aligned} I_1 n_1 &= I_2 n_2 \quad \rightarrow \quad I_2 = k I_1 \\ u_1 / n_1 &= u_2 / n_2 \quad \rightarrow \quad u_2 = u_1 / k \\ k &= n_1 / n_2 \end{aligned} \right.$$

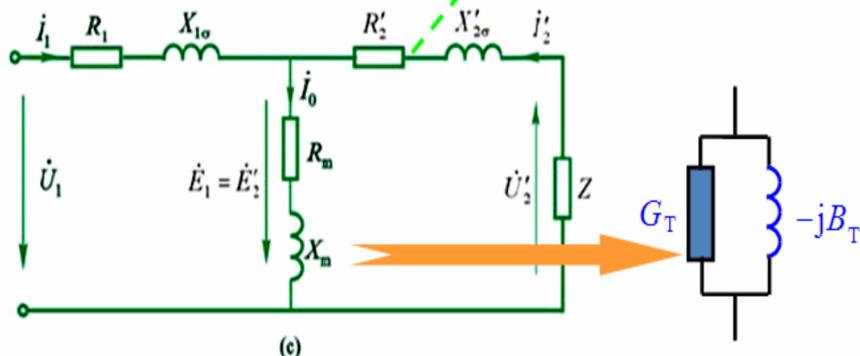
特征：无铜损、铁损、漏抗、激磁电流

2、实际变压器

$$Z_2' = k^2 Z_2$$

$$\dot{U}_2' = k \dot{U}_2$$

$$I_2' = I_2 / k$$



参数都折算到一次侧

$$\rightarrow Y_T = 1/Z_T \rightarrow Z_T = R_T + jX_T; \quad Y_T = G_T - jB_T$$

2.2 变压器的参数和数学模型

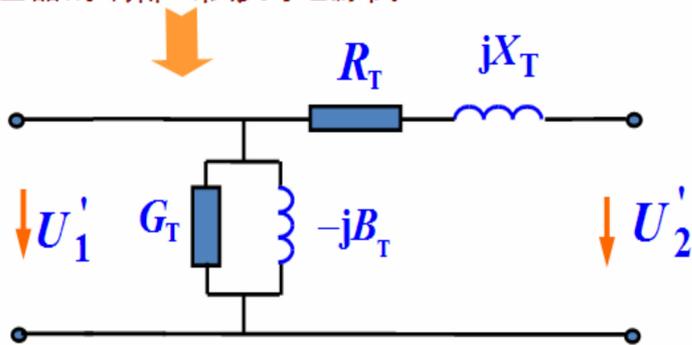
变压器的激磁阻抗比变压器的漏阻抗大得多，故变压器并联支路的电流比较小，一般约为额定电流的0.5~2%。

把并联的激磁支路移到变压器的端部(常移到电源侧)

变压器的等值电路(Γ型)

$$R_T = R_{T1} + R'_{T2}$$

$$X_T = X_{T1} + X'_{T2}$$



R_{T1} R'_{T2} 分别为两侧绕组的电阻，反映双绕组变压器原、副边绕组中的有功功率损耗(铜耗)

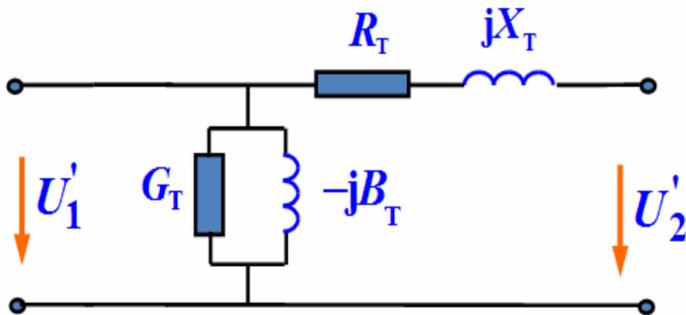
X_{T1} X'_{T2} 原、副边绕组的漏抗，与原、副边绕组的漏磁场有关

G_T 与变压器铁芯中有功功率损耗(铁耗)相关的电导

B_T 为变压器的激磁电纳，反映铁芯中的激磁电流

2.2 变压器的参数和数学模型

变压器的等值电路(Γ型)



