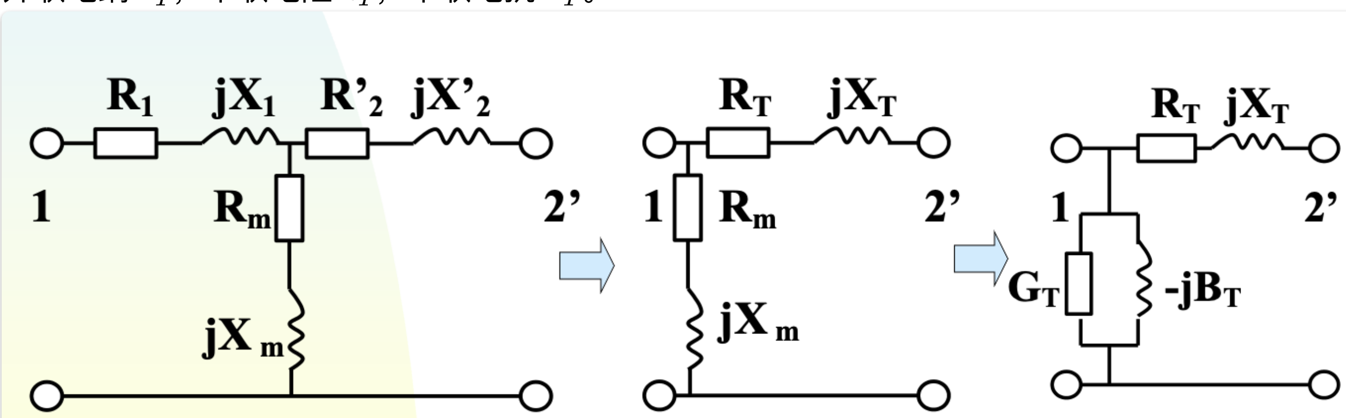
变压器参数和等值电路

要点

变压器如何建模?
变压器等值参数如何求取?
变压器Π型等值电路怎么来的? （如何将磁联系去掉? ）

变压器及其等值电路

类似于线路的分布式参数电路，我们也首先需要要知道变压器模型包含哪几个参数?
在电机学中，利用*折合*的思想，得到了变压器的T型等值电路，因为励磁支路的阻抗远大于一次侧和二次侧漏阻抗，所以可以挪到前面，形成Γ型等值电路 。从而剩下四个参数：并联电导G_T，并联电纳B_T，串联电阻R_T，串联电抗X_T。



> *注意1 - 此处的参数都是折合到一次侧的，在Γ电路后面，还有一个$k:1$的理想变压器*
> *注意2 - 电机学中讲到过，变压器的不同接法，比如Y/Δ 接法，会导致原边副边出现相位差，但是在电力系统稳态分析中，我们不考虑相位差的问题，仅考虑变比数量关系。*

