

## 有功功率测量误差分析

吴舒萍<sup>1</sup>, 黄兴平<sup>2</sup>, 许建安<sup>1</sup>

(1. 福建水利电力职业技术学院 福建 永安 366000; 2. 厦门大学 机电系 福建 厦门 361000)

摘要: 用对称分量分析了三序功率与三相功率间的关系, 得出三相功率是同一相序的电压与电流的对称分量函数; 三相电路平衡时, 用两瓦法能正确测量三相三线电路功率, 当三相四线电路不平衡时, 用两瓦法测量功率存在误差。

关键词: 对称分量; 有功功率; 三相三线; 三相四线; 测量误差

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3886.2014.01.037

[中图分类号] TM993 [文献标志码] A [文章编号] 1000-3886(2014)01-0105-02

## Analysis of Active Power Measurement Error

WU Shu-ping<sup>1</sup>, HUANG Xing-ping<sup>2</sup>, XU Jian-an<sup>1</sup>

(1. Fujian Water Conservancy and Power Professional Technical College, Yong'an Fujian 366000, China;

2. Electromechanical Department, Xiamen University, Xiamen Fujian 361000, China)

**Abstract:** Using symmetrical components, this paper analyzes the relationship between 3-sequence power and 3-phase power and concludes that 3-phase power is a function of the symmetrical components of voltages and currents of the same phase sequence. When the 3-phase circuit is in a balanced condition, we can correctly measure the power of the 3-phase 3-wire circuit in the 2-bush method. If the 3-phase 4-wire circuit is not balanced, there might be errors with the power measurement in the 2-bush method.

**Keywords:** symmetrical components; active power; 3-phase 3-circuit; 3-phase 4-wire; measurement error

## 0 引言

电力系统通常采用三相制方式运行, 当三相电压幅值相等, 正相序相位依次相差 120° 时, 称为三相电压对称; 否则, 称为不对称。有功、无功功率常用的测量方法, 有的方法适用于完全不对称(三相电压不对称、三相负荷不对称)三相电路; 有的方法适用于简单不对称(三相电压不对称, 而三相负荷对称)三相电路; 有的方法仅适用于三相完全对称电路。

## 1 用对称分量方法计算三相电路

电力系统对称运行时, 以一相为基础解算网络, 并推算至其它两相的数据。如果系统明显的不平衡, 那就要用其它的方法。1918 年福蒂斯丘所提出的“对称分量法”, 在分析不对称系统时得到广泛应用。该方法使我们能够将单相表示法扩展到具有不平衡负荷或者某种不平衡终端的系统上, 如短路或故障<sup>[1]</sup>。

电力系统用单相表示法由于它简便, 人们愿意采用。具有三个不平衡相量的系统能被分解为两组平衡相量, 再加上一组单相的相量。如果不对称电压、电流用对称分量法表示, 则单相表示法就适用于每个分量, 也就达到了所期望的简化。

## 1.1 对称分量法

电力系统三相电压和三相电流一般呈不对称状态, 由不对称理论, 可将不对称的三相电压和电流分解成正序、负序和零序三个分量。对三相电压下式总是成立<sup>[2]</sup>。

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{A0} \\ \dot{U}_{A1} \\ \dot{U}_{A2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

若以 A 相为基准相, 则有:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{A0} \\ \dot{U}_{A1} \\ \dot{U}_{A2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(1)和式(2)是对称分量的基本公式。将式(1)或(2)的电压分量换成电流分量就可求计算电流序分量或相分量。其关系时为:

$$\begin{cases} \dot{I}_{012} = C \dot{I}_{ABC} \\ \dot{I}_{ABC} = A \dot{I}_{012} \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{式中} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

## 1.2 用对称分量计算功率

对于任何三相系统, 任意一点的总功率是各相功率之和, 用  $P_{3\phi}$  代表三相功率的平均值表达式为<sup>[3-4]</sup>:

$$P_{3\phi} = R_c \dot{I}_{ABC}^t \dot{I}_{ABC}^* \quad (4)$$

式中  $\dot{I}_{ABC}^t$  为转置矩阵,  $\dot{I}_{ABC}^t = [\dot{I}_A \quad \dot{I}_B \quad \dot{I}_C]$ ;  $\dot{I}_{ABC}^*$  为共轭矩阵,

$$\dot{I}_{ABC}^* = \begin{bmatrix} \dot{I}_A^* \\ \dot{I}_B^* \\ \dot{I}_C^* \end{bmatrix}$$