双绕组变压器的四个参数 (R_T , X_T , G_T , B_T) 可分别从变压器出厂铭牌上的四个数据计算得出, 即

短路损耗 $P_k \rightarrow R_T$

短路电压百分值 $U_k\% \rightarrow X_T$

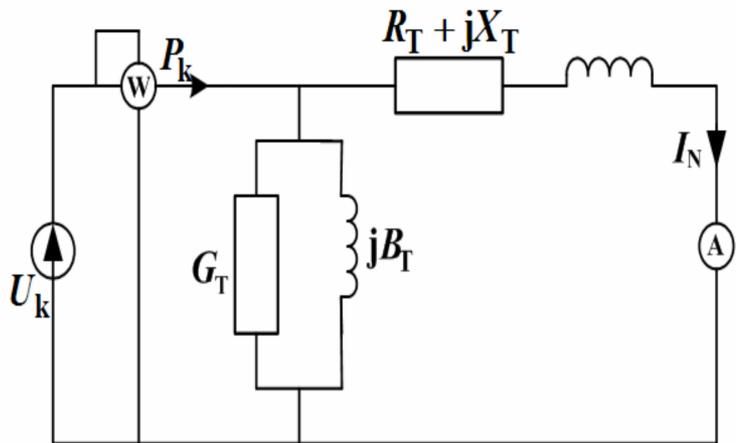
空载损耗 $P_0 \rightarrow G_T$

空载电流百分值 $I_0\% \rightarrow B_T$

2.2 变压器的参数和数学模型

3、短路试验求 R_T 、 X_T

条件：一侧短路，另一侧施加可调三相对称电压，逐渐增加外施电压使二次侧电流达到额定值 I_N 。



2.2 变压器的参数和数学模型

(1) 电阻 R_T

由于此时外加电压较小，相应的铁耗也小，认为

$$P_k = P_{cu} + P_{Fe} \quad P_{Fe} \approx 0$$

$$\text{短路损耗: } P_k \approx 3I_N^2 R_T = 3 \left(\frac{S_N}{\sqrt{3}U_N} \right)^2 R_T = \frac{S_N^2}{U_N^2} R_T$$

$$\Rightarrow R_T = P_k \frac{U_N^2}{S_N^2} \quad (\Omega)$$

注意单位: U_N (V)、 S_N (VA)、 P_k (W)

如 U_N (kV)、 S_N (MVA)、 P_k (kW) 时

$$R_T = P_k \frac{U_N^2}{1000 S_N^2} \quad (\Omega)$$

2.2 变压器的参数和数学模型

(2) 电抗 X_T (高低压绕组总阻抗)

当变压器通过额定电流时，在电抗 X_T 上产生的电压降的大小，可以用额定电压的百分数表示，即

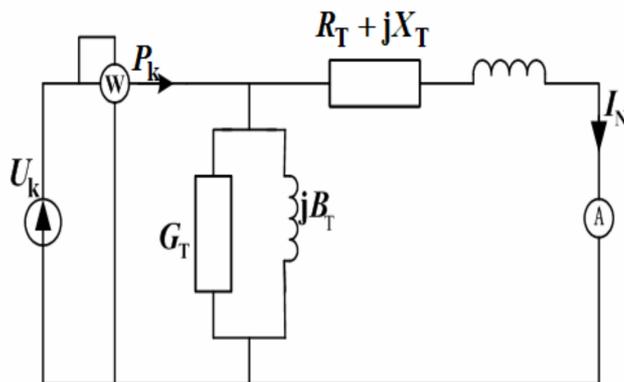
$$U_k \% \approx \frac{\sqrt{3}I_N |Z_N|}{U_N} \times 100\% \Rightarrow Z_N \approx \frac{U_k \% U_N}{100\sqrt{3}I_N} = \frac{U_k \% U_N^2}{100S_N}$$

短路电压百分数 (铭牌上)

$$\because X_T \gg R_T$$

$$\therefore X_T \approx \frac{U_k \% U_N}{100\sqrt{3}I_N} = \frac{U_k \% U_N^2}{100S_N}$$

U_N (kV)、 S_N (MVA)