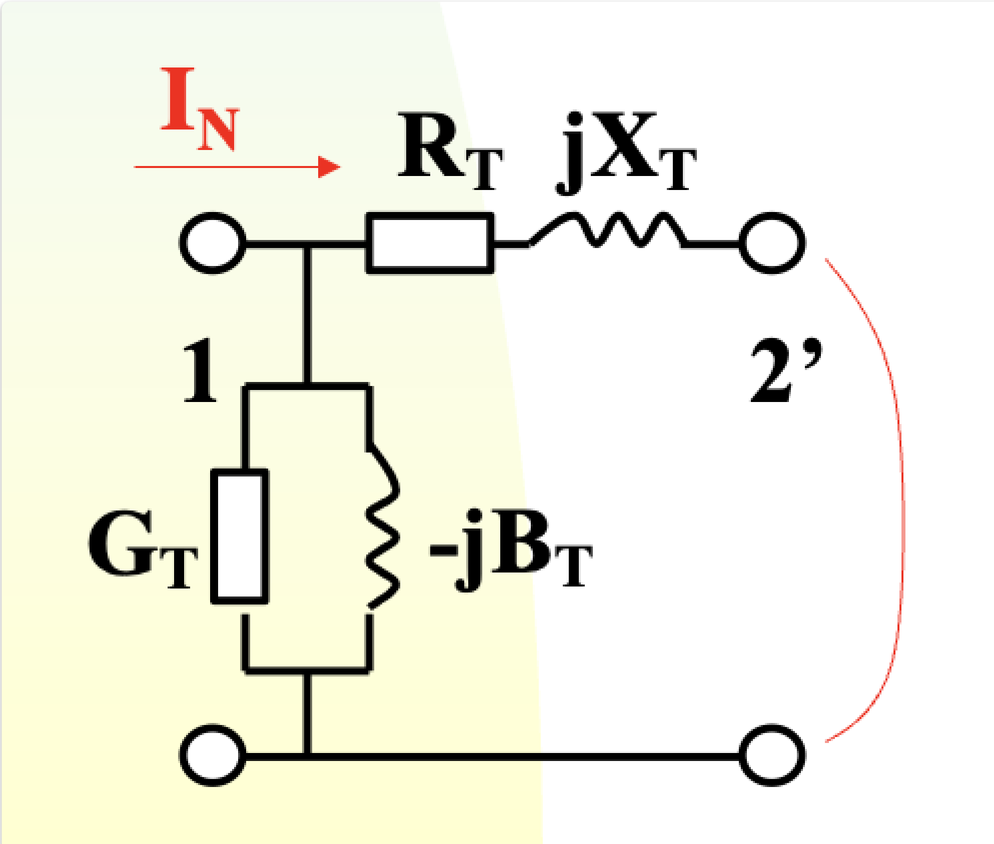
重要原则

在电力系统分析课程中，我们都假设变压器等值为Y/Y接法，我们说的*所有设备参数，都是单相参数*，但是我们说的*功率、电压、电流，都是三相总功率、线电压、线电流*，我们说的*变比，是原边和副边的线电压之比，与具体的接法无关*。
所以：$S_N=\sqrt{3}U_NI_N$ （额定值也遵循上述原则）

如何通过试验确定四个参数?——双绕组变压器

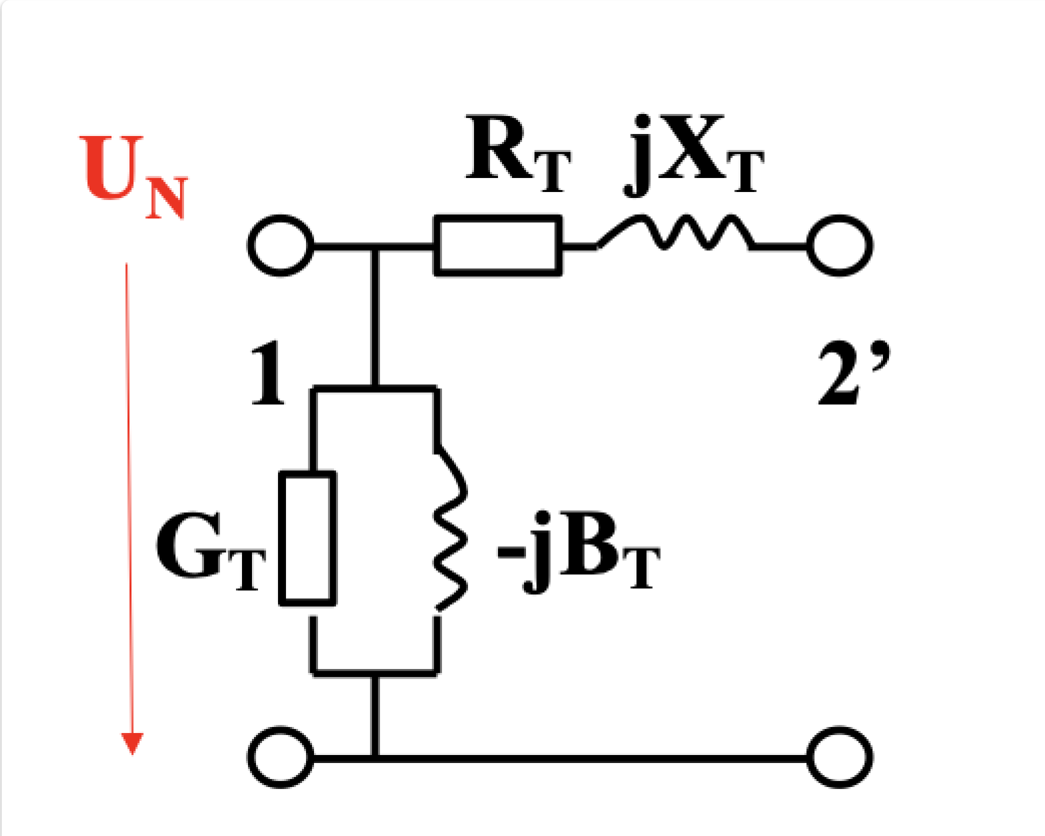
短路试验

- 原边加额定电流I_N，短路损耗主要作用在R_T上，短路电压主要是作用在X_T上



开路试验

- 原边加额定电压U_N，空载损耗主要作用在G_T上，空载电流主要作用在B_T上



短路试验求串联电阻R_T

短路试验时，测到的损耗包括铁损和铜损，但是因为此时加的电压非常小，所以铁芯上磁通很小，铁损基本为0，主要是铜损。（铁损和磁通的平方成正比）
注意：功率都是三相的，但是阻抗参数R_T是单相的。而对于Y解法，相电流就是线电流I_N

