

# 三相不平衡系统相序、无功、功率因数测量与负荷监测分析

## Phase Sequence, Reactive Power, Power Factor Measurement and Load Monitoring Analysis of Three-phase Unbalanced System

姚伟 刘彦彦 帕提合努尔·叶列解甫

Wei Yao Yanyan Liu Patihenuer Yeliejiefu

伊犁职业技术学院机电化工学院 中国·新疆 伊宁 835000

College of Mechanical and Electrical Engineering, Yili Vocational and Technical College, Yining, Xinjiang, 835000, China

**摘要:** 搞清楚三相不平衡系统的三相相序、三相无功、三相功率因数是治理三相负荷不平衡的前提。通过对三相负荷的实时监测与分析,就可以驱动控制系统对三相负荷不平衡做出实时动态调整,以达到三相负荷平衡状态。论文基于实验与算法分析,建立对三相不平衡系统相序、无功、功率因数的测量与负荷监测,为低压电力统计量与三相不平衡治理提供理论参考。

**Abstract:** Understanding the three-phase sequence, three-phase reactive power and three-phase power factor of the three-phase unbalanced system is the premise of controlling the three-phase load imbalance. Through the real-time monitoring and analysis of the three-phase load, the control system can be driven to make real-time dynamic adjustment to the three-phase load imbalance to achieve the three-phase load balance state. Based on the experiment and algorithm analysis, this paper establishes the measurement and load monitoring of phase sequence, reactive power and power factor of three-phase unbalanced system, which provides theoretical reference for the measurement of low-voltage power system and the treatment of three-phase imbalance.

**关键词:** 三相相序; 三相无功; 三相功率因数; 三相负荷不平衡; 负荷监测

**Keywords:** phase-sequence; three-phase reactive power; three-phase power factor; three-phase load unbalance; load monitoring

**基金项目:** 新疆科技厅自然科学基金青年科学基金项目(项目编号:2022D01B64);伊犁职业技术学院科研计划项目(项目编号:zyxym2022016)。

**DOI:** 10.12346/peti.v4i4.6960

## 1 引言

三相不平衡系统<sup>[1]</sup>是指A相、B相、C相的负载不对称或者负荷不相等而产生的三相中的一相电压高、一相电压低或者一相电流高、一相电流低,抑或者一相功率高、一相功率低的情形,导致中心点偏移,中性点电流不为零。为了分析三相不对称系统,常把三相的不对称分量分解成对称分量(正、负序)及同向的零序分量。正序:A相、B相、C相互为 $120^\circ$ ,按照顺时针排序。负序:A相、B相、C相互为 $120^\circ$ ,按照逆时针排序。零序:A、B、C三相相位

相同。由于容性或感性负荷接入到了单相用电系统会导致无功功率的产生,由于单相用户用电的不确定性又会导致三相功率因数不对称,从而导致电能浪费。因此需要对三相负荷做实时监测,通过动态调整来实现三相负荷平衡。

论文基于上述因素问题,要研究得到三相不平衡系统相序、无功、功率因数测量与负荷监测分析的方法,为三相不平衡研究做出理论分析奠基。

## 2 三相相序检测分析

三相相序,如图1规定。

【作者简介】姚伟(1988-),男,硕士,讲师,从事信号检测与自动控制、电力系统保护与控制研究。

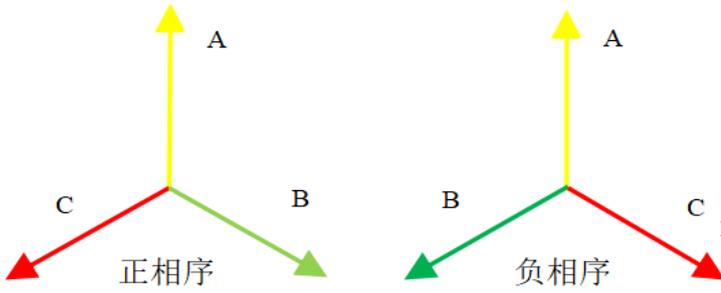


图1 正相序、负相序矢量图

设三相电源输入信号为:

$$A_t = U_m \cos \omega t = \text{Re}(U_m e^{j\omega t})$$

$$B_t = U_m \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) = \text{Re}(U_m e^{j\omega t - \frac{2}{3}\pi})$$

$$C_t = U_m \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) = \text{Re}(U_m e^{j\omega t + \frac{2}{3}\pi})$$