2.2 变压器的参数和数学模型

4、开路试验求 G_T 、 B_T

条件：一侧开路，另一侧施加对称三相额定电压。

测得的三相变压器消耗的总有功功率称为空载损耗 P_0

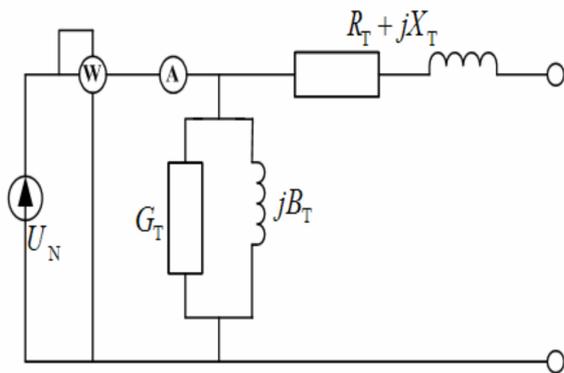
$$P_k = P_{cu} + P_{Fe} \quad P_{cu} \approx 0$$

(1) 电导 G_T ：空载损耗近似看成铁芯中的有功损耗

$$\begin{aligned} \text{空载损耗 } P_0 &= \sqrt{3}U_N (U_N G_T / \sqrt{3}) \\ &= U_N^2 G_T \cdot 10^3 \end{aligned}$$

$$\rightarrow G_T = \frac{P_0}{1000 U_N^2} \quad (S)$$

$$P_0 : \text{kW} \quad U_N : \text{kV} \quad G_T : \text{S}$$



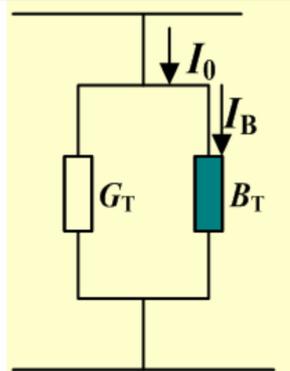
2.2 变压器的参数和数学模型

(2) 电纳 B_T

❖ 表示变压器励磁功率

❖ 励磁功率 → 变压器空载无功

$I_0\%$ — 空载电流百分数



$$I_0\% = \frac{I_0}{I_N} \times 100 \quad \because G_T \ll B_T \quad I_0 \approx I_B$$

$$\therefore I_0\% = \frac{I_B}{I_N} \times 100 \quad \text{又 } I_B = \frac{U_N}{\sqrt{3}} B_T \quad \longrightarrow \quad I_0\% = \frac{U_N B_T}{\sqrt{3} I_N} \times 100$$

$$B_T = \frac{I_0\%}{100} \cdot \frac{\sqrt{3} I_N}{U_N} = \frac{I_0\%}{100} \cdot \frac{S_N}{U_N^2}$$

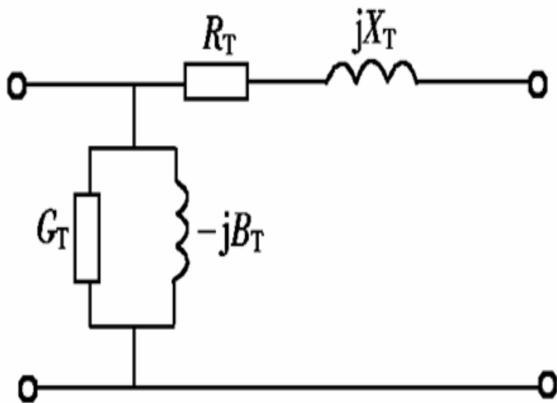
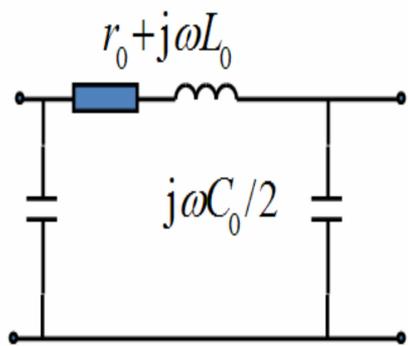
S_N kVA

U_N kV

B_T S

2.2 变压器的参数和数学模型

5、变压器励磁支路形式



$$\frac{Y}{2} = j\frac{B_L}{2} \quad \text{为正（容性）} \quad Y_T = G_T - jB_T \quad \text{虚部为负（感性）}$$