> $\Delta P_S = 3I_N^2 R_T = 3(\frac{S_N}{\sqrt{3}U_N})^2 R_T$
> *因为铭牌参数给的都是额定电压U_N和额定功率S_N，所以我们要把I_N换成用S_N和U_N表达*

由此得：

> $R_T = \frac{\Delta P_S U_N^2}{S_N^2} \times 10^3$ *欧*
> *因为此处的单位：ΔP_S： kW，S_N： kVA，U_N： kV，所以直接计算得到的R_T是 $k\Omega$，划算成欧姆，需要乘上10^3*

这意味着，*给出短路损耗ΔP_S，就可以唯一确定串联电阻 R_T，二者具有一一对应的关系*

短路试验求串联电抗X_T

电压降落主要在X_T上，此时由于加的是额定电流I_N，因此电压一定小于额定电压U_N，那么这个测量得到的短路电压占U_N的百分比即：$U_S\%$ （注意 U_S U_N都是线电压）

$$
\begin{aligned}
U_S\% &= \frac{U_S}{U_N} \times 100 \\
&\approx \frac{\sqrt{3} I_N X_T}{U_N} \times 100 \\
&= \frac{S_N X_T}{U_N^2} \times 100
\end{aligned}
$$

则有：

> *$X_T = \frac{U_S\% U_N^2}{S_N} \times 10$ 欧*
> *同样注意由于单位的选取，这里才出现了 $\times 10$*

这意味着，*给出短路电压百分比$U_S\%$，就可以唯一确定串联电抗 X_T，二者具有一一对应的关系

开路试验求并联电导G_T

与前面类似，开路试验加入额定电压 U_N，损耗ΔP_0主要作用在励磁回路上（铁损）

> *$\Delta P_0 = U_N^2 G_T$*
> *注意：U_N线电压，ΔP_0三相功率损耗*

则有：

> *$G_T = \frac{\Delta P_0}{U_N^2} \times 10^{-3}$ 西门*

这意味着，*给出空载损耗P_0，就可以唯一确定并联电导 G_T，二者具有一一对应的关系

开路试验求并联电纳B_T

电流主要流经 B_T支路

$$
\begin{aligned}
I_0\% &= \frac{I_0}{I_N} \times 100 \\
&= \frac{U_N B_T}{\sqrt{3} I_N} \times 100 \\
&= \frac{U_N^2}{S_N} B_T \times 100
\end{aligned}
$$

注意：B_T是相参数，U_N是线电压，所以要除以$\sqrt{3}$
所以：

> $B_T = \frac{I_0\% S_N}{U_N^2} \times 10^{-5}$ *西门*

这意味着，*给出空载电流百分比$I_0\%$，就可以唯一确定并联电纳 B_T，二者具有一一对应的关系

总结一下，我们使用短路试验和开路试验，可以分别测出四组实验数据，而更好对应了变压器模型中的四个主要参数，具有*一一对应关系*。（后面讲完*标幺值*我们会发现，还有更加奇妙的结果！）

变比 k_T

在电力系统分析课程中，变比定义为两侧绕组空载*线电压*比值 $k_T = \frac{U_{N1}}{U_{N2}}$

> *必须要注意，前面我们提到的T型电路，都是折算到原边的，换句话说，用这个算例求得的电量，并非二次侧的真实电量，而是需要通过变比 k_T 再换算回二次侧，得到实际电压等级下的电量数值。可以想象，在多电压等级下，这个换算是非常麻烦的。*

注意事项

- 不论变压器的实际接法是什么，我们求出的参数都是*等值成Y/Y接法*中的*单相参数*
- 各量的单位：kV、kW、kVA
- 变压器涉及到不同电压等级，对应不同的 U_N，在公式中，使用了哪一侧的 U_N，就意味着是将参数折算到哪一侧的结果
- 线路和变压器都涉及到一个并联支路，线路中的并联支路是容性，电纳B_L是整数，而变压器并联支路是励磁支路，对应的是感性，所以表示为 $-B_T$，虚部为负数。
- 励磁支路也可以表示为三相励磁功率
- 励磁支路一般放在功率的输入侧（一次侧）