①若 a、b、c 正序,  $V_m$  为信号幅值,  $a_t$ 、 $b_t$ 、 $c_t$  为三相信号源的瞬时值<sup>[2]</sup>, 则:

$$a_t = V_m \cos(\omega t - \varphi) = \text{Re}(V_m e^{j\omega t - \varphi})$$

$$b_t = V_m \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi) = \text{Re}(V_m e^{j\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi})$$

$$c_t = V_m \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi) = \text{Re}(V_m e^{j\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi})$$

构造函数:  $F(t, \varphi) = (A_t, B_t, C_t)(a_t, b_t, c_t)^T$ , 对其求微分:

$$\frac{\partial F(t, \varphi)}{\partial t} = \omega U_m V_m \text{Re}[j(e^{j(2\omega t - \varphi)}) + (e^{j(2\omega t - \frac{4}{3}\pi - \varphi)}) + (e^{j(2\omega t + \frac{4}{3}\pi - \varphi)})] = 0$$

说明实际电源相序与假设相序一致。

②若 a、c 相互换, b 接 B 则, 构造函数:  $F_1(t, \varphi) = (A_t,$

$B_t, C_t)(c_t, b_t, a_t)^T$ , 对其求微分:

$$\frac{\partial F_1(t, \varphi)}{\partial t} = \omega U_m V_m \text{Re}[j(e^{j(2\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi)}) + (e^{j(2\omega t - \frac{4}{3}\pi - \varphi)}) + (e^{j(2\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi)})] \neq 0$$

$$(2\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi \neq k\pi)$$

③若 b、c 相互换, a 接 A 则, 构造函数:  $F_2(t, \varphi) = (A_t, B_t, C_t)(a_t, c_t, b_t)^T$ , 对其求微分:

$$\frac{\partial F_2(t, \varphi)}{\partial t} = \omega U_m V_m \text{Re}[j(e^{j(2\omega t - \varphi)}) + (e^{j(2\omega t - \varphi)}) + (e^{j(2\omega t - \varphi)})] \neq 0$$

$$(2\omega t - \varphi \neq k\pi + \frac{\pi}{2})$$

④若 a、b 相互换, c 接 C 则, 构造函数:  $F_3(t, \varphi) = (A_t, B_t, C_t)(b_t, a_t, c_t)^T$ , 对其求微分:

$$\frac{\partial F_3(t, \varphi)}{\partial t} = \omega U_m V_m \text{Re}[j(e^{j(2\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi)}) + (e^{j(2\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi)}) + (e^{j(2\omega t + \frac{4}{3}\pi - \varphi)})] \neq 0$$

$$(2\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi \neq k\pi)$$

对上述函数离散化:  $\Delta F(t, \varphi) = 0$ , 即  $F(tk+1, \varphi) = F(tk, \varphi)$ , 则相序一致。

优化算法: 若  $\sum_{k=1}^N F(t_{k+1}, \varphi) = \sum_{k=1}^N F(t_k, \varphi)$ , 则三相相序一致, 其算法流程如图 2 所示。

### 3 三相变压器无功功率的测量

三相变压器无功功率的测量<sup>[3]</sup>可用一表法、两表法和三表法测量。其中一表法对三相电源电压和负载都对称比较适用, 两表法比较适用于三相电源电压对称和负载不对称时, 三表法测功率比较适用于三相电源对称的三相三线制和三相四线制的电力系统。

