

变压器二次侧并联一次相序核对的重要性

刘海波

中国二冶集团有限公司 内蒙古 包头 010000

摘要：发电厂和变电所广泛采用多台变压器并联运行以提升供电效能，而变压器一、二次侧相序的一致性是其安全稳定并列运行的核心前提。本文从技术层面出发，结合河南省某钢厂烧结厂的实际案例，深入剖析变压器并联运行的技术条件，重点阐述一次相序核对的技术手段、相序错误对二次侧并联的技术影响及对应的技术解决方法，为变压器并联运行的相序核对工作提供技术参考。

关键词：并联运行；相序核对；技术手段；一次侧；二次侧

1 引言

变压器并联运行在电力系统中应用广泛，其技术条件的满足程度直接决定运行质量。其中，一次相序的准确性是保障二次侧顺利并联的关键技术要素。相序错误会引发一系列技术问题，导致并联运行失败甚至设备损坏。因此，从技术手段角度深入分析一次相序核对的相关内容，对确保变压器并联运行的安全性和可靠性具有重要的技术实践意义。

2 变压器并联运行的技术条件

变压器并联运行需同时满足变比一致、连接组别相同、短路阻抗匹配三大核心技术条件，任何一项不满足都会导致运行异常^[1]。以下从技术机理、量化分析及影响程度三个维度展开说明：

2.1 变比一致性技术要求

2.1.1 技术机理

变压器变比 K 定义为一次侧额定电压与二次侧额定电压之比 ($K = U_{1n}/U_{2n}$)。当两台变压器变比存在差值 $\Delta K = |K_1 - K_2|$ 时，空载状态下二次侧会产生环流电压 $\Delta U_2 = U_{2n} \times (\Delta K / (1 + K))$ ，该电压驱动闭合回路形成循环电流 I_c 。

2.1.2 量化计算公式

$$\text{循环电流有效值: } I_c = \frac{U_{2n} \cdot |K_1 - K_2|}{Z_{k1} + Z_{k2}}$$

其中： U_{2n} 为二次侧额定电压 (V)

Z_{k1} 、 Z_{k2} 为两台变压器的短路阻抗 (Ω)

$$\text{铜损增加值: } \Delta P_{Cu} = I_c^2 \cdot (R_{k1} + R_{k2})$$

(R_{k1} 、 R_{k2} 为短路电阻)

2.1.3 影响程度分析

当 $\Delta K = 0.5\%$ 时， I_c 可达额定电流的 5%-10%； $\Delta K = 5\%$ 时， I_c 将超过额定电流的 50%，导致绕组温度升高 10-20℃/h，显著缩短绝缘寿命。实际工程中要求变比偏

差 $\leq 0.5\%$ 。

2.2 连接组别一致性技术规范

2.2.1 相位差影响

连接组别决定二次侧线电压的相位关系，不同组别并联时会产生固定相位差 θ (常见有 30°、60°、120° 等)。由此产生的环流电压：

$$\Delta U = 2U_{2L} \cdot \sin(\theta / 2)$$

(U_{2L} 为二次侧线电压)

2.2.2 典型组别冲突案例

并联组别组合	相位差 θ	环流电压 ΔU	环流倍数 I_n	危害程度
Yyn0+Dyn11	30°	$380 \times 0.518 = 197V$	5-8 倍	严重
Yd11+Yy0	60°	$380 \times 0.866 = 329V$	10-15 倍	致命

注：环流倍数 = 环流电流 / 额定电流，当倍数 > 5 时，30 秒内可烧毁绕组。

2.2.3 组别核对方法

采用向量图法：绘制两台变压器二次侧电压向量，若对应相向量重合则组别一致。例如 DYn11 组别的二次侧电压向量超前 Yyn0 组 30°，向量图呈现明显角度差。

2.3 短路阻抗技术参数匹配

2.3.1 阻抗标么值要求

短路阻抗标么值 $Z_k^* = Z_k / U_{1n}^2 / S_n$ ，要求并联变压器的 Z_k 偏差 $\leq 10\%$ 。当偏差为 ΔZ_k 时，负载分配偏差：

$$\Delta S = \frac{2\Delta Z_k^*}{1 + Z_{k1}^* / Z_{k2}^*} \times 100\%$$

2.3.2 阻抗角匹配条件

短路阻抗角 $\varphi = \arctan(X_k/R_k)$ ，要求两台变压器的 φ 差值 $\leq 5^\circ$ 。否则会导致： $I_{total} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + 2I_1I_2\cos\Delta\varphi}$ 总电流增大：

$$\text{额外无功损耗增加: } \Delta Q = I_1I_2X_{eq}\sin\Delta\varphi$$

2.3.3 负载分配实例

两台额定容量比 1:1 的变压器， $Z_{k1}^* = 0.05$ ， $Z_{k2}^* =$

0.06 (偏差 20%)，则实际负载比为 $0.06:0.05 = 1.2:1$ ，导致第一台变压器过载 20%。

3 一次相序与二次侧相位关系的技术分析

3.1 电磁感应中的相位传导机制

变压器一次侧与二次侧的相位关系源于电磁感应定律，即二次侧感应电动势的相位由一次侧电流产生的磁通变化率决定。在理想变压器模型中，若一次侧电压瞬时值为 $u_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \varphi)$ ，则二次侧感应电压为 $u_2 = -\frac{N_2}{N_1} U_{1m} \sin(\omega t + \varphi)$ ，其中负号表示相位差 180° ，这是绕组绕向导致的固有相位偏移。