有功功率用对称分量表示为:

$$P_{3\phi} = \text{Re} \dot{U}_{012}^t A^t A^* \dot{I}_{012}^* \quad (5)$$

由于 A 是对称矩阵, 所以  $A^t = A$ 。因  $a^* = a^2$ ,  $a^{2*} = a$ , 进行矩阵乘积  $AA^*$  的运算得:

$$AA^* = 3E \quad (6)$$

定稿日期: 2013-06-08

式中  $E$  为单位矩阵,  $E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 。

将结果代入式(5)得:

$$P_{3\phi} = 3\text{Re}\dot{U}'_{012}E\dot{I}'_{012} = 3\text{Re}(\dot{U}_{A0}\dot{I}'_{A0} + \dot{U}_{A1}\dot{I}'_{A1} + \dot{U}_{A2}\dot{I}'_{A2}) = 3\text{Re}\dot{U}'_{012}\dot{I}'_{012} \quad (7)$$

上式是一个重要结论,即三相功率是同一相序的电压与电流的对称分量的函数。不同序量间不存在功率“耦合”,正序电压与负序电流、零序电压与负序电流“耦合”功率不存在。

## 2 三相电路功率

### 2.1 三相四线功率

设三相四线制电路的复数功率为  $\dot{S}$ ,  $\dot{I}'_1$ 、 $\dot{I}'_2$ 、 $\dot{I}'_0$  表示基准相 A 相的共轭三序分量<sup>[5-6]</sup> 则:

$$\dot{S} = \dot{U}_A\dot{I}'_A + \dot{U}_B\dot{I}'_B + \dot{U}_C\dot{I}'_C = (\dot{U}_A + a\dot{U}_B + a^2\dot{U}_C)\dot{I}'_1 + (\dot{U}_A + a^2\dot{U}_B + a\dot{U}_C)\dot{I}'_2 + (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C)\dot{I}'_0 \quad (8)$$

将式(2)代入式(8)得:

$$\dot{S} = 3\dot{U}_1\dot{I}'_1 + 3\dot{U}_2\dot{I}'_2 + 3\dot{U}_0\dot{I}'_0 = (3U_1I_1\cos\varphi_1 + 3U_2I_2\cos\varphi_2 + 3U_0I_0\cos\varphi_0) + j(3U_1I_1\sin\varphi_1 + 3U_2I_2\sin\varphi_2 + 3U_0I_0\sin\varphi_0) = P + jQ \quad (9)$$

式中  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ 、 $\varphi_0$  分别是正序、负序、零序电压分量和电流分量之间的夹角,当电流滞后于电压时为正;  $P$ 、 $Q$  是三相电路的有功功率和无功功率。

式(9)的实部是三相四线电路的有功功率,为三序分量形成的有功功率之和;虚部是三相四线电路的无功功率,为三序分量形成的无功功率之和。

### 2.2 三相三线功率

在三相三线电路中,零序电流为零,三相三线视在功率为:

$$\dot{S} = 3\dot{U}_1\dot{I}'_1 + 3\dot{U}_2\dot{I}'_2 = (3U_1I_1\cos\varphi_1 + 3U_2I_2\cos\varphi_2) + j(3U_1I_1\sin\varphi_1 + 3U_2I_2\sin\varphi_2) \quad (10)$$

式(10)的实部是三相三线电路的有功功率;虚部是三相三线电路的无功功率。由式(10)可得出如下推论:

(1) 在三相三线电路中,三相电流的相量和为零,则零序分量电流为零;

(2) 在三相四线电路中,零序电流为中线电流的 1/3;

(3) 在任何三相电路中,其线电压都不含有零序分量,因线电压的零序分量被滤除。

### 2.3 三相三线电路有功功率的测量

三相三线电路有功功率的测量几乎全部采用两功率表法,其原理接线如图 1 所示。图中两个功率表 PW1、PW2 也可以是三相功率表的两个测量元件。

设负荷为星形接线,则该线路所反映的复数功率可由下式表示

$$\dot{S} = \dot{U}_{AB}\dot{I}'_A + \dot{U}_{CB}\dot{I}'_C = (\dot{U}_A - \dot{U}_B)(\dot{I}'_1 + \dot{I}'_2) + (\dot{U}_C - \dot{U}_B)(a^2\dot{I}'_1 + a\dot{I}'_2) = 3\dot{U}_1\dot{I}'_1 + 3\dot{U}_2\dot{I}'_2 \quad (11)$$