#### 3.1 三表法测三相变压器的无功功率

其接线如图 3 所示。

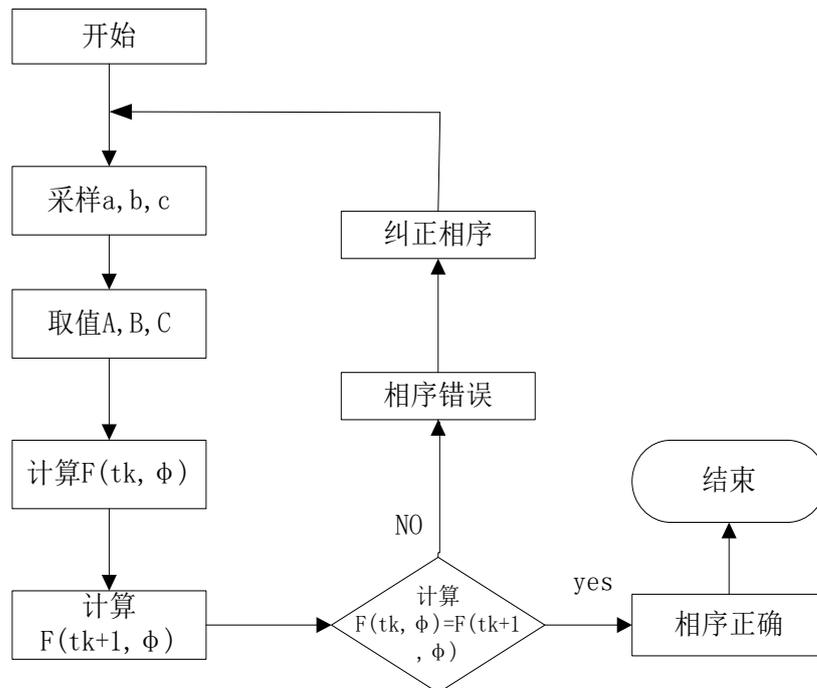


图2 三相相序检测算法流程图

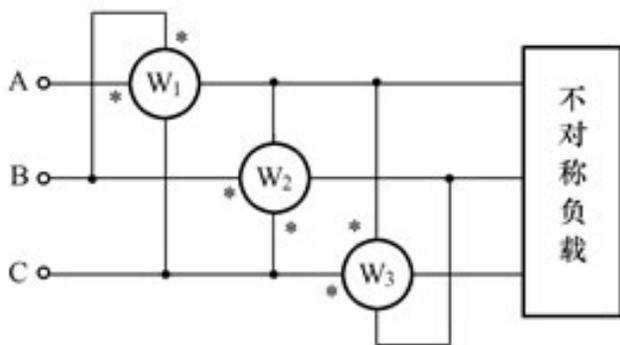


图 3 三表法测三相变压器无功功率

三只功率表的读数  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  也各不相同，它们分别为：

$$P_1 = U_{BC} I_A \cos(90^\circ - \varphi_A) = \sqrt{3} U_A I_A \sin \varphi_A$$

$$P_2 = U_{CA} I_B \cos(90^\circ - \varphi_B) = \sqrt{3} U_B I_B \sin \varphi_B$$

$$P_3 = U_{AB} I_C \cos(90^\circ - \varphi_C) = \sqrt{3} U_C I_C \sin \varphi_C$$

式中，由于电源电压对称，所以有  $U_{BC} = \sqrt{3} U_A$ ，

$$U_{CA} = \sqrt{3} U_B, U_{AB} = \sqrt{3} U_C。$$

三只功率表读数之和为：

$$P_1 + P_2 + P_3 = \sqrt{3} (U_A I_A \sin \varphi_A + U_B I_B \sin \varphi_B + U_C I_C \sin \varphi_C) = \sqrt{3} Q$$

$$\text{则三相无功功率为：} Q = \frac{1}{\sqrt{3}} (P_1 + P_2 + P_3)。$$

### 3.2 两表法测三相变压器的无功功率

假如三相线路是对称的，即  $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA}$ ， $I_A = I_B = I_C = I$ 。

