

# 并联变压器的负荷分配与环流计算

## Load Distribution and Circulation Calculation of Parallel Transformer

李宗孔

Zongkong Li

云南红河技师学院  
中国·云南 红河 661699  
Yunnan Honghe Technician College,  
Honghe, Yunnan, 661699, China

**【摘要】**论文对变压器短路阻抗的计算依据进行了探讨,并阐述了短路阻抗在并联运行变压器的负荷分配及环流计算中的应用。

**【Abstract】**This paper discusses the calculation basis of transformer short circuit impedance, and expounds the application of short circuit impedance in load distribution and circulation calculation of transformer in parallel operation.

**【关键词】**变压器;并联运行;负荷分配;环流计算

**【Keywords】**transformer; parallel operation; load distribution; circulation calculation

**【DOI】**10.36012/peti.v2i1.1284

### 1 电力变压器的短路阻抗 $Z_T$

#### 1.1 电力变压器绕组作 Y 联接与 $\Delta$ 联接之间的阻抗变换

若绕组为  $\Delta$  联接,要进行  $\Delta$ -Y 等效阻抗变换,等效变换的条件是功率损耗不变。由于元件的三相阻抗是对称的(如图 1 所示),于是:

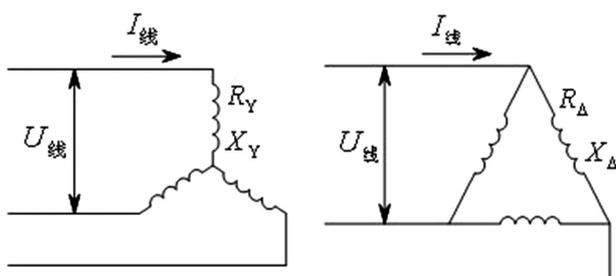


图 1 绕组  $\Delta$  联接和 Y 联接时的等效电路

①有功功率损耗  $\Delta P \approx 3I_{\text{相}}^2 R_{\text{相}}$  相同。Y 形联接时: $\Delta P = 3I_{\text{线}}^2 R_{\text{相}} = 3I_{\text{线}}^2 R_Y$ 。  $\Delta$  形联接时: $\Delta P = 3I_{\text{相}}^2 R_{\text{相}} = 3(I_{\text{线}}/\sqrt{3})^2 R_{\Delta}$ 。即:

$$3I_{\text{线}}^2 R_Y = 3(I_{\text{线}}/\sqrt{3})^2 R_{\Delta}$$

$$R_{\Delta} = 3R_Y \quad (1)$$

②无功功率损耗  $\Delta Q = 3I_{\text{相}}^2 X_{\text{相}}$  相同。Y 形联接时: $\Delta Q = 3I_{\text{线}}^2 X_{\text{相}} = 3I_{\text{线}}^2 X_Y$ 。  $\Delta$  形联接时: $\Delta Q = 3I_{\text{相}}^2 X_{\text{相}} = 3(I_{\text{线}}/\sqrt{3})^2 X_{\Delta}$ 。即:

$$3I_{\text{线}}^2 X_Y = 3(I_{\text{线}}/\sqrt{3})^2 X_{\Delta}$$

$$X_{\Delta} = 3X_Y \quad (2)$$

#### 1.2 电力变压器的短路阻抗 $Z_T$ 计算

##### 1.2.1 电力变压器的短路电阻 $R_T$

如图 2 所示变压器在做短路试验时,可近似计算出短路损耗  $\Delta P_k$ 。Y 联接时: $\Delta P_k \approx 3I_N^2 R_T$ (忽略铁损耗  $\Delta P_{Fe}$ )。  $\Delta$  联接时(按公式 1): $\Delta P_k \approx 3\left(\frac{I_N}{\sqrt{3}}\right)^2 R_{\Delta} = I_N^2 3R_T = 3I_N^2 R_T$ 。