三相变压器参数计算

对于三相变压器，相当于一共四对参数（一个并联的励磁支路，加上三侧的串联支路）
对应的，需要做一次开路试验，求励磁支路参数，而短路试验要做3次，分别求解三对参数

开路试验

过程和双绕组变压器相同，G_T和B_T的求解方法也相同

短路试验

需要做三组，一侧加额定电流 I_N，一侧短路，另一侧开路，分别得到三组实验数据：

$$\begin{cases}\Delta P_{S(1-2)},\Delta P_{S(2-3)},\Delta P_{S(3-1)}\\U_{S(1-2)}\%,U_{S(2-3)}\%,U_{S(3-1)}\%\end{cases}$$

那么如何利用上面三组实验数据，对应的求解得到三侧的串联阻抗参数?

利用短路损耗求解串联电阻 R_1 R_2 R_3

核心：每个短路试验涉及到的实际上是两个绕组之和，那么需要求出各个绕组对应的短路损耗 ΔP_{S1}、ΔP_{S2}、ΔP_{S3}
因为实验是两两绕组循环做的，可以利用一个很基本的加和运算就能够得到：

$$\begin{cases}\Delta P_{S1}=\dfrac{1}{2}[\Delta P_{S(1-2)}+\Delta P_{S(3-1)}-\Delta P_{S(2-3)}]\\\Delta P_{S2}=\dfrac{1}{2}[\Delta P_{S(2-3)}+\Delta P_{S(1-2)}-\Delta P_{S(3-1)}]\\\Delta P_{S3}=\dfrac{1}{2}[\Delta P_{S(3-1)}+\Delta P_{S(2-3)}-\Delta P_{S(1-2)}]\end{cases}$$

然后利用和双绕组同样的公式：
$R_T=\frac{\Delta P_S U_N^2}{S_N^2}\times 10^3$ 欧
就可以得到

$$\begin{cases}R_1=\frac{\Delta P_{S1}U_N^2}{S_N^2}\times 10^3\\R_2=\frac{\Delta P_{S2}U_N^2}{S_N^2}\times 10^3\\R_3=\frac{\Delta P_{S3}U_N^2}{S_N^2}\times 10^3\end{cases}\tag{1}$$

> *特殊处理：*
> *三绕组变压中，每个绕组的额定容量可能和整个变压器的额定容量不同，比如某个中压侧，额定容量可能只有总容量的一半，此时有啥问题?*

公式（1） 中，ΔP_{S1} ΔP_{S2} ΔP_{S3} 都是指绕组流过与变压器额定容量S_N对应的额定电流I_N时，测到的有功损耗。但在实测的时候，如果某一个绕组的额定容量小（只有一半），意味着对应额定电流也只有一半，此时不能真的加入 I_N，否则绕组就烧了，所以实际加入的必须是受限之后的电流，这样测出来的实测值，我们需要通过一个*假想实验*将其换算到额定电流下，才能使用上面的公式进行求解。注意，这个换算需要使用一个放大系数，有功损耗和电流的平方成正比，所以从实测值放大到假想值（假想短路试验是通过的额定电流I_N），需要有以下的换算：

> $\Delta P_{S(a-b)}=(\frac{S_N}{\min(S_{Na},S_{Nb})})^2\Delta P'_{S(a-b)}$

利用短路电压求解串联电抗 X_1 X_2 X_3

与电阻的求解思路完全相同，此处略。注意的是，国家标准规定，铭牌上标出的短路电压，一般都已经换算到了变压器额定容量，因此一般不需要利用放大系数做归算。

如果需要，那么这个放大系数和功率不同，不是平方关系，而是线性关系。

注意事项

- R_1 R_2 R_3都是折合后的各绕组的等值电阻
- X_1 X_2 X_3都是折合后的各绕组的等值电抗，不是漏抗，而是自感、互感作用后的等值，一般三绕组中有一侧的电抗会小于0，但并不代表物理系统中出现了电容，而是折算之后的数值而已。
- S_N 是变压器的三相容量，而不是绕组的容量
- U_N是同一个，选哪侧的额定电压，就意味着参数归算到了那一侧。

