

三相不平衡负荷的无功补偿问题研究

唐 杰，袁丁镇

(泰州供电公司，江苏 泰州 225300)

摘 要：本文结合戴南地区电弧炉负荷较多的情况出发，论述了由此造成了三相不平衡问题，从而从一般意义上提出了三相不平衡的来源和危害，论证了为了节能降耗应该在实施无功补偿时考虑负荷特征，从而解决三相不平衡时的无功补偿问题。然后详细说明了在无功补偿时应该从信号处理方面考虑的内容，以及详尽的计算了所需的补偿量和应采用的电路结构，另外也讲述了控制的措施，从而解决该负荷的无功补偿问题。

关键词：电弧炉；无功倒送；三相不平衡；TSR；分相补偿

1 电弧炉负荷引起三相不平衡问题和带来的危害

1.1 电弧炉运行特点

戴南地区的不锈钢制造企业较多，此类企业中电弧炉的运行周期包括三个阶段：熔化期、氧化期和还原期，其中熔化期对电能质量影响最大。这和它得工作流程有关，电弧炉在熔化期运行时，电弧燃烧的环境总在变化，并且取决于瞬时电弧炉熔炼条件、燃料稠度、表面粗糙度、环境温度以及炼钢工的操作技能等。电弧离子化和长度也都在变化，特别是电弧炉运行时电弧电压高，电弧相对长，因此燃烧很不稳定。熔化期开始时，电弧向大块炉料喷火，如果材料表面粗糙（例如熔化废铁），电弧点会根据最优燃烧条件，从炉料的一个末梢或尖峰向另一个末梢或尖峰不停“跳跃”。废料的下落会使负荷状态剧烈变化，从电气角度看，它在空载和短路间变化，从而会产生巨大的短路电流，而且弧长强烈变化，这会造成供电系统电压极不规则的波动。

1.2 三相不平衡产生原因

由此造成了电压波动和闪变，也导致了三相不平衡问题比较突出，电弧炉工作时无功功率引起电流和电压的相移，电弧伏安特性的非线性引起电流和电压波形畸变，融化期的三相负荷不平衡引起的负序分量以及负荷的波动引起电网电压和功率因数降低。这属于用电环节的不平衡，三相负荷不对称是系统三相不平衡的最主要因素。产生三相不对称的主要原因是单相大容量负荷（如电气化铁路、电弧炉和电焊机等）在三相系统中的容量和电气位置分布不合理。电力系统是由发电、输电、配电和

用电各个环节组成的统一整体。其中发电、输电和配电又称为供电环节。用电环节的不平衡也导致了供电环节的不平衡。从现场实际测出的数据来看，其各种电压等级的不平衡度超标 10 倍左右。可以看出此类负荷对电网的影响是实实在在的。

1.3 三相不平衡带来的危害

系统处于三相不平衡运行时，其电压、电流中含有大量的负序分量。由于负序分量的存在，可能导致一些作用于负序电流的保护和自动装置误动作，威胁电网安全运行；同时由于零序和负序电流的存在，线路和变压器铜损都会增大，流入变压器的零序电流完全是激磁电流，导致变压器铁芯和附件发热，从而产生铁损。另外，三相不平衡也会造成中性点电位偏移，影响电动机等用电设备正常、安全运行，以及影响电能表的计量精度。下面我们用简化后的模型来看看由于三相不平衡所引起的损耗。

设系统三相线路及变压器绕组的总电阻为 R ，如果三相电流平衡： $I_A=100A$ ， $I_B=100A$ ， $I_C=100A$ ，则总铜损= $100^2R+100^2R+100^2R=30000R$ ；如果三相电流不平衡： $I_A=50A$ ， $I_B=100A$ ， $I_C=150A$ ，则总铜损= $50^2R+100^2R+150^2R=35000R$ ，铜损增加了 17%。从这个例子可以得出在要求节能降耗的大背景下，必须重视电弧炉负荷的影响和带来的危害，在考虑无功补偿方案时应该针对具体负荷采取具体措施。

改善三相不平衡可以采取将不对称负荷合理分布于三相中，使各相负荷尽可能平衡；也可以采取不对称负荷分散接于不同的供电点，减少集中连接造成的不平衡度过大；或者将不对称负荷接入高一电压等级供电；或者将不对称负荷采用单独的变压