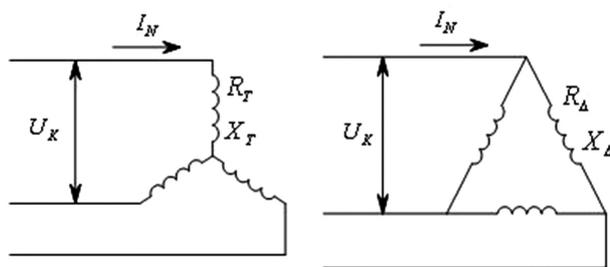


图 2 变压器二次侧短路,一次绕组作  $\Delta$  联接和 Y 联接时的等效电路

可见,不论是 Y 联接还是  $\Delta$  联接,  $R_T$  都可用  $\Delta P_k/(3I_N^2)$  来计算。对于  $\Delta$  联接,  $R_T$  是  $\Delta$ -Y 等效阻抗变换后的电阻。于是:

$$R_T = \frac{\Delta P_k}{3I_N^2} = \frac{\Delta P_k}{3(S_N/\sqrt{3} U_N)^2} = \Delta P_k \left(\frac{U_N}{S_N}\right)^2 \quad (3)$$

式中,  $U_N$  为变压器的额定电压(当取  $U_N = U_{1N}$  时,  $R_T$  为变压器一次侧看进去的等效电阻;当取  $U_N = U_{2N}$  时,  $R_T$  为变压器二次侧看进去的等效电阻)。  $S_N$  为变压器的额定容量。

##### 1.2.2 电力变压器的短路电抗 $X_T$

可由变压器的短路电压百分数  $U_k\%$  近似计算。变压器作短

路试验如图 2 所示。Y 联接时： $U_k = \sqrt{3} I_N Z_T \sqrt{R_T^2 + X_T^2}$ ，其中， $Z_T = \sqrt{R_T^2 + X_T^2}$  为变压器的短路阻抗。△联接时，按式(1)、(2)： $U_k = \frac{I_N}{\sqrt{3}} \sqrt{R_\Delta^2 + X_\Delta^2} = \frac{I_N}{\sqrt{3}} \sqrt{(3R_T)^2 + (3X_T)^2} = \sqrt{3} I_N \sqrt{R_T^2 + X_T^2} = \sqrt{3} I_N Z_T$ 。

可见，不论是 Y 联接还是 △联接， $Z_T$  都可用  $U_k / (\sqrt{3} I_N)$  来估算。对于 △联接， $Z_T$  是 △—Y 等效阻抗变换后的阻抗。由于  $U_k \% = \frac{U_k}{U_N} \times 100$ ，于是：

$$Z_T = \frac{U_k}{\sqrt{3} I_N} = \frac{U_k \%}{100} \frac{U_k}{\sqrt{3} I_N} = \frac{U_k \%}{100} \frac{U_N^2}{S_N} \quad (4)$$

式中， $U_N$  为变压器的额定电压（当取  $U_N = U_{1N}$  时， $Z_T$  为变压器一次侧看进去的等效阻抗；当取  $U_N = U_{2N}$  时， $Z_T$  为变压器二次侧看进去的等效阻抗）。 $S_N$  为变压器的额定容量。

于是，电力变压器的短路电抗  $X_T$  为：

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (5)$$

S9-1000/10(6) 配电变压器，Y,  $y_{n0}$  联接，短路损耗  $\Delta P_k = 10.3 \text{ kW}$ ，阻抗电压百分数  $U_k \% = 4.5$ ，按式(3)、(4)、(5)，电抗  $X_T$  约为  $R_T$  的 4.5 倍。 $X_T$  比  $R_T$  大得多，实际计算中，往往认为  $X_T \approx Z_T$ 。