功率表读数  $P$  反映的是该复数功率的实数部分,即:

$$P = \text{Re}\dot{S} = \text{Re}[3\dot{U}_1\dot{I}'_1 + 3\dot{U}_2\dot{I}'_2] = 3U_1I_1\cos\varphi_1 + 3U_2I_2\cos\varphi_2 \quad (12)$$

式(12)的右边与式(11)复数功率的实部相等,即用此接线测量三相三线电路有功功率时,可以正确测量不对称三相三线电路的有功功率。

### 2.4 三相四线电路有功功率的测量

用三功率表法测量三相四线电路有功功率时,由电路理论可得,电路所反映的复数功率可由下式表示:

$$\dot{S} = \dot{U}_A\dot{I}'_A + \dot{U}_B\dot{I}'_B + \dot{U}_C\dot{I}'_C \quad (13)$$

式(13)与式(9)相等,功率表反映的该复数功率的实部。三个功率表的读数就是被测三相电路的有功功率,此接线可正确测量不对称三相四线电路的有功功率。

### 2.5 用两瓦法测量三相四线电路有功功率

根据图 1 接线,功率可表示为:

$$\dot{S} = \dot{U}_{AB}\dot{I}'_A + \dot{U}_{CB}\dot{I}'_C = (\dot{U}_A - \dot{U}_B)(\dot{I}'_1 + \dot{I}'_2 + \dot{I}'_0) + (\dot{U}_C - \dot{U}_B)(a^2\dot{I}'_1 + a\dot{I}'_2 + \dot{I}'_0) = 3\dot{U}_1\dot{I}'_1 + 3\dot{U}_2\dot{I}'_2 - 3\dot{I}'_0(-a^2\dot{U}_1 - a\dot{U}_2) \quad (14)$$

将式(9)减去式(14)得:

$$\dot{S}' = 3U_0I_0\cos\varphi_0 + j3U_0I_0\sin\varphi_0 + 3\dot{I}'_0(-a^2\dot{U}_1 - a\dot{U}_2) \quad (15)$$

式(15)为用两瓦法测量三相四线不对称电路功率的误差,  $3U_0I_0\cos\varphi_0$  是由于线电压不存在零序分量造成的测量误差;而  $3\dot{I}'_0(-a^2\dot{U}_1 - a\dot{U}_2)$  实数部分是由于正序、负序电压与零序电流耦合功率不存在,产生的原理性误差。当电路不存在零序分量时,功率的测量是正确的。

## 3 结束语

三相功率是同一相序的电压与电流的对称分量的函数,不同序量的电流与电压相作用的功率“耦合”不存在。

三相三线电路用两瓦法能正确测量电路三相有功功率;三相四线制当不对称电路用两瓦法测量电路有功或无功功率存在误差,当电路不对称时测量三相四线的电路功率必须采用三瓦法。

参考文献:

[1] 许建安,王风华. 电力系统继电保护整定计算[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007.  
 [2] 谢珍贵,许建安. 基于和差量变换选相原理研究[J]. 水电能源科学,2012,30(10):72-173.  
 [3] 许建安. 功率测量错误接线分析[J]. 水电能源科学,2008,26(1):184-186.  
 [4] 张国良,许建安. 电压互感器断线对保护性能影响分析[J]. 水电能源科学,2010,28(6):143-145.  
 [5] 王继东,刘昆,高彦静. 基于瞬时无功功率理论的电压波动检测和闪变计算[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(2):145-150.  
 [6] 邵振华,陈冲,林瑞全. 复杂工况下三相电流基波正序有功分量检测的新方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(5):10-15.

【作者简介】吴舒萍(1966-),女,浙江温州人,副教授,从事电路教学与研究。黄兴平(1992-),男,福建尤溪人,本科生,电力工程专业。许建安(1950-),男,福州人,教授,从事电力系统继电保护教学与研究。

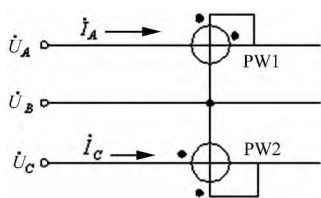


图 1 用两功率表测量三相三线电路有功功率