实验时以共 B 接法，则两表功率之差为：

$$P = P_1 - P_2 = UI \cos(30^\circ - \varphi) + UI \cos(30^\circ + \varphi) = \sqrt{3} UI \sin \varphi = \sqrt{3} Q$$

$$\text{则三相无功功率为：} Q = \frac{1}{\sqrt{3}} (P_1 - P_2) = \frac{57}{1.73} = 33W。$$

### 3.3 一表法测三相变压器的无功功率

当三相变压器一次侧电压 (Volt) 和二次侧负载 (Load) 都对称时，可用一瓦特表按图 4 联接来测无功功率。向量图如图 5 所示。

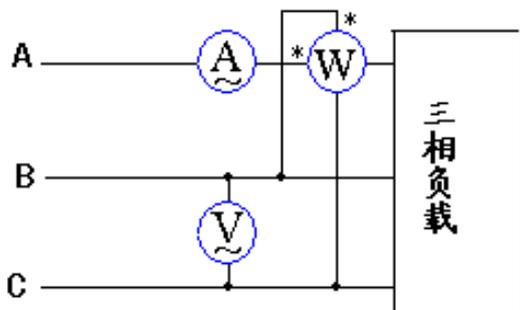


图 4 三相对称负载无功功率测量

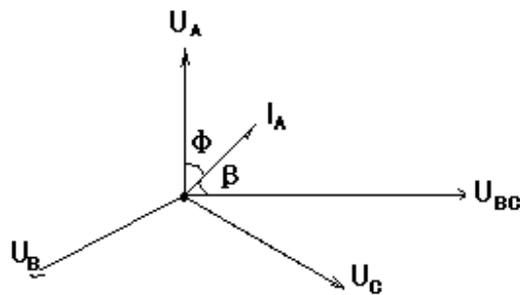


图 5 相量图

由图 5 可知  $U_{BC}$  与  $U_A$  的相位差为  $90^\circ$ ，则有  $\cos \beta = \sin \Phi$ 。若变压器三相线路参数对称，则变压器三相负载总无功功率为： $Q = \sqrt{3} U_L I_L \sin \varphi$ ，而有功功率  $W = U_L I_L \sin \varphi$  则  $Q = \sqrt{3} W$ 。可以看出，只需将一只功率表的读数乘以  $\sqrt{3}$  倍即为对称负载的三相无功功率。必须注意：测量过程必须注意电源的相序<sup>[4-5]</sup>，以及各元件插头、插口的极性。若测 A 相电流  $I_A$ ，电压须测  $U_{BC}$ ；若测 B 相  $I_B$ ，电压须测  $U_{CA}$ ；若测 C 相电流  $I_C$ ，电压须测  $U_{AB}$ 。

## 4 负载的功率因数的测定

已知变压器负载的有功功率  $P = UI \cos \varphi$ ，其中  $\cos \varphi$  为功率因数， $\varphi = \arctan \frac{X_L - X_C}{R}$ ，且  $-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ 。当  $X_L > X_C$ ， $\varphi > 0$ ， $\cos \varphi > 0$  为感性负载；当  $X_L < X_C$ ， $\varphi < 0$ ， $\cos \varphi > 0$  为容性负载；当  $X_L = X_C$ ， $\varphi = 0$ ， $\cos \varphi = 1$  为电阻性负载。用功率因数表测量负载功率因数的原理如图 6 所示。

