

阻抗匹配平衡变压器的负序电流

周 勇,王绪雄,刘中元

(郑州大学电气工程学院 ,河南 郑州 450002)

摘 要 :简述了阻抗匹配平衡变压器的结构特征 ,针对不同负荷条件下的负序电流进行了计算和分析 ,以曲线形式描述了高压侧电流不对称度的变化规律 ,并给出了一组实测电流 .分析结果表明 ,阻抗匹配平衡变压器对于减少电力牵引负荷注入电网的负序电流具有十分显著的效果 .

关键词 :阻抗匹配平衡变压器 ;负序电流 ;电流不对称度

中图分类号 :TM 714 文献标识码 :A

阻抗匹配平衡变压器是近年来用于电气化铁路供电系统的新型牵引变压器 ,它不仅继承了 Y/ Δ -11 接线变压器结构的优点 ,同时还具有斯科特 (Scott) 变压器的换相功能 ,对于减少电力牵引负荷注入电网的负序电流具有十分显著的效果^[1,2] . 本文将对阻抗匹配平衡变压器在不同负荷条件下的负序电流进行计算 ,并分析电流不对称度的变化规律 .

1 阻抗匹配平衡变压器的结构特征

阻抗匹配平衡变压器的接线如图 1 所示 . 高压侧采用星型接线 ,每相绕组匝数为 W_1 ; 低压侧采用三角形接线 ,每相绕组匝数为 W_2 ,并且还在 ab 绕组的两端各接一个外延绕组 ,其匝数为 $\Delta W = 0.336 W_2$,这样可使两供电臂的电压 U_a 和 U_b 形成 90° 的相位差 , 低压侧各绕组的电压相量如图 2 所示 .

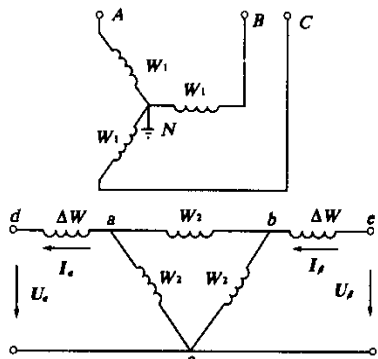


图 1 阻抗匹配平衡变压器的接线方式

Fig. 1 Connection of the impedance-matching balance transformer

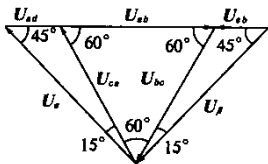


图 2 低压侧电压相量图

Fig. 2 Phasor diagram of the voltages of the secondary

2 电流变换及其对称分量

根据阻抗匹配平衡变压器的结构 ,可以画出其高低压两侧的电流相量如图 3 所示 .

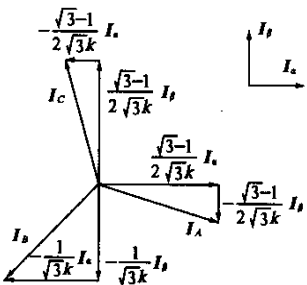


图 3 高低压两侧电流相量图

Fig. 3 Phasor diagram of the currents of the primary and secondary

根据图 3 可得

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \frac{1}{2\sqrt{3}K} \begin{bmatrix} \sqrt{3}+1 & -(\sqrt{3}-1) \\ -2 & -2 \\ -(\sqrt{3}-1) & \sqrt{3}+1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 : K 为变压器的变比 , $K = W_1/W_2$. 利用对称分量法对式 (1) 进行分解 ,可得

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中： $\alpha = e^{j120^\circ}$ ； $\alpha^2 = e^{j240^\circ}$ ； I_1, I_2 和 I_0 分别是流过高压侧各相绕组的正序、负序和零序电流。

将式(1)代入式(2)，可得

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{4\sqrt{3}K} \cdot$$

$$\begin{bmatrix} (\sqrt{3}+1)-j\sqrt{3}-1 & (\sqrt{3}+1)-j\sqrt{3}-1 \\ (\sqrt{3}+1)+j\sqrt{3}-1 & -(\sqrt{3}+1)-j\sqrt{3}-1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix}, \quad (3)$$

