

牵引变电所无功计量方法研究

韩正庆, 高仕斌

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 讨论了采用阻抗匹配平衡变压器的牵引变电所的无功计量方法。通过理论计算和数字仿真, 分析了在牵引变电所低压侧用有功表计量无功的误差, 得到了计量结果较实际值偏大的结论, 对于牵引变电所无功计量方式的设计和运行有一定的指导作用。

关键词: 牵引变电所; 无功; 有功; 计量; 误差

中图分类号: TM922.4 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2002)08-0030-03

1 引言

铁道部规定, 电气化铁道计费应在高压侧。但在某些特殊情况下, 用户要求将计费表计设置在低压侧。由于牵引主变压器是完成将电力系统三相电能转换成供电力机车的两相电能的设备, 从而造成了在低压侧计量的特殊性。为了能在低压侧测量无功, 有的用户采用两块有功功率表来计量无功。本文主要针对牵引变电所两臂负荷的不平衡性, 讨论了这种计量方法的可行性。

2 理论基础

阻抗匹配平衡变压器的接线图及电流、电压定义如图 1 所示。

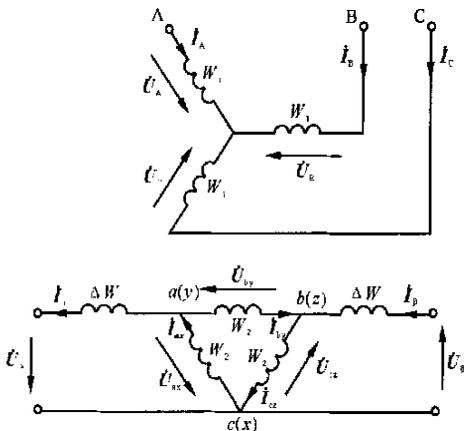


图 1 阻抗匹配平衡变压器的接线图

由图 1 可以得到电压方程式:

$$\begin{cases} \dot{U} = \dot{U}_x - \frac{\sqrt{3}-1}{2K} \dot{U}_B \\ \dot{U} = \dot{U}_x - \frac{\sqrt{3}-1}{2K} \dot{U}_B \\ \dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $K = W_1 / W_2$, 为变压器变比。

由式(1)可以推出:

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{pmatrix} = \frac{K}{2\sqrt{3}} \begin{pmatrix} \sqrt{3}+1 & -(\sqrt{3}-1) \\ -2 & -2 \\ -(\sqrt{3}-1) & \sqrt{3}+1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{U} \\ \dot{U} \end{pmatrix} \quad (2)$$

同样, 可以得到电流方程式

$$\begin{cases} \dot{I}_x = K \dot{I}_A \\ \dot{I}_{cz} = K \dot{I}_C \\ \dot{I}_B = -\frac{\sqrt{3}-1}{2K} (\dot{I}_x + \dot{I}) + \frac{1}{K} \dot{I}_{by} \\ \dot{I} = \dot{I}_x - \dot{I}_{by} \\ \dot{I} = \dot{I}_{cz} - \dot{I}_{by} \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可以推出

$$\begin{pmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{pmatrix} = \frac{1}{2\sqrt{3}K} \begin{pmatrix} \sqrt{3}+1 & -(\sqrt{3}-1) \\ -2 & -2 \\ -(\sqrt{3}-1) & \sqrt{3}+1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I} \\ \dot{I} \end{pmatrix} \quad (4)$$

复功率的计算公式为

$$\tilde{S} = \tilde{S}_A + \tilde{S}_B + \tilde{S}_C = \dot{U}_A \dot{I}_A + \dot{U}_B \dot{I}_B + \dot{U}_C \dot{I}_C \quad (5)$$

将式(2)、(4)代入式(5), 可以得到

$$\tilde{S} = \dot{U} \dot{I} + \dot{U} \dot{I} = U I \cos \theta + U I \cos \theta + j(U I \sin \theta + U I \sin \theta) \quad (6)$$

所以, 无功功率为

$$Q = U I \sin \theta + U I \sin \theta \quad (7)$$

其中, θ 分别为 i 滞后 \dot{U} 和 i 滞后 \dot{U} 的角度, θ 的定义见图 2 所示的次边相量图。

若认为 U 与 U 在数值上相等, 则有,

$$Q = U I \sin \theta + U I \sin \theta = U I \sin \theta + U I \sin \theta = U I \cos(90^\circ - \theta) + U I \cos(90^\circ - \theta) \quad (8)$$