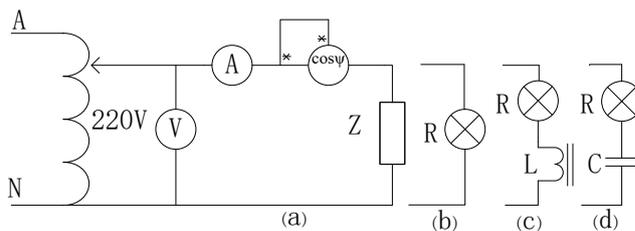


图 6 负载功率因数的测定

①按图 6 接线，实验时分别取阻抗  $Z_1$  为 220 V、40 W 白炽灯 (阻性条件)， $Z_2$  为 220 V、2000 W 热吹风机 (感性条件) 和  $Z_3$  由 220 V、40 W 白炽灯和  $4.7 \mu F$  电容串联组成 (容性条件) 如图 6 (b) (c) (d) 所示，实验测量数据见表 1。

表 1 变压器负载功率因数的测定数据

负载情况	$U$ (V)	$I$ (A)	$P$ (W)	$\cos \varphi$	负载性质
电阻	218.7	0.18	39	1	阻性
感性负载	220.3	0.19	29	0.73	感性
容性负载	221	0.177	38	0.9	容性

②根据表 1 测量的数据可知，阻性条件下电流做的功全部用在了负载的有功损耗。感性负载条件下电流做的功，一

部分被无功分量所消耗。容性负载时，变压器输出功率几乎全部用在了负载的有功损耗，因此可以使用容性负载对三相负荷不平衡进行功率因数的补偿以实现变压器的经济安全运行。

## 5 三相负荷的监测

将相应监测装置安装和固定于低压电力系统用户用电端，装置会利用 A/D 模块，将电压、电流、功率等电力负荷数据转换为相应的电信号，并将其传给单片机控制系统，由内部算法将这些电信号转换为电压有效值、电流有效值，并存储于系统内部，并利用编程算法实现自动对电力负荷数据的精确计算，并将最终的计算结果转化为相应的电力负荷特性值<sup>[6]</sup>。单片机根据电力负荷特性值对执行模块做出相应调配<sup>[7]</sup>，其控制系统如图 7 所示。

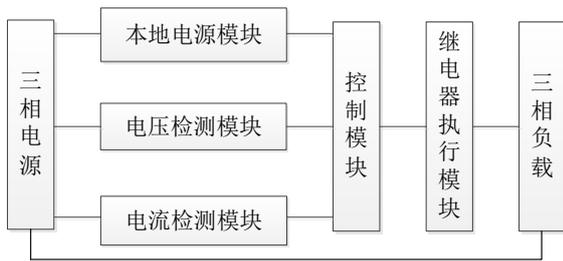


图 7 三相负荷的监测控制系统

## 6 结论

根据低压用电系统三相负荷接入三相电的相序构造函数，建立了三相相序的检测算法。用仪器仪表测算的方法给出了三相无功功率的准确检测实验方法。分别基于阻性、感性、容性负荷做三相不平衡的带载实验，给出了功率因数的测定，得到不同负载性质的功率因数。为了实现对三相负荷的电力参数实时检测，建立了基于单片机控制的三相负荷的监测控制系统。论文的研究结果，可为低压用电系统三相不平衡的治理提供基础性参考。

## 参考文献

- [1] 姚伟,曹俊,张玉良.一种带正序、负序、逆序显示功能的三相相序检测电路[J].通信电源技术,2015(3):64-66.
- [2] 黄增秀.正负序电压的计算与测量[J].机床电器,1998(1):11-12.
- [3] 马宏忠.电机学[M].北京:高等教育出版社,2009.
- [4] 常建刚,王秀荣.检测三相电源相序的简单方法及原理[J].机床电器,1998(1):10-11.
- [5] 赵勇,余新平.三相电源相序检测电路的设计[J].长江大学学报,2013(10):77-79.
- [6] 崔伟,康伟,郭成光,等.智能电网的非侵入式负荷监测系统设计[J].粘接,2022(6):182-185+190.
- [7] 姚伟,等.三相不平衡度监测装置、变压器及低压配电系统[P].中国:201920641938.X,2019.