变压器的Π型等值电路

双绕组

前面我们求解得到的模型，都是折算到某一个电压等级下（比如原边），如果我们同时要求另外一侧的电量，不要忘了一个 $K:1$的理想变压器，需要利用变比进行折算。
稳态中，我们只考虑实数变比（不考虑相位移），所以K一般为实数。
但这样一个$K:1$的理想变压器放在这里，本质上是一个*磁耦合*，它把我们的整个电路分隔开了，使用起来非常的不方便，如果涉及到多个电压等级，就要反复的折算，非常麻烦。

有没有可能将磁耦合去掉，变成一个纯粹的电路？ —— Π型等值电路[]()

> ***基本思路***
> *类似于线路求解Π型等值电路，我们如果不关心中间的细节，就可以先通过严格的数学推导，得到两个端口上面U_1 I_1 U_2 I_2之间的关系，这是一个数学关系，然后我们再去看，能否凑出一个物理电路，使得利用这个物理电路进行求解的时候，刚好与数学表达式完全相同*

不考虑励磁支路（因为可以合并到前面的电路里面去，不影响后面理想变压器部分的计算）
列写二端口网络方程

$$\begin{bmatrix}\dot{U}_1\\ \dot{I}_1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}K & Z_T/K\\ 0 & 1/K\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{U}_2\\ \dot{I}_2\end{bmatrix}$$

从上式出发，我们可以推出

$$\begin{cases}\dot{I}_1 & =\frac{1-K}{Z_T}\dot{U}_1+\frac{K}{Z_T}(\dot{U}_1-\dot{U}_2)\\ \dot{I}_2 & =\frac{K}{Z_T}(\dot{U}_1-\dot{U}_2)-\frac{K(K-1)}{Z_T}\dot{U}_2\end{cases}$$

通过构造等价电路，得

$$\begin{cases} Z &= \frac{Z_T}{K} \\ Z_1 &= \frac{Z_T}{1-K} \\ Z_2 &= \frac{Z_T}{K(K-1)} \end{cases}$$

注意

- 此处的Z_T参数，仍然是折算到一次侧的，但是直接按照Π型等值电路求解，得到的$\dot{U}_2$ $\dot{I}_2$ 都直接是二次侧的电量，不需要再进行换算（K已经包含在电路参数中）
- 三个阻抗都是数学等值，没有物理含义
- 三个阻抗都和变比K有关系，特别注意$K=1$时，如何解释物理意义。
- 实际中，如果变比K可调节，电路可以自适应变化，非常适合计算机求解
- 两个并联阻抗的符号相反，一般负号出现在电压等级高的一侧
- 如果一端空载时，从另一端看过去，等值阻抗为 ∞
- 如果变比是复变比$\dot{K}$，那么二端口网络仍然成立，但是就无法转化成 Π型等值电路了（思考一下，哪一步会发生变化，不能成立了？）

三绕组

使用两组双绕组变压器的Π型等值电路

补充知识 负荷的静态模型

负荷的有功功率和无功功率与电网的电压和频率相关，这种关系我们称之为负荷特性。这包括静态特性和动态特性。

- 所谓静态特性，是指当电网的电压频率缓慢变化时，负荷有功和无功如何变化
- 所谓动态特性，是指当电压和频率有大的突变时，负荷有功和无功如何变化
  在稳态分析中，我们主要关心静态特性

几种常见的描述方法：恒功率、恒阻抗、线性、ZIP

电力系统等值电路与标幺值

#电力系统分析 #郭庆来

要点

在已有的元件模型基础上，如何构建系统模型?
理解标幺制的优点和规律

掌握如何在多电压等级下计算标幺值

电力系统等值电路

电力系统由电力元件构成，所以构成电力系统等值电路的第一步是先构建每个元件的模型。在稳态下：

- 发电机 - 恒定电源
- 线路 - Π型等值电路
- 变压器 - Π型等值电路
- 负荷 - 恒功率、恒电流、恒阻抗或者三者组合

在元件模型基础上，根据元件之间的拓扑连接关系，将元件等值电路连接在一起，就可以得到电力系统的等值电路。

遇到的问题：

- 三相计算非常复杂，线电压、相电压经常做各种转换
- 不同电压等级下的可比性差

通过数学变换，实现归一化——*标幺制*

电力系统标幺制

> *有名值 有具体物理单位的量值*
> *标幺值 无具体物理单位的相对值 = 有名值（单位）/ 选定的基值（同单位）*

标幺值的特点：

- 无量纲
- 不唯一：基值不同，标幺值不同，所以必须指明基值

基值选取规律

理论上可以任意选取基值，但如果*遵循一定的规律，可以达到简化计算的目的*。

单相电路

> *基本思路：归一化只针对模量，不变相角，所以主要针对四个模量：U_P，I_P，S_P，Z*
> *为此，需要给出四个基值：U_{PB}，I_{PB}，S_{PB}，Z_B*