根据图 2 和式(8), 用两只有功功率表计量无功的方法, 简称为“两表法”的原理是: 用一只有功功率

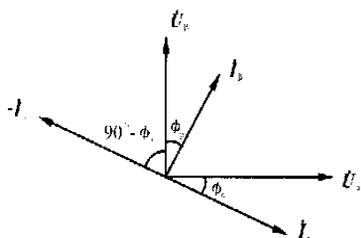


图2 变压器次边相量图

表接相电流 i 和相电压 U ,用另一只有功率表接相反向电流 $-i$ 和相电压 U ,将两只表的数值相加即为低压侧计量的无功功率。

3 分析与计算

根据参考文献[1],阻抗匹配平衡变压器的等值电路如图3所示。

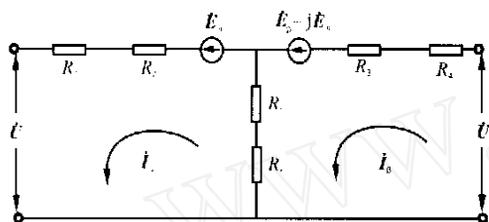


图3 阻抗匹配平衡变压器的等值电路

低压侧两相输出电压为

$$\begin{pmatrix} \dot{U} \\ \dot{U} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{E} \\ \dot{E} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} A & -B \\ -B & A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I} \\ \dot{I} \end{pmatrix} \quad (9)$$

设原边 A 相和 C 相的阻抗为 $Z_A = Z_C = Z_1$, 中间的 B 相的阻抗为 Z_B , 换算到次边的等值阻抗为 $Z_1 = Z_1 / K^2$ 和 $Z_B = Z_B / K^2$, 次边阻抗为 $Z_{ca} = Z_{bc} = Z_2$, $Z_{ab} = Z_2$, $K = 2.732$, 则式(9)中

$$A = \frac{1}{2\sqrt{3}} [(\sqrt{3} + 1) Z_1 + (\sqrt{3} - 1) Z_B] + (0.7887 +) Z_2 = 0.7887 (Z_1 + Z_2) + 0.2113 Z_B + Z_2 \quad (10)$$

$$B = \frac{1}{2\sqrt{3}} [(\sqrt{3} - 1) Z_1 - (\sqrt{3} + 1) Z_B] + (0.2113 -) Z_2 = 0.2113 (Z_1 + Z_2) - 0.2113 Z_B - Z_2 \quad (11)$$

其中, K 和 K' 为比值系数。

由式(9)得知,阻抗匹配平衡变压器的电压损失为

$$\begin{cases} \dot{U} = A\dot{I} - B\dot{I} \\ \dot{U} = A\dot{I} - B\dot{I} \end{cases} \quad (12)$$

按图1规定的相位关系, \dot{U} 滞后 \dot{U} 的相位为 90° 的电角度。考虑回路中的电阻值较其电抗小的

多,实用上可略去电阻不计,而认为阻抗在数值上等于其电抗。按相位关系可得

$$\begin{cases} U = AI \sin \phi - BI \cos \phi \\ U = AI \sin \phi - I \cos \phi \end{cases} \quad (13)$$

由于牵引变电所两相负载的不平衡性,所以牵引变压器漏抗引起的两相电压损失不一样,因此上面提出的“两表法”会存在误差。

4 数字仿真

以下列牵引变电所为例进行仿真计算。

某牵引变电所有一台 SFY20000/110-GY 型阻抗匹配平衡变压器,测得的技术数据知 $K = W_1 / W_2 = 950 / 336 = 2.82738$, $X_1 = 0.5 (X_{A1} + X_{C1}) = 6.525$, $X_B = 7.296$, $X_2 = 1.37$, $X_{da} = X_{bc} = -0.0304$, $X_p = -0.2167$, 此比值系数 $n = -0.0304 / 1.37 = -0.022$ 和 $n' = -0.2167 / 1.37 = -0.158$ 。将有关数据分别代入式(10)、(11)得

$$A = 0.7887 \times (6.525 + 1.37) + 0.2113 \times 7.296 - 0.0304 = 7.738$$

$$B = 0.2113 \times (6.525 + 1.37 - 7.296) + 0.2167 = 0.3433$$

按照“两表法”得出的无功功率为

$$Q = U I \sin \phi + U I \sin \phi \quad (14)$$

而实际无功功率为式(7)。

下面按照式(14)和式(7)进行仿真计算。其中 U 和 U 可以通过式(9)计算得到,定义 $n = I / I$ 为 \dot{U} 相与 \dot{U} 相的负荷比。

当 $n = 0$, $\dot{U} = 27.5 \angle 0^\circ \text{ kV}$, $\cos \phi = 0.85$, $I = 0$, I 变化范围为 $0 \sim 800 \text{ A}$ 时,按式(14)进行计量的测量值与实际值仿真结果见图4。从仿真结果可以看出,按式(14)进行计量的无功功率测量值比实际值大,并且负载电流越大,两者差别越大。