由上式可知，变压器高压侧没有 I_0 。

下面分几种情况对阻抗匹配平衡变压器的负序电流进行讨论。

2.1 低压两侧负荷阻抗角相等

这时 I_β 超前 I_α 90° ，对式(3)中的各向量求模，可得高压侧的正序电流有效值和负序电流有效值为

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{6}K} \begin{bmatrix} I_\alpha + I_\beta \\ I_\alpha - I_\beta \end{bmatrix}, \quad (4)$$

对应的高压侧三相电流的有效值为

$$\begin{cases} I_A = \frac{1}{K\sqrt{3}} \left(\frac{\sqrt{3}+1}{2\sqrt{3}} I_\alpha^2 + \frac{\sqrt{3}-1}{2\sqrt{3}} I_\beta^2 \right); \\ I_B = \frac{1}{K\sqrt{3}} \left(\frac{1}{\sqrt{3}} I_\alpha^2 + \frac{1}{\sqrt{3}} I_\beta^2 \right); \\ I_C = \frac{1}{K\sqrt{3}} \left(\frac{\sqrt{3}-1}{2\sqrt{3}} I_\alpha^2 + \frac{\sqrt{3}+1}{2\sqrt{3}} I_\beta^2 \right). \end{cases} \quad (5)$$

当低压两侧的负荷阻抗完全相等时，有 $I_\alpha = I_\beta$ ， $I_2 = 0$ ，三相电流完全对称， $I_A = I_B = I_C = \frac{1}{K} \sqrt{\frac{2}{3}} I_\alpha$ 。

对应于一般情况，取 $I_\beta = mI_\alpha$ ， $0 \leq m \leq 1$ ，可得电流不对称度为

$$\epsilon = \frac{I_2}{I_1} = \frac{I_\alpha - I_\beta}{I_\alpha + I_\beta} = \frac{1-m}{1+m}. \quad (6)$$

由式(6)画出 $\epsilon - m$ 曲线如图 4 中的曲线 2 所示。该图中的曲线 1 为 Y/ Δ -11 接线的牵引变压器的 $\epsilon - m$ 曲线，相比之下，阻抗匹配平衡变压器的对称性比 Y/ Δ -11 接线的变压器有了明显的改善。

2.2 低压两侧负荷阻抗角不相等，两侧电流相等

将 a 侧的负荷阻抗角 α 取某个固定值，让 b

侧的负荷阻抗角 β 在 $-90^\circ \sim +90^\circ$ 之间变化，取两侧电流相等，利用式(3)计算出对应的正序电流和负序电流，然后计算出电流不对称度，并画出 $\epsilon - \beta$ 曲线如图 5 所示。图中的曲线 1 对应于 $I_\alpha = I_\beta$ ， $\alpha = -30^\circ$ ；曲线 2 对应于 $I_\alpha = I_\beta$ ， $\alpha = 0^\circ$ ；曲线 3 对应于 $I_\alpha = I_\beta$ ， $\alpha = 30^\circ$ 。

从图 5 中可以看出，当低压两侧电流相等时，两侧负荷阻抗角越接近，电流不对称度就越小。

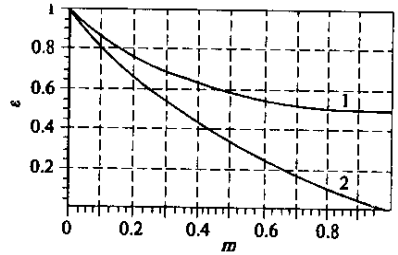


图 4 $\epsilon - m$ 曲线

Fig. 4 $\epsilon - m$ curve

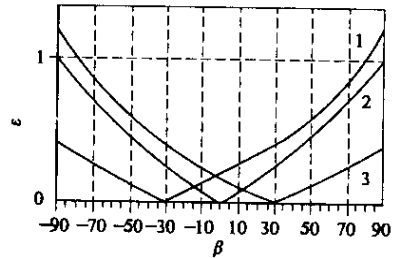


图 5 $\epsilon - \beta$ 曲线 ($I_\alpha = I_\beta$)