在有名值体系下：

$$\begin{cases} U_P & = I_P Z \\ S_P & = U_P I_P \end{cases} \tag{1}$$

我们希望，在标幺值体系下，公式（1）形式依然保持不变，即有

$$\begin{cases} U_{P*} & = I_{P*} Z_* \\ S_{P*} & = U_{P*} I_{P*} \end{cases} \tag{2}$$

现在有4个变量，要满足2个等式，也就意味着4个基值里面，只能给定2个，另外2个基值要根据一定的约束条件给定：

$$\begin{cases} U_{PB} & = I_{PB} Z_B \\ S_{PB} & = I_{PB} U_{PB} \end{cases} \tag{3}$$

在电力系统分析中，我们习惯于确定功率和电压基值，而电流和阻抗基值根据（3）确定，即

$$\begin{cases} I_{PB} & = \frac{S_{PB}}{U_{PB}} \\ Z_B & = \frac{U_{PB}^2}{S_{PB}} \end{cases} \tag{4}$$

对于复阻抗 $\dot{Z} = Z\angle\phi = R + jX$，为了保证复阻抗的阻抗角不发生变化，只有模值进行归一化，所以对于电阻基值R_B和电抗基值X_B，都选择和阻抗模值基值Z_B相同，由此：

$$\dot{Z}_* = \frac{Z\angle\phi}{Z_B} = Z_*\angle\phi = R_* + jX_*$$

同理，令 $P_{PB} = Q_{PB} = S_{PB}$，有

$$\dot{S}_{P*} = \frac{\dot{S}_P}{S_{PB}} = P_{P*} + jQ_{P*}$$

三相电路

> *四个模量：U_L，I_L，S_3，Z*
> *为此，需要给出四个基值：U_{LB}，I_{LB}，S_{3B}，Z_B*

在有名值体系下：

$$\begin{cases} U_L & = \sqrt{3} I_L Z & = \sqrt{3} U_P \\ S_3 & = \sqrt{3} U_L I_L & = 3 U_P I_P & = 3 S_P \end{cases} \tag{5}$$

如果合理的选择基值：

$$\begin{cases} U_{LB} & = \sqrt{3} I_{LB} Z_B & = \sqrt{3} U_{PB} \\ S_{3B} & = \sqrt{3} U_{LB} I_{LB} & = 3 U_{PB} I_{PB} & = 3 S_{PB} \end{cases} \tag{6}$$

则能得到和单相（公式（2））一致的结果：

$$\begin{cases} U_{L*} & = I_{L*} Z_* & = U_{P*} \\ S_{3*} & = U_{L*} I_{L*} & = U_{P*} I_{P*} & = S_{P*} \end{cases} \tag{7}$$

这意味着，如果我们通过合理的选择基值，就可以将三相公式和单相公式保持一致，线电压标幺值与相电压标幺值一致，三相功率标幺值与单相功率标幺值一致，都无须考虑 $\sqrt{3}$
在给定（6）之后，线电流和阻抗的基值就可以随之确定：

$$\begin{cases} I_{LB} & = \frac{S_{3B}}{\sqrt{3} U_{LB}} \\ Z_B & = \frac{U_{LB}^2}{S_{3B}} \end{cases} \tag{8}$$

对于三相复功率 $\dot{S}_3 = P_3 + jQ_3$，如果选 $S_{3B} = P_{3B} = Q_{3B}$，则有：

$$\dot{S}_{3*} = \frac{\dot{S}_3}{S_{3B}} = P_{3*} + jQ_{3*}$$

所以，用相电压、相电流标幺值计算得到的功率标幺值，可以既代表单相，也代表三相

$$\dot{S}_{3*} = \dot{S}_{P*} = \dot{U}_{p*} \hat{\dot{I}}_{p*}$$

> *一定要注意：在多个元件组成的电路里面，基值必须统一*

变压器铭牌数据和标幺值的关系

> *在第4讲中，我们提到了变压器四个等值参数与铭牌上四个实验的一一对应关系。而在标幺制下，我们还有更有趣的结论，即当我们选取变压器额定功率和额定电压作为基值的前提下，参数和铭牌数据的标幺值是直接相同的。*