器供电；或者采用特殊接线的平衡变压器供电；当然还可以采用加装三相不平衡补偿装置来。当三相不平衡的时候，有时会发生某相或某两相无功倒送问题，而无功倒送会增加线路和变压器损耗，加重线路供电负担。为防三相不平衡无功倒送，应该采取适当的装置来控制检测、计算三相无功投切。由于固定补偿部分容量过大，容易出现无功倒送，目前多数场合均采用动态补偿的。

2 解决办法

2.1 信号处理

为了解决三相不平衡问题，信号处理是一个前提，必须熟悉数据的采集和数据的分析，根据公式

$$I(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (A_k \cos kt + B_k \sin kt), \quad \text{由傅立叶级数}$$

知道，一个周期函数的谐波分量是无限多的，所取的谐波分量越多，叠加起来越接近于原函数的波形，但工作量越大，在实际中往往是不必要的。因谐波振幅具有收敛性，其主要成份集中在低频分量中。这里取的电压信号 $V(t)$ 、电流信号 $I(t)$ 采样前经过低通滤波电路滤波，6 次以上谐波分量很小可以忽略不计，即仅计 $V(t)$ 、 $I(t)$ 信号中最高次谐波分量为 6 次的谐波。

最高次谐波频率为 $f_{\max} = 6 \times 50 \text{Hz} = 300 \text{Hz}$ 。如果对 $V(t)$ 、 $I(t)$ 信号进行定时采样，在一个周期内 (20ms) 采样 $V(t)$ 、 $I(t)$ 信号各 12 点，采样周期 $\Delta T = (20/12) \text{ms} = 1.667 \text{ms}$ ，即每隔 ΔT 对 $V(t)$ 、 $I(t)$ 信号采样一次。在一个周期内对 $V(t)$ 、 $I(t)$ 的采样值为 V_0 、 $V_1 \dots V_{11}$ 及 I_0 、 $I_1 \dots I_{11}$ 。采样频率

$f = 12 \times 50 \text{Hz} = 600 \text{Hz}$ ，所以采样频率 $f = 2f_{\max}$ ，满足奈奎斯特采样定理，以此为基础的“12 点傅氏算法”完全可以几乎无畸变地啮合原来的信号 $V(t)$ 、 $I(t)$ 。

设电压信号 $V(t)$ 以向量形式表示为

$\dot{V} = V_r + jV_x$ ，电流信号 $I(t)$ 以向量形式表示为

$\dot{I} = I_r + jI_x$ ，则 $V(t)$ 、 $I(t)$ 如下：

$$\dot{V} = V_r + jV_x = \frac{1}{6} \times \sum_{k=0}^{11} V_k e^{jk\frac{\pi}{6}};$$

$$\dot{I} = I_r + jI_x = \frac{1}{6} \times \sum_{k=0}^{11} I_k e^{jk\frac{\pi}{6}}$$

其中：

$$V_r = \frac{1}{6} [(V_3 - V_9) + \frac{\sqrt{3}}{2} (V_2 + V_4 - V_8 - V_{10}) + \frac{1}{2} (V_1 + V_5 - V_7 - V_{11})]$$

$$V_x = \frac{1}{6} [(V_0 - V_6) + \frac{\sqrt{3}}{2} (V_1 - V_5 - V_7 + V_{11}) + \frac{1}{2} (V_2 - V_4 - V_8 + V_{10})]$$

$$I_r = \frac{1}{6} [(I_3 - I_9) + \frac{\sqrt{3}}{2} (I_2 + I_4 - I_8 - I_{10}) + \frac{1}{2} (I_1 + I_5 - I_7 - I_{11})]$$

$$I_x = \frac{1}{6} [(I_0 - I_6) + \frac{\sqrt{3}}{2} (I_1 - I_5 - I_7 + I_{11}) + \frac{1}{2} (I_2 - I_4 - I_8 + I_{10})]$$

2.2 补偿量的分析

应该看到用电压做投切控制量对电力系统不可取。虽然电压波动主要是无功变化引起的，但线路电压水平则是系统情况决定的。当电压偏高或偏低时，按电压控制与实际无功需求相差甚远，会出现无功过补或欠补。从降损角度，取无功功率和所需补偿的容抗值为控制量是最佳控制方式。