Fig. 5 $\epsilon - \beta$ curve ($I_\alpha = I_\beta$)

2.3 低压两侧负荷阻抗角不相等，两侧电流也不相等

将 a 侧的负荷阻抗角 α 取某个固定值(比如 0°)，让 b 侧的负荷阻抗角 β 在 $-90^\circ \sim +90^\circ$ 之间变化，低压两侧电流分别取不同数值，利用式(3)计算出对应的正序电流和负序电流，然后计算出电流不对称度，并画出 $\epsilon - \beta$ 曲线如图 6 所示。图中的曲线 1 对应于 $I_\beta = 0.3I_\alpha$ ， $\alpha = 0^\circ$ ；曲线 2 对应于 $I_\beta = 0.5I_\alpha$ ， $\alpha = 0^\circ$ ；曲线 3 对应于 $I_\beta = I_\alpha$ ， $\alpha = 0^\circ$ 。

从图 6 中可以看出，低压两侧电流越接近，电流不对称度就越小，低压两侧负荷阻抗角越接近，电流不对称度也就越小。

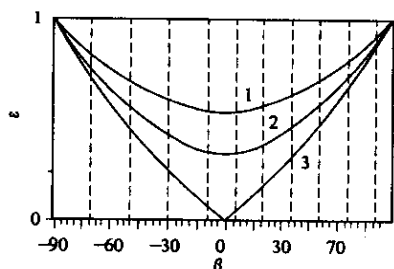


图 6 $\epsilon - \beta$ 曲线 ($\alpha = 0^\circ$)

Fig. 6 $\epsilon - \beta$ curve ($\alpha = 0^\circ$)

实际情况下 ,变压器低压两侧的电力牵引负荷是不断变化的 ,高压侧的三相电流和负序电流也将随之变化 ,表 1 给出了一组实测数据 .

表 1 阻抗匹配平衡变压器高压侧电流实测数据

Tab.1 Current of the impedance-matching balance transformer						
样本	I_A/A	I_B/A	I_C/A	I_1/A	I_2/A	ϵ
1	29.52	37.80	25.68	30.52	7.44	0.243
2	44.28	67.20	41.40	49.05	18.00	0.367
3	43.20	71.76	45.12	50.81	20.88	0.410
4	55.68	85.32	54.60	62.87	22.44	0.356
5	29.64	54.48	29.88	35.88	16.80	0.468
6	43.92	86.28	48.60	53.07	33.12	0.624
7	36.12	56.16	39.36	42.70	13.32	0.311
8	43.92	46.20	40.08	43.34	3.36	0.077
9	48.12	50.76	46.08	48.27	2.76	0.057

从上表中可以看出 ,阻抗匹配平衡变压器高压侧三相电流的数值比较接近 ,电流不对称度基

本在 0.5 以下 .

3 结论

在同样的牵引负荷作用下 ,新型的阻抗匹配平衡变压器注入电网的负序电流比普通的 Y/△-11 接线的变压器要小 .铁路调度部门如果能做到合理安排电力机车的运行 ,尽可能使牵引变压器两侧的负荷相等 ,对于降低电力牵引负荷注入电网的负序电流 ,减少其对电网的影响将是十分有利的 .

参考文献 :

[1] 林海雪 .电力系统的三相不平衡[M].北京 :中国电力出版社 ,1998 .
[2] 孙树勤 林海雪 .干扰性负荷的供电[M].北京 :中国电力出版社 ,1996 .

The Negative Sequence Current of Impedance – matching Balance Transformer

ZHOU Yong , WANG Xu – xiong , LIU Zhong – yuan

(College of Electric Engineering ,Zhengzhou University ,Zhengzhou 450002 ,China)

Abstract : In this paper ,the structure characteristic of the impedance-matching balance transformer is sketched , the negative sequence currents under different loads are calculated ,and the rules of the current asymmetry degree at the high voltage side are described in the form of curves . At the end ,some measured currents are given . It shows that the impedance-matching balance transformer can reduce the negative sequence current from traction loads into power system obviously .

Key words : impedance-matching balance transformer ; negative sequenc currente ; current asymmetry degree