因此，以下我们都是选择 S_N作为功率基值，U_N作为电压基值。

R_{T*}和ΔP_{S*}

有名值体系下： $R_T = \frac{\Delta P_S U_N^2}{S_N^2} \times 10^3$ 欧，R_T和ΔP_S一一对应
选择 S_N作为功率基值，U_N作为电压基值，则有：

$$\begin{cases} \Delta P_{S*} & = \Delta P_S / S_N \\ R_{T*} & = \frac{\Delta P_S U_N^2}{S_N^2} \times 10^3 / (\frac{U_N^2}{S_N} \times 10^3) & = \Delta P_S / S_N & = \Delta P_{S*} \end{cases}$$

二者的标幺值是相同的

X_{T*}和U_{S*}

有名值体系下：$X_T=\frac{U_S\%U_N^2}{S_N}\times 10$ 欧，X_T和$U_S\%$一一对应
选择 S_N作为功率基值，U_N作为电压基值，则有：

$$\begin{cases} U_{S*} & =U_S/U_N=U_S\%/100 \\ X_{T*} & =\frac{U_S\%U_N^2}{100S_N}\times 10^3/(\frac{U_N^2}{S_N}\times 10^3) \quad =U_S\%/100 \quad =U_{S*} \end{cases}$$

二者的标幺值是相同的

G_{T*}和ΔP_{0*}

有名值体系下：$G_T=\frac{\Delta P_0}{U_N^2}\times 10^{-3}$ 西门，G_T和ΔP_0一一对应
选择 S_N作为功率基值，U_N作为电压基值，则有：

$$\begin{cases} \Delta P_{0*} & =\Delta P_0/S_N \\ G_{T*} & =\frac{\Delta P_0}{U_N^2}\times 10^{-3}/(\frac{S_N}{U_N^2}\times 10^{-3}) \quad =\Delta P_0/S_N \quad =\Delta P_{0*} \end{cases}$$

二者的标幺值是相同的

B_{T*}和I_{0*}

有名值体系下：$B_T=\frac{I_0\%S_N}{U_N^2}\times 10^{-5}$ 西门，B_T和$I_0\%$一一对应
选择 S_N作为功率基值，U_N作为电压基值，则有：

$$\begin{cases} I_{0*} & =I_0/I_N=I_0\%/100 \\ B_{T*} & =\frac{I_0\%S_N}{100U_N^2}\times 10^{-3}/(\frac{S_N}{U_N^2}\times 10^{-3}) \quad =I_0\%/100 \quad =I_{0*} \end{cases}$$

二者的标幺值是相同的

> *所以，对于变压器参数来说，如果我们选择变压器额定功率和额定电压作为基值，那么Γ型等值电路的四个参数不仅和四个实验数值一一对应，而且其标幺值和实验数据的标幺值直接相同，铭牌上的参数可以直接拿过来用*

基值变化对于标幺值的影响

必须要注意的一个问题是，一个电路中，基值应当统一。以变压器为例，如果直接用铭牌参数标幺值作为等值电路的参数标幺值，一个前提是选择变压器的额定功率和额定电压作为基值。但当这个变压器和其他设备连接在一起，就必须使用整个系统统一的标幺值才行，这就必然涉及到一个*标幺值的换算*问题。

标幺值换算的基本原则：有名值不变！

多电压等级电力系统的标幺制

复杂电力系统一定存在多个电压等级，但前面讲过，在一起系统中，应该只有一套共同的基值，那么对于电压基值，应该如何选取呢?
有三种做法，其中两种是精确的，一种是近似的（现在基本不用）

做法1 - 逐级归算法（精确做法）

1. 按照变压器的变比，将所有参数都折合到同一个电压等级。
2. 选择统一的S_B,U_B，计算得到所有阻抗的标幺值
3. 求解（归算到某一个电压等级的）标幺值电路
4. 根据标幺值反算有名值，然后再根据变比将其他电压等级的有名值折算汇到实际的电压等级

可以想象，如果存在多个电压等级，就要反复的跨电压等级折算。会非常复杂，因此一般较少采用这个方法。

做法2 - 各选电压法（精确做法，常用）

基本思路（两电压等级的例子）

**1. 变压器的阻抗 X_T归算到1侧，然后得到 1、2侧各自的总阻抗 X_1和X_2 。

**2. 系统容量基值统一选为S_B，变压器两侧各自选定电压基值 U_{B1}和U_{B2}，然后在两侧分别归算标幺值

需要思考：为什么两边选择了不同的电压基值，但是整个电路还可以放在一起来计算呢?