2.2 变压器的参数和数学模型

- ▶ 等值电路实质是将变压器用一个只有漏磁通而没有局部互磁通的变压器来等值。
- ▶ 当某一绕组与其它两个绕组局部互磁通的影响较大时，它的等值漏抗接近于零或甚至为负数。
- 通常，放置在最外层的绕组，其等值电抗最大，靠近铁芯次之，而中间绕组等值电抗为负数。
- 但不要把这一负电抗理解为容性电抗，因为其本质还是电感性的。

2.2 变压器的参数和数学模型

一台SFL₁20000/110型，向10kV网络供电的降压变压器，铭牌上的试验数据：

$P_k=135\text{kW}$ ， $U_k\%=10.5$ ， $P_0=22\text{kW}$ ， $I_0\%=0.8$ 。试计算归算到**高压侧**的变压器参数

解：由题意可知， $S_N=20000\text{kVA}$ ，**高压侧额定电压** $U_N=110\text{kV}$ 。

$$R_T = \frac{\{P_k\}_{\text{kW}} \{U_N^2\}}{\{S_N^2\}_{\text{kVA}}} \times 10^3 = \frac{135 \times 110^2}{20000^2} \times 10^3 = 4.08 \Omega$$

$$X_T = \frac{U_k \%}{100} \times \frac{\{U_N^2\}_{\text{kV}}}{\{S\}_{\text{kVA}}} \times 10^3 = \frac{10.5}{100} \times \frac{110^2}{20000} \times 10^3 = 63.53 \Omega$$

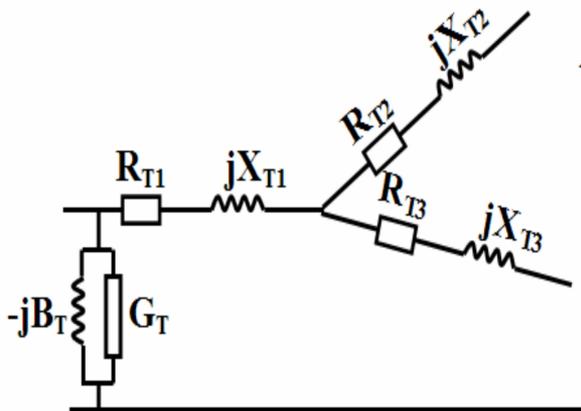
$$G_T = \frac{\{P_0\}_{\text{kW}}}{\{U_N^2\}_{\text{kV}}} \times 10^{-3} = \frac{22}{110^2} \times 10^{-3} = 1.82 \times 10^{-6} \text{S}$$

$$B_T = \frac{I_0 \%}{100} \times \frac{\{S_N\}_{\text{kVA}}}{\{U_N^2\}_{\text{kV}}} \times 10^{-3} = \frac{0.8}{100} \times \frac{20000}{110^2} \times 10^{-3} = 13.2 \times 10^{-6} \text{S}$$

$$k_T = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{110}{11} = 10$$

2.2 变压器的参数和数学模型

二、三绕组变压器



参数的求法与双绕组相同

注意

三绕组容量比不同

各绕组排列不同

导纳的求法与双绕组相同

短路试验求 R_T 、 X_T

条件：令一个绕组开路，一个绕组短路，而在余下的一个绕组施加电压，依此得的数据（两两短路试验）。

2.2 变压器的参数和数学模型

1、由短路损耗求 R_T

1) 对于第 I 类 (100/100/100)

$$\begin{cases} P_{k(1-2)} = 3I_N^2 R_{T1} + 3I_N^2 R_{T2} = P_{k1} + P_{k2} \\ P_{k(1-3)} = 3I_N^2 R_{T1} + 3I_N^2 R_{T3} = P_{k1} + P_{k3} \\ P_{k(2-3)} = 3I_N^2 R_{T2} + 3I_N^2 R_{T3} = P_{k2} + P_{k3} \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_{k1} = \frac{1}{2} [P_{k(1-2)} + P_{k(1-3)} - P_{k(2-3)}] \\ P_{k2} = \frac{1}{2} [P_{k(1-2)} + P_{k(2-3)} - P_{k(1-3)}] \\ P_{k3} = \frac{1}{2} [P_{k(1-3)} + P_{k(2-3)} - P_{k(1-2)}] \end{cases} \rightarrow \begin{cases} R_{T1} = \frac{P_{k1} U_N^2}{1000 S_N^2} \\ R_{T2} = \frac{P_{k2} U_N^2}{1000 S_N^2} \\ R_{T3} = \frac{P_{k3} U_N^2}{1000 S_N^2} \end{cases}$$