## 2 电力变压器并联时的负荷分配

一般满足并联运行条件的两台变压器短路阻抗角是相差很小的，因此两台变压器 T1、T2 并联运行时，负荷分担与短路阻抗值成反比<sup>[4]</sup>，可按下式计算（可由两个阻抗并联的分流公式类推得到）：

$$\begin{aligned} S_{T1} &= \frac{Z_{T2}}{Z_{T1} + Z_{T2}} S; \\ S_{T2} &= \frac{Z_{T1}}{Z_{T1} + Z_{T2}} S \end{aligned} \quad (6)$$

式中： $S_{T1}$ 、 $S_{T2}$  分别为两台变压器 T1、T2 分担的视在负荷 (kVA)； $S$  为两台变压器共同所带的总视在负荷 (kVA)； $Z_{T1}$ 、 $Z_{T2}$  分别为两台变压器 T1、T2 的短路阻抗 ( $\Omega$  或  $m\Omega$ )。

例 1：联结组别为 Dyn11，二次侧额定电压为 0.4kV 的两台配电变压器（一台 S9-1000/10 型，一台 S9-1600/10 型）并列运行。问负荷达到 2500kVA 时，两台变压器所带负荷各为多少？

解：要计算并联运行的变压器所带负荷，先计算各台变压器阻抗值，可按下式计算：

$$Z_T = \frac{U_k}{\sqrt{3} I_N} = \frac{U_k \%}{100} \frac{U_N}{\sqrt{3} I_N} = \frac{U_k \%}{100} \frac{U_N^2}{S_N} \quad (7)$$

查配电设计手册，得 S9-1000 变压器 (T1) 的  $U_k \% = 5$ ，S9-1600 型变压器 (T2) 的  $U_k \% = 6$ ，因此两台变压器的阻抗值分别为：

$$Z_{T1} = \frac{5 \times 400^2}{100 \times 100000} = 0.008 \Omega = 8 \text{ m}\Omega$$

$$Z_{T2} = \frac{6 \times 400^2}{100 \times 1600000} = 0.006 \Omega = 6 \text{ m}\Omega$$

由此可计算出两台配电变压器在总负荷达 2500kVA 时各台负担的负荷分别为：

$$S_{T1} = 2500 \text{ kVA} \times \frac{6}{8+6} \approx 1071 \text{ kVA}$$

$$S_{T2} = 2500 \text{ kVA} \times \frac{8}{8+6} \approx 1429 \text{ kVA}$$

根据上述计算结果可知，S9-1000/10 变压器 (T1) 过负荷 (1071-1000)kVA=71kVA，超过其额定容量  $\frac{71 \text{ kVA}}{1000 \text{ kVA}} \times 100\% = 7.1\%$ 。

两台变压器 T1、T2 并联时负荷分配也可用公式一次直接计算出来（设并联时总负荷为  $S$ ）。变压器的阻抗值为： $Z_T = \frac{U_k \% U_N^2}{100 S_N}$ 。即  $Z_{T1} = \frac{U_{k1} \% U_{N1}^2}{100 S_{N1}}$ ， $Z_{T2} = \frac{U_{k2} \% U_{N2}^2}{100 S_{N2}}$ ，而  $U_{N1} = U_{N2}$ （分别为变压器 T1、T2 二次侧的额定电压），所以变压器 T1 所带负荷：

$$\begin{aligned} S_1 &= \frac{Z_{T2}}{Z_{T1} + Z_{T2}} S = \frac{U_{k2} \% / S_{N2}}{U_{k1} \% / S_{N1} + U_{k2} \% / S_{N2}} S \\ &= \frac{1}{(S_{N2} U_{k1} \%)/(S_{N1} U_{k2} \%)+1} S = \frac{S_{N1} U_{k1} \%}{S_{N1} U_{k1} \% + S_{N2} U_{k2} \%} S \end{aligned} \quad (8)$$

变压器 T2 所带负荷：

$$\begin{aligned} S_2 &= \frac{Z_{T1}}{Z_{T1} + Z_{T2}} S = \frac{U_{k1} \% / S_{N1}}{U_{k1} \% / S_{N1} + U_{k2} \% / S_{N2}} S \\ &= \frac{1}{1+(S_{N1} U_{k2} \%)/(S_{N2} U_{k1} \%)} S = \frac{S_{N2} U_{k2} \%}{S_{N1} U_{k1} \% + S_{N2} U_{k2} \%} S \end{aligned} \quad (9)$$