当 $n = 0$, $\dot{U} = 27.5 \angle 0^\circ \text{ kV}$, $\cos \phi = 0.85$, $I = 0 \text{ A}$,

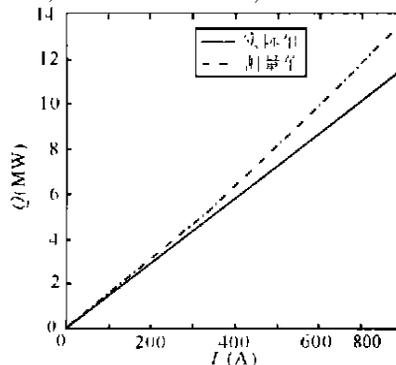


图4 $n = 0$ 的数字仿真结果

I 变化范围为 $0 \sim 800\text{A}$ 时,测量值与实际值仿真结果见图 5。从仿真结果可以看出,按式(14)进行计量的无功功率测量值比实际值大,并且负载电流越大,两者差别越大。

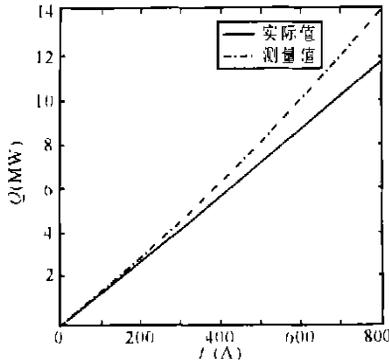


图 5 $n=0$ 的数字仿真结果

当 $n=1$, $\dot{U} = 27.5 \angle 0^\circ \text{kV}$, $\cos \varphi = \cos \varphi = 0.85$, I 与 I 的变化范围为 $0 \sim 800\text{A}$ 时, 低压侧无

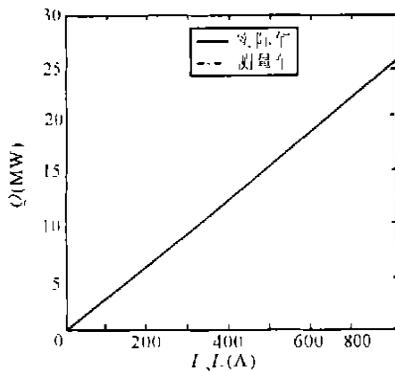


图 6 $n=1$ 的数字仿真结果

功功率测量值与实际值仿真结果见图 6。从仿真结果可以看出,当两边负载相同时,按式(14)进行计量的无功功率测量值等于实际值。

5 结论

本文讨论了在牵引变电所低压侧用两块有功表计量无功的误差问题,通过上述讨论可以得到以下结论。

(1) 在低压侧用两块有功表计量无功的方法是在各种负荷情况下两相电压幅值相等的前提下导出的,由于牵引变电所两臂负载相同的几率很小,所以,这种计量方法的准确度值得商榷。

(2) 理论分析与数字仿真结果表明,当两臂负载不等时,这种方法计量的无功较实际无功要大,从而使功率因数较实际值偏低。

参考文献:

- [1] 刘福生,等. 阻抗匹配平衡变压器的等值电路及其应用[J]. 铁道学报, 1994, 16(3): 22~30.
- [2] 曹建猷. 电气化铁道供电系统[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983.
- [3] 贺威俊,等. 电力牵引供电技术[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1998.

收稿日期: 2001-11-14

作者简介:

韩正庆(1977-),男,硕士,主要从事牵引供电系统综合自动化的研究工作。

高仕斌(1963-),男,硕士,教授,主要从事牵引供电系统综合自动化的教学与研究工作。

Study on the measurement method of reactive power in traction substation

HAN Zheng-qing, GAO Shi-bin

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The measurement method of reactive power in traction substation, which main transformer is impedance matching balance one, is discussed. Based on the theoretical analysis and digital simulation, the error of measuring reactive power with active meters at the secondary side of transformer is analyzed. And a conclusion is drawn that the dictated value is bigger than the real one. This paper has reference value for the design and operation of the measurement method of reactive power in traction substation.

Key words: traction substation; reactive power; active power; measurement; error

(上接第 17 页)

Abstract: The rise of electricity market has had great impact on the traditional electric power industry, and caused many urgent problems that need to be solved. Because reactive power service is very important for the economic, secure and reliable operation of the power system, the cost of reactive power service should be analyzed and the problem of reactive power pricing should be solved scientifically and rationally. The characteristics of reactive power service are analyzed, the reactive power cost is emphasized to be considered in electricity market, and at so, the reactive power generation costs and transmission costs are analyzed from the view of economy. The calculation results of simple examples also illustrate the scientific rationality and importance of the analysis and calculation of the reactive power cost.

Key words: electricity market; reactive power service; reactive power cost