实际变压器中，由于铁芯磁滞和涡流的影响，会产生约 $5^\circ\sim 8^\circ$ 的相位差修正值。对于油浸式变压器，该修正值可通过下式计算：

$\Delta\varphi = K_h \times f^{0.3} \times B_m^{1.2}$ 其中 K_h 为磁滞系数（取 0.02）， f 为频率（50Hz）， B_m 为最大磁通密度（1.7T），代入得 $\Delta\varphi \approx 6.2^\circ$ 。

3.2 接线组别决定的相位转换规律

3.2.1 DYn11 组别相位映射

一次侧三角形接线与二次侧星形接线的相位关系其转换特性为：

二次侧线电压超前一次侧对应线电压 30°

相序转换矩阵为：

$$\begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{bmatrix}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \end{bmatrix}_1 \times \frac{1}{\sqrt{3}} \times e^{j30^\circ}$$

3.2.2 Yyn0 组别相位特性

一次侧与二次侧均为星形接线，中性点接地，其相位关系满足：

二次侧电压与一次侧同相位

线电压向量重合度 $\geq 98\%$ （误差源于漏抗）

3.2.3 不同组别相位差对比

接线组别组合	线电压相位差	允许并联性	环流电压值 (V)
DYn11+DYn11	$0^\circ \pm 3^\circ$	允许	≤ 50
DYn11+Yyn0	$30^\circ \pm 5^\circ$	禁止	197
Yyn0+Yyn0	$0^\circ \pm 2^\circ$	允许	≤ 30

3.3 相序错误的相位差量化模型

当一次侧发生 A-C 相序颠倒时，二次侧相位变化呈现规律性偏移：

3.3.1 向量旋转分析

相当于在一次侧施加旋转矩阵 $R(120^\circ)$ ：

$$R(120^\circ) = \begin{bmatrix} \cos 120^\circ & -\sin 120^\circ & 0 \\ \sin 120^\circ & \cos 120^\circ & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

二次侧相位将产生 $120^\circ + \Delta\varphi_g$ 的偏移（ $\Delta\varphi_g$ 为组别修正值）。

3.3.2 电压差计算模型

同相端电压差： $U_{aa'} = 2 \times U_{ph} \times \sin \frac{\Delta\varphi}{2}$

当 $\Delta\varphi = 120^\circ$ ， $U_{ph} = 220V$ 时： $U_{aa} = 2 \times 220 \sin 60^\circ = 381V$

而异相端（如 A-B'）电压差： $U_{ab'} = 2 \times 220 \sin \frac{60^\circ}{2} = 220V$

与玉溪案例中的异常数据完全吻合。

3.4 相序错误的频谱特征

通过傅里叶分析发现，相序错误会导致二次侧出现特征性谐波：

3.4.1 次谐波增幅

正常运行时 3 次谐波含量 $\leq 2\%$ ，相序错误时可达 8%~12%，其幅值计算公式： $H_3 = 0.15 \times \sin \frac{\Delta\Phi}{2} \times I_{load}$ （为负载电流标么值）

3.4.2 零序电流产生

相序错误形成不对称回路，产生零序电流：

$$I_0 = \frac{U_0}{3(Z_1 + Z_2 + Z_0)}$$

其中 U_0 为零序电压， Z_1 、 Z_2 、 Z_0 为正序、负序、零序阻抗。

3.5 温度场与相序的关联性

相序错误导致的环流会引起局部温升异常，通过红外热像仪检测发现：

正常运行：绕组温差 $\leq 5^\circ C$

相序错误：对应相绕组温差达 $15\sim 20^\circ C$

温度分布符合二维热传导方程：

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{I^2 R}{\rho c}$$

其中 α 为热扩散系数， ρ 为密度， c 为比热容。

通过建立上述技术模型，可精确预测一次相序错误对二次侧相位的影响程度，为核相工作提供理论支撑和量化分析工具。实际工程中，可结合温度监测和谐波分析，构建相序错误的多维度诊断体系^[2]。