## 3 电力变压器并联运行变比不等时的环流计算

三相变压器实质是三个单相变压器的组成，分析两台三相变压器在对称状态下的并联运行情况，可简化为用两台单相变压器并联运行来分析。设变压器 1 的变比小于变压器 2 的变比，即  $k_1 < k_2$ ，如图 3 所示。

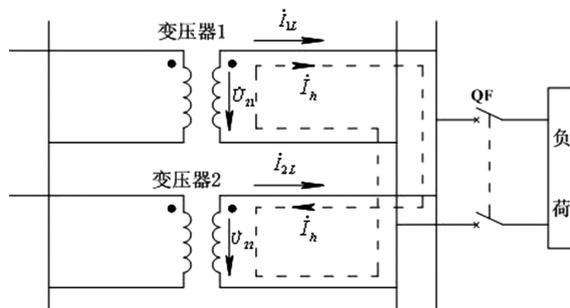


图 3 变比不相等时的并联运行

先分析空载的情况（负载开关 QF 在断开位置）。给变压器 1、变压器 2 一次侧同时加上电压  $U_1$ ，由于变比小的变压器

感应电势高,由此两台变压器二次侧电压不相等,于是二次侧回路中出现了差额电压  $\Delta\dot{U}=\dot{U}_{21}-\dot{U}_{22}=\dot{U}_1/k_1-\dot{U}_2/k_2$ , 从而在二次侧回路中产生环流  $\dot{i}_h$ , 如图 3 中的虚线所示。由于电磁感应,一次侧回路中也产生相应的环流。

二次侧环流  $\dot{i}_h$  的计算,如图 4 所示(变比不相等的两台变压器并联时的简化电路图),图中的物理量均已折算到二次侧,可见二次侧环流为:

$$\dot{i}_h = \frac{\frac{\dot{U}_1}{k_1} - \frac{\dot{U}_1}{k_2}}{Z_{n1} + Z_{n2}} \quad (10)$$

式中:  $Z_{n1}$ 、 $Z_{n2}$  分别为变压器 1、2 折算到二次侧的短路阻抗。

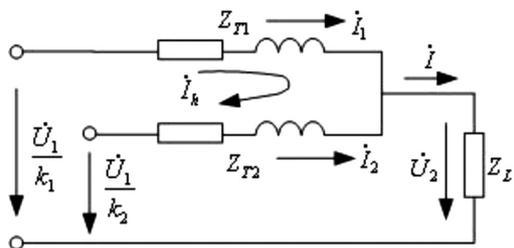


图 4 变比不相等的两台变压器并联时的简化电路图

再来分析负载时的情况(负载开关 QF 在合闸位置)。负载时环流依然存在,变压器的二次侧实际运行电流  $\dot{i}_1$  和  $\dot{i}_2$ , 由环流  $\dot{i}_h$  和负载分量  $\dot{i}_{1L}$ 、 $\dot{i}_{2L}$  两部分组成。

变压器带负载并联运行时,利用图 4 可列出方程组:

$$\begin{cases} \frac{\dot{U}_1}{k_1} = \dot{U}_2 + \dot{i}_1 Z_{n1} \\ \frac{\dot{U}_1}{k_2} = \dot{U}_2 + \dot{i}_2 Z_{n2} \\ \dot{i} = \dot{i}_1 + \dot{i}_2 \end{cases}$$