于是得到：

$$V_a = V_{ar} + jV_{ax} \quad ; \quad V_b = V_{br} + jV_{bx} \quad ;$$

$$V_c = V_{cr} + jV_{cx} \quad ; \quad I_a = I_{ar} + jI_{ax} \quad ; \quad I_b = I_{br} + jI_{bx} \quad ;$$

$$I_c = I_{cr} + jI_{cx}$$

$$\text{则可得：} \quad Z_a = R_a + jX_a \quad ; \quad Z_b = R_b + jX_b \quad ;$$

$$Z_c = R_c + jX_c$$

其中：

$$R_a = (V_{ar} \times I_{ar} + V_{ax} \times I_{ax}) \div (I_{ar}^2 + I_{ax}^2) \quad ;$$

$$X_a = (V_{ax} \times I_{ar} - V_{ar} \times I_{ax}) \div (I_{ar}^2 + I_{ax}^2) \quad ;$$

$$R_b = (V_{br} \times I_{br} + V_{bx} \times I_{bx}) \div (I_{br}^2 + I_{bx}^2) \quad ;$$

$$X_b = (V_{bx} \times I_{br} - V_{br} \times I_{bx}) \div (I_{br}^2 + I_{bx}^2) \quad ;$$

$$R_c = (V_{cr} \times I_{cr} + V_{cx} \times I_{cx}) \div (I_{cr}^2 + I_{cx}^2) \quad ;$$

$$X_c = (V_{cx} \times I_{cr} - V_{cr} \times I_{cx}) \div (I_{cr}^2 + I_{cx}^2)$$

于是利用星形和三角形变换得到对应的三角形的数据:

$$Z_{ab} = R_{ab} + jX_{ab} ; \quad Z_{bc} = R_{bc} + jX_{bc} ;$$

$$Z_{ca} = R_{ca} + jX_{ca} ;$$

其中:

$$R_{ab} = R_a + R_b + (R_c(R_a R_b - X_a X_b) + X_c(X_a R_b + R_a X_b)) / (R_c^2 + X_c^2)$$

$$X_{ab} = X_a + X_b + (R_c(X_a R_b + R_a X_b) - X_c(R_a R_b - X_a X_b)) / (R_c^2 + X_c^2)$$

$$R_{bc} = R_b + R_c + (R_a(R_b R_c - X_b X_c) + X_a(X_b R_c + R_b X_c)) / (R_a^2 + X_a^2)$$

$$X_{bc} = X_b + X_c + (R_a(X_b R_c + R_b X_c) - X_a(R_b R_c - X_b X_c)) / (R_a^2 + X_a^2)$$

$$R_{ca} = R_c + R_a + (R_b(R_c R_a - X_c X_a) + X_b(X_c R_a + R_c X_a)) / (R_c^2 + X_c^2)$$

$$X_{ca} = X_c + X_a + (R_b(X_c R_a + R_c X_a) - X_b(R_c R_a - X_c X_a)) / (R_b^2 + X_b^2)$$

则得到:

$$Y_{ab} = G_{ab} + jB_{ab} ; \quad Y_{bc} = G_{bc} + jB_{bc} ;$$

$$Y_{ca} = G_{ca} + jB_{ca}$$

其中:

$$G_{ab} = R_{ab} / (R_{ab}^2 + X_{ab}^2) ;$$

$$B_{ab} = -X_{ab} / (R_{ab}^2 + X_{ab}^2) ;$$

$$G_{bc} = R_{bc} / (R_{bc}^2 + X_{bc}^2) ;$$

$$B_{bc} = -X_{bc} / (R_{bc}^2 + X_{bc}^2) ;$$

$$G_{ca} = R_{ca} / (R_{ca}^2 + X_{ca}^2) ;$$

$$B_{ca} = -X_{ca} / (R_{ca}^2 + X_{ca}^2)$$

最终得到各相需要补偿的量为:

$$B_{ab}^r = -B_{ab} + (G_{ca} - G_{bc}) / \sqrt{3} ;$$

$$B_{bc}^r = -B_{bc} + (G_{ab} - G_{ca}) / \sqrt{3} ;$$

$$B_{ca}^r = -B_{ca} + (G_{bc} - G_{ab}) / \sqrt{3} ;$$

2.3 补偿方案

在考虑补偿方案时, 首先应该根据实际需要和管理要求。目前兴化戴南张郭地区有很多不锈钢企业有 35kV 和 10kV 用户变, 根据实际需要, 应该要求在用户变安装此特殊的解决三相不平衡的无功补偿装置, 如果补偿容量不足, 这些都影响全网(线路)降损节能和电压质量改善效果。按照农村电网建设与改造技术文件中指出 100 kVA 及以上用户功率因数在 0.9 以上, 补偿容量按台变容量 10%~15% 配置, 这里主要考虑防过补比较保守, 而实践表明在兴化地区动补应在 20%~30% 内。