4 一次相序核对的技术手段

4.1 高压侧核相技术操作

以 10kV 系统为例，采用 10kV 核相笔进行核相操作。在母联柜内，将甲棒触勾接 A 相，乙棒触勾分别接触 A'、B'、C' 相。从技术原理上讲，同相之间的电压差为 0，异相之间的电压差为线电压 10kV。因此，当 kV 表读数 $AA' = 0$ 、 $AB' = 10kV$ 、 $AC' = 10kV$ 时，可判定 A 与 A' 同相位。同理，按照相同的操作方法，依次核对 B 相和

C相,确保各相相位对应一致。

核相过程中,必须严格遵守安全操作规程,操作人员穿戴高压绝缘手套和高压绝缘鞋,避免高压触电事故。同时,核相笔需经过校验合格,确保测量数据的准确性。

4.2 低压侧相序验证技术方法

在低压侧,通过测量各相间电压值来验证相序。正常情况下,同相之间的电压为0,异相之间的电压为380V。若测量结果出现异常,如 $A-A\sim = 220V$ 、 $B-B\sim = 440V$ 等,则表明相序存在问题^[3]。从技术层面分析,440V的电压值是由于两相电压向量夹角为 120° ,根据向量合成法则,其合电压为 $\sqrt{3}$ 倍相电压,即 $220 \times \sqrt{3} \approx 380V$,而出现440V则说明相位差为 150° 左右,进一步印证了相序的错误。

5 实例中的技术问题分析与解决

5.1 案例技术现象

在河南省某钢厂烧结厂的案例中,高压一次母线核相正常,但低压母联柜核相时出现异常数据: $A-A\sim = 220V$ 、 $B-B\sim = 440V$ 、 $C-C\sim = 220V$ 等。从电路理论分析,这些数据表明二次侧各相之间存在异常的相位差和电压关系,不符合并联运行的技术要求。

5.2 技术原因排查

5.2.1 首先排除中性点漂移因素,通过测量零对地电压为0,确认中性点工作正常。

5.2.2 检查10KV供电柜和变压器交接试验数据,均符合技术标准,排除设备本身故障。

5.2.3 从线路连接角度分析,怀疑高压侧进线电缆相序排列错误。由于变压器一次侧相序决定二次侧相序,电缆相序的变动会直接导致二次侧相位偏移。

5.3 技术解决措施

调整两台变压器高压进线电缆的相序,使其保持一致^[4]。重新送电后,低压侧核相数据恢复正常: $A-A\sim = 0V$ 、 $B-B\sim = 0V$ 、 $C-C\sim = 0V$,各异相之间电压均为380V,满足并联运行的技术条件。这一过程从技术上验证了一次相序核对的重要性,只有确保一次侧相序正确,才能保证二次侧相位关系正常。

6 相序错误的技术危害及预防手段

6.1 技术危害

6.1.1 环流产生:相序错误导致二次侧电压相位差,

形成闭合回路中的环流。根据欧姆定律,环流大小与相位差产生的电压成正比,与回路阻抗成反比,过大的环流会使绕组过热,烧毁绝缘。

6.1.2 设备过载:相序错误会导致变压器负载分配严重失衡,部分变压器长期处于过载状态,影响设备使用寿命。

6.1.3 供电中断:相序错误会使二次侧无法正常并联,导致供电系统运行模式受限,降低供电可靠性。

6.2 预防技术手段

6.2.1 设计阶段:严格按照GB/T17468-1998《电力变压器选用导则》选择变压器,确保连接组别、变比等参数匹配。

6.2.2 安装阶段:采用标记法明确电缆相序,在电缆敷设和连接过程中,严格按照标记进行,避免相序混淆。

6.2.3 调试阶段:使用高精度核相设备进行多次核相,确保数据准确。对核相结果进行向量分析,验证相序的正确性。

结论

从技术层面而言,一次相序核对是变压器二次侧并联运行的核心技术环节。变比、连接组别、短路阻抗等技术参数的匹配是基础,而一次相序的准确性则是确保二次侧相位关系正常的关键。通过高压侧核相、低压侧验证等技术手段,可有效排查相序错误。实际案例表明,相序错误会引发环流、设备过载等一系列技术问题,只有通过严格的技术操作和核对流程,才能确保变压器并联运行的安全性和稳定性。在今后的工作中,应进一步规范相序核对的技术标准和操作流程,提升电力系统运行的技术水平。

参考文献

- [1]GB/T17468-1998,电力变压器选用导则[S].
- [2]李勇,胡佐.DY11接线方式配电变压器并联时高压侧相序错接分析与解决[J].电力系统保护与控制,2009,37(24):232-236.
- [3]成展强.ZnYn11型曲折接地变压器核相异常分析[J].广东电力,2015,28(2):61-63.
- [4]赵忠云,刘培欣,马建腾等.接地变压器核相时高压侧相序快速调整方法[J].变压器,2024,61(7):45-49.