2.2 变压器的参数和数学模型

对于第Ⅱ类（100/50/100）第Ⅲ类（100/100/50）

试验时小绕组不过负荷，存在归算问题，归算到 S_N

$$2) \text{ 对于 (100/50/100)} \left\{ \begin{array}{l} P_{k(1-2)} = P'_{k(1-2)} \left(\frac{I_N}{0.5I_N} \right)^2 = 4P'_{k(1-2)} \\ P_{k(2-3)} = P'_{k(2-3)} \left(\frac{I_N}{0.5I_N} \right)^2 = 4P'_{k(2-3)} \end{array} \right.$$

$$3) \text{ 对于 (100/100/50)} \left\{ \begin{array}{l} P_{k(1-3)} = P'_{k(1-3)} \left(\frac{I_N}{0.5I_N} \right)^2 = 4P'_{k(1-3)} \\ P_{k(2-3)} = P'_{k(2-3)} \left(\frac{I_N}{0.5I_N} \right)^2 = 4P'_{k(2-3)} \end{array} \right.$$

代入可计算

2.2 变压器的参数和数学模型

4) 只给出一个最大短路损耗 P_{kmax} 时 (两个100%绕组间短路)

$$\begin{cases} R_T(100\%) = \frac{P_{kmax} U_N^2}{2000 S_N^2} \\ R_T(50\%) = 2R_T(100\%) \end{cases}$$

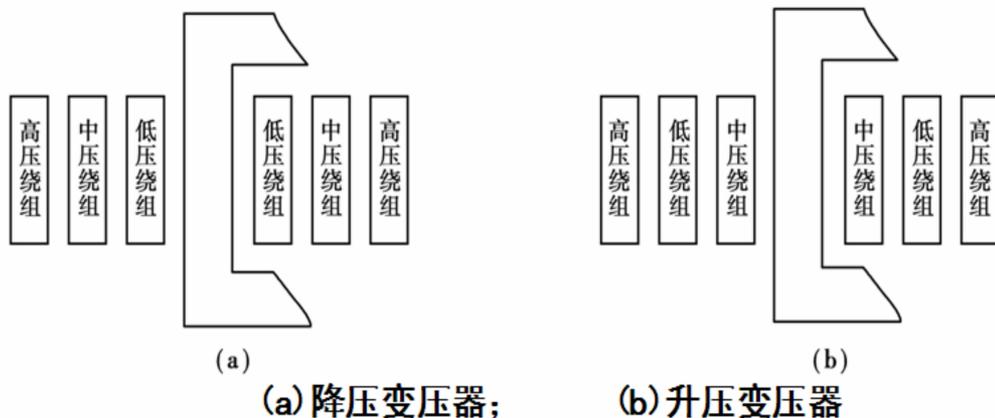
2、由短路电压百分比求 X_T (制造商已归算, 直接用)

$$\begin{cases} U_{k1}(\%) = \frac{1}{2} [U_{k(1-2)}(\%) + U_{k(1-3)}(\%) - U_{k(2-3)}(\%)] \\ U_{k2}(\%) = \frac{1}{2} [U_{k(1-2)}(\%) + U_{k(2-3)}(\%) - U_{k(1-3)}(\%)] \\ U_{k3}(\%) = \frac{1}{2} [U_{k(1-3)}(\%) + U_{k(2-3)}(\%) - U_{k(1-2)}(\%)] \end{cases} \rightarrow \begin{cases} X_{T1} = \frac{U_{k1}(\%) U_N^2}{100 S_N} \\ X_{T2} = \frac{U_{k2}(\%) U_N^2}{100 S_N} \\ X_{T3} = \frac{U_{k3}(\%) U_N^2}{100 S_N} \end{cases}$$