三相不平衡会出现系统损耗增大等问题, 应考虑采用分相补偿。但一般控制器分相控制效果值得考虑, 必须在控制方法(算法)和分组容量(接线)综合考虑, 一般算法难有效解决问题。分相补偿关键技术在控制器的模糊控制算法, 及不等容量分组补偿箱设计方法。技术实现方法实质是计算各相无功缺额, 投入选中的对应电容器, 而不是采用固定的投切控制规则。接触器控制或晶闸管控制各有优缺点, 晶闸管功损和发热大, 使用散热器和风扇散热, 体积大也影响装置可靠性。因此, 采用机电一体化开关控制是最科学、最合理的解决方法和措施。对响应速度要求非常高(冲击负荷)场合, 满足补偿要求需要采用晶闸管投切电容器补偿。由于不用散热器、风扇、熔断器设备, 机电一体开关控制与晶闸管控制经济性要低一些。这里采用的补偿结构如图 1 所示, 即采用双三角形电容补偿加上 TSR, 利用晶体管触发角控制无功的补偿。

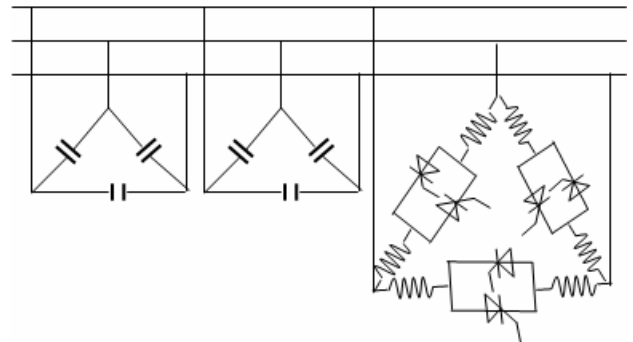


图 1 控制结构图

下面很重要的一个方面就是控制角度的求取, 如下所示。首先定义一个 ang[360] 整型数组, 利用循环, 得到

```
int n=1;
```

```
while n<=360
ang[n]=n*pi/180-sin(n*pi/180);
n=n+1;
end
```

这样就得到了一个 $\pi[360]$ 的数组，此数组作用为存储各度数对应于角度的数值。

$$B_{ab}^l = B_{ab}^r - K_{ab}wc; \quad B_{bc}^l = B_{bc}^r - K_{bc}wc;$$

$$B_{ca}^l = B_{ca}^r - K_{ca}wc;$$

其中 K_{ab} 、 K_{bc} 、 K_{ca} 分别表示两组电容器投入的数目，其值有三个，可为 0、1、2。根据 TSC 的补偿容量公式： $B^l = (\theta - \sin \theta) / \pi X_l$ ，则得到：

$$\theta_{ab} - \sin \theta_{ab} = B_{ab}^l \times \pi wL;$$

$$\theta_{bc} - \sin \theta_{bc} = B_{bc}^l \times \pi wL;$$

$$\theta_{ca} - \sin \theta_{ca} = B_{ca}^l \times \pi wL。$$

$$\text{令 } A = B_{ab}^l \times \pi wL; \quad B = B_{bc}^l \times \pi wL;$$

$$C = B_{ca}^l \times \pi wL; \text{ 然后比较这三个数和 } \text{ang}[n] \text{ 的数}$$

值相差最小的，于是就得到控制角为 $n/180$ 。于是利用硬件电路立刻控制 TSR。

3 结束语

这里主要阐述了电弧炉负荷的特性，以及由此引起三相不平衡的影响和危害，提出了在戴南地区考虑无功补偿时应该解决电弧炉企业所带来的三相不平衡问题。然后说明了在无功补偿时从信号处理等、补偿量、控制措施等几个方面来说明解决三相不平衡的无功补偿问题。在很多文章中缺少一个详细的可用于实际产品开发的理论计算过程，这篇文章则从详细论述了这个问题，关于相关的产品研发可根据此文采取相应的控制策略。

作者简介：

唐 杰（1984—），主要从事变电站综合自动化及电网运行等相关方面的研究；

袁丁镇（1985—），主要从事变电站综合自动化及电网运行等相关方面的研究。