解以上联立方程组,可得出两台变压器二次侧的实际运行电流分别为:

$$\begin{cases} \dot{i}_1 = \dot{i} \frac{Z_{n2}}{Z_{n1} + Z_{n2}} + \frac{\frac{\dot{U}_1}{k_1} - \frac{\dot{U}_1}{k_2}}{Z_{n1} + Z_{n2}} = \dot{i}_{1L} + \dot{i}_h \\ \dot{i}_2 = \dot{i} \frac{Z_{n1}}{Z_{n1} + Z_{n2}} - \frac{\frac{\dot{U}_1}{k_1} - \frac{\dot{U}_1}{k_2}}{Z_{n1} + Z_{n2}} = \dot{i}_{2L} - \dot{i}_h \end{cases}$$

可见,变比小的变压器二次侧实际运行电流相量等于负载分量与环流之相量和,变比大的变压器二次侧实际运行电流相量等于负载分量与环流之相量差。也就是说,变比不相等的变压器并联运行,在空载时,一、二次侧回路中会出现环流,导致损耗增加。负载时环流分量的存在,致使变比小的变压器二次电流变大,极易过负荷;变比大的变压器二次电流变小,

处于轻负荷运行。

由于变压器短路阻抗很小,即使变比相差很小,也会产生很大的环流,所以对并联运行的变压器,其变比差必须小于一定的数值。一般要求变比差  $|k_1 - k_2|$  与变比的几何平均值  $\sqrt{k_1 k_2}$  之比小于 0.01,即  $\Delta k = \frac{|k_1 - k_2|}{\sqrt{k_1 k_2}} \leq 0.01$ 。

例 2:某矿山由于负荷增加,决定采用两台变压器并联使用均匀分担负荷,两台变压器型号、参数相同,均为 S9-250/10 型, Y, y<sub>0</sub> 联接,短路(阻抗)电压百分数  $U_k\% = 4$ ,分接开关有三个位置: I 档: 10500V, II 档: 10000V, III 档: 9500V。由于并联运行前未做仔细检查,致使一台在 III 档而一台在 II 档并联运行,空载时出现了近 240A 的环流。下面进行分析计算。

此时,一号变压器的实际变比  $k_1 = \frac{9500/\sqrt{3}}{400/\sqrt{3}} = 23.75$ , 二号变压器的实际变比  $k_2 = \frac{10000/\sqrt{3}}{400/\sqrt{3}} = 25$ ,  $\Delta k = \frac{|k_1 - k_2|}{\sqrt{k_1 k_2}} = \frac{25 - 23.75}{\sqrt{25 \times 23.75}} = 0.0513$ 。

两台变压器的短路阻抗为:

$$Z_{n1} = Z_{n2} = \frac{U_k\%}{100} \frac{U_N^2}{S_N} = \frac{4}{100} \times \frac{400^2}{250000} = 0.0256 \Omega = 25.6 \text{m}\Omega$$

设并联变压器一次侧的线电压为 10000V,空载时二次侧的环流大小  $I_h$  为:

$$I_h = \frac{\frac{U_1}{k_1} - \frac{U_1}{k_2}}{Z_{n1} + Z_{n2}} = \frac{\frac{10000/\sqrt{3}}{23.75} - \frac{10000/\sqrt{3}}{25}}{0.0256 + 0.0256} \approx 237.4 \text{A}$$

而变压器二次侧的额定电流才 360.8A,因而极大地限制了变压器的带负载能力,也引起了很大的附加损耗。停电检查方发现问题所在。

## 4 结语

短路阻抗标值不相同的变压器并联运行会导致负载分配不均衡,为防止过载,从而降低变压器的带负载能力。并联运行变压器的环流主要是由变压器的变比不等所引起的。变压器绕组的短路阻抗很小,即使变比相差很小,也会产生很大的不平衡电流(环流),较大地限制了变压器的带负载能力,也引起了较大的附加损耗,因而变比差必须小于一定数值。在实际工作中遇到变压器不能完全满足并联运行的条件而需并联运行的情况,则应对负荷分配情况和环流大小进行分行计算,以考查变压器、联络开关等设备运行的安全性、可行性。

## 参考文献

[1] 余浩. 并联变压器的负载分配计算[J]. 沿海企业与科技, 2010(8): 138-141.