排列不同, 阻抗不同, 中间绕组最小, 甚至为负, 一般取0

2.2 变压器的参数和数学模型

- ▶ 各绕组等值电抗的相对大小，与三个绕组在铁芯上的排列有关。
- ▶ 高压绕组因绝缘要求排在外层。
- ▶ 升压变压器: 低压绕组位于中层，与高、中压绕组均有紧密联系，有利于功率从低压侧向高、中压侧传送。
- ▶ 降压变压器: 中压绕组位于中层，与高压绕组联系紧密，有利于功率从高压侧向中压侧传送。

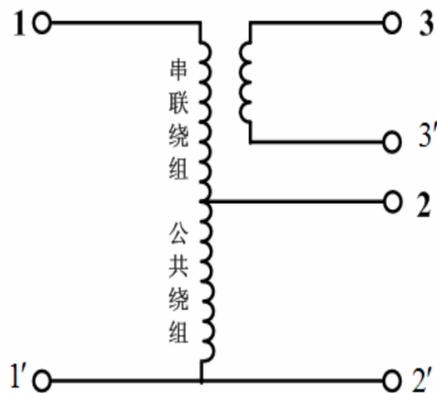
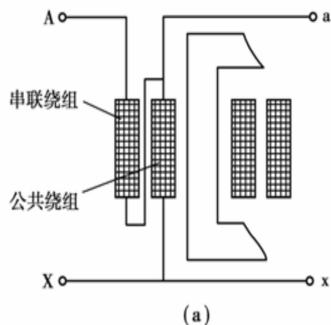


2.2 变压器的参数和数学模型

三、自耦变压器

- ▶ 除了磁路耦合外，还有电的联系。
- ▶ 为了防止一侧故障影响到另一侧，三相自耦变压器的高压和中压绕组一般接成星形(Y形)，其中中性点直接接地。
- ▶ 第三绕组容量小，一般接成三角形，用于消除因变压器铁芯饱和而产生的三次谐波，并可用来供给低压负载。

▶ $Y_0/Y_0/\Delta$



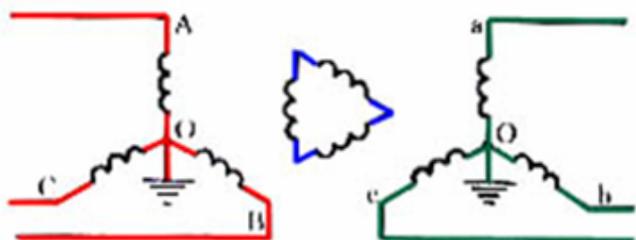
2.2 变压器的参数和数学模型

在三相变压器系统

三相三次谐波电流分量同相位、等幅值, 即:

$$\begin{cases} i_{\mu 3A} = I_{\mu 3m} \sin 3\omega t \\ i_{\mu 3B} = I_{\mu 3m} \sin 3(\omega t - 120^\circ) = I_{\mu 3m} \sin 3\omega t \\ i_{\mu 3C} = I_{\mu 3m} \sin 3(\omega t + 120^\circ) = I_{\mu 3m} \sin 3\omega t \end{cases}$$

采用D接线可以改善
相电动势波形



2.2 变压器的参数和数学模型

特点：电阻小、损耗小、运行经济、结构紧凑、电抗小、
输送容量大、重量轻、便于运输

接线： $Y_0/Y_0/\Delta$ ，第三绕组容量比额定容量小

参
数

旧标准

损耗未归算

$$P_{k(1-3)} = P'_{k(1-3)} \left(\frac{S_N}{S_3} \right)^2$$

$$P_{k(2-3)} = P'_{k(2-3)} \left(\frac{S_N}{S_3} \right)^2$$

电压%未归算

$$U_{k(1-3)} \% = U'_{k(1-3)} \% \left(\frac{S_N}{S_3} \right)$$

$$U_{k(2-3)} \% = U'_{k(2-3)} \% \left(\frac{S_N}{S_3} \right)$$

新标准

最大短路损耗

归算的电压%

小结

- 介绍了双绕组变压器的基本参数及其计算方法；
- 介绍了三绕组变压器和自耦变压器的模型。