- 因为中间还存在着一个理想变压器，这个理想变压器相当于是一个“磁耦合”，把左右两个电路隔开了，因此左右两个电路仍然可以独立的进行求解。
- 那么，在标幺值下，这个理想变压器的变比变成什么呢?

此时：

$$\begin{cases} U_{t1*} & = \frac{U_{t1}}{U_{B1}} \\ U_{t2*} & = \frac{U_{t2}}{U_{B2}} \end{cases}$$

所以

$$K_* = \frac{U_{t1*}}{U_{t2*}} = \frac{U_{t1}/U_{B1}}{U_{t2}/U_{B2}} = \frac{K}{K_B}$$

其中

$$K_B=\frac{U_{B1}}{U_{B2}}$$

这样，在标幺值体系下，相当于我们还有一个变比为 K_*的理想变压器，那么我们的问题就变成了，对于这样一个磁耦合，我们如何将其消去呢?

首先，如果我们在选择两侧的电压基值时候，就按照变压器的额定电压选，也就是说 $U_{B1}=U_{t1}$，$U_{B2}=U_{t2}$ ，那么这个问题就简单了，此时的 $K_*=1$，我们称此时的变压器叫做*标准变比变压器*。这个时候，中间的磁耦合相当于不见了。（标幺值电路下没有变压器了，那么变压器的变压作用体现在哪呢？体现在反算有名值的时候两侧乘以不同的电压基值）

但如果我们的基值不是按照上述方法选的，那么就会导致 $K_*\neq 1$ ，此时我们成这个变压器为*非标准变比变压器*。

我们下面需要解决的问题——**如何将这一非标准变比变压器所代表的磁耦合去掉**?

回忆一下，我们在变压器等值电路中是如何处理的？——**引入Π型等值电路**

因此，各选电压法的第三步就是
3. 将中间的非标准变比变压器 $K_*:1$ 转化为Π型等值电路，从而形成全系统统一的标幺值电路

最后：
4. 分析求解这一标幺值电路，按照各自的基值反算回有名值

多电压等级怎么办?

当推广到多电压等级的时候，发现会存在一个相对复杂的问题，就是一个电压等级下，线路首末端两个变压器，额定电压是不一样的。在第2讲我们曾经讲到过，一般线路首段的变压器二次侧，可能选在 $1.1U_N$作为额定电压，而线路末端变压器的一次侧，则选择 U_N作为额定电压。

在这个场景下，如果想通过选择变压器额定电压作为基值，来避免出现非标准变比变压器，就会变得很困难。涉及到的三个电压等级的基准电压并非相互独立的，而必须要满足等式关系，所以只能一级一级的推算下来，确定基准电压，这一方面不直观，另一方面，如果存在环，就会导致难以计算。

因此，在多电压等级下，一般我们做不到完全消去变比，那么我们就保留非标准变比，后续用Π型等值电路处理即可。

实际电力系统中，基值如何选取?

一般来说，功率基值选择 $S_B=100MVA$ （大系统也可能选择 1000MVA），主要为了方便计算。

而电压基值，在每个电压等级下，选择一个 *平均标称电压*，因为线路首末端的变压器额定电压一般为 $1.1U_N$和U_N，我们一般选择二者平均值，即 $U_{av} = 1.05U_N$

惯例如下表所示

电网额定电压（kV）	平均标称电压（kV）
500	(550+500)/2=525
220	(542+220)/2=230
110	(121+110)/2=115
10	(11+10)/2=10.5

参照上表，每个电压等级选择对应的平均标称电压 U_{av}作为基值，然后不同电压等级之间计算得到对应的非标准变比变压器（K_*），将其转化为Π型等值电路。
求解上述标幺值电路，结果换算为有名值时，每级电压按照对应的 U_{av}返算。
注意，这样得到的结果，是**严格精确**的。

做法3 - 近似计算法（不常用）

近似认为该电压等级网络所有元件的 $U_N = U_{av}$，而不去考虑实际的额定电压。此时相当于忽略了非标准变比变压器，直接来进行简化计算。但结果和实际是有偏差的，在计算机不普遍的时候，常用于手算一个近似结果。现在已经基本不适用。

标幺值的优缺点

优点

- 便于比较、分析原件特性和参数
- 各级电压标幺值都接近于1.0 （后面在潮流分析中，方便给出基值）
- 对称三相电路的计算和单相完全一致
- 可以简化一些公式（暂态部分）
  缺点
- 无量纲，物理概念不如有名值清楚