

阻抗匹配平衡变压器差动保护接线方式研究

湖南大学 周有庆 刘福生 聂光前 左辰

摘要 根据阻抗匹配平衡变压器高低压绕组接线方式和运行特点,研究了该变压器高低压侧电流的变化规律,提出了适用于该种变压器的差动保护接线方式,并分析了工作原理和动模实验的结果。

关键词 继电保护 差动保护 平衡变压器

0 前言

阻抗匹配平衡变压器(简称平衡变压器)是湖南大学最近研究成功的电气化铁道供电变压器。该变压器低压侧接电气化铁道上行线和下行线两相负载,两相负荷的电流随列车的运行情况变化而变化;高压侧接三相电力系统。其最大优点是:在低压侧两相不对称负荷的各种运行方式下,变压器高压侧三相电流具有较好的对称性,减小了负序电流,以及负序电流对电力系统的影响,提高了系统的电能质量。随着电气化铁道的迅速发展,阻抗匹配平衡变压器具有广泛的应用前景。

平衡变压器在结构和性能上与Y/Δ-11电力变压器有很大的不同,变压器低压侧两相电流相位差为90°电角度,高压侧电流与低压侧电流相位差随列车运行方式的变化在0°~90°之间变化,由于上述特点,给设计平衡变压器的差动保护带来了困难。本文在深入研究平衡变压器高低压侧电流变化规律的基础上,找到了一种理想的差动保护接线方案,满足了平衡变压器继电保护的需要。

1 平衡变压器电流分析

平衡变压器的绕组接线如图1所示。 I_A 和 I_B 为电气化铁道两供电支臂电流,其大小随列车运行情况而变化,其相位差在结构上保证了总是为90°电角度。 I_A , I_B , I_C 为高压侧三相电流。由变压器的设计得出高低压侧电流之间的线性矩阵为:

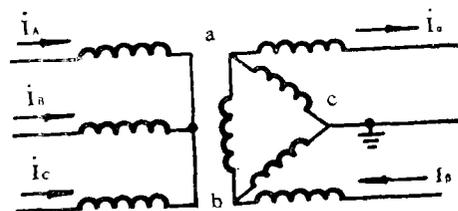


图1 平衡变压器绕组接线方式

$$\begin{pmatrix} \dot{i}_A \\ \dot{i}_B \\ \dot{i}_C \end{pmatrix} = \frac{1}{2\sqrt{3}k} \begin{pmatrix} \sqrt{3}+1 & -(\sqrt{3}-1) \\ -2 & -2 \\ -(\sqrt{3}-1) & \sqrt{3}+1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中 $K = W_1/W_2$ ，为平衡变压器的变比。 W_1 和 W_2 分别为变压器高压侧相绕组和低压侧三角形接线的相绕组匝数

以 I_A/K 为参考向量，变压器高压侧三电流的大小和相位角有以下关系：

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \frac{1}{2\sqrt{3}K} \sqrt{(\sqrt{3}+1)^2 I_A^2 + (\sqrt{3}-1)^2 I_B^2} \angle \text{tg}^{-1} \frac{-(\sqrt{3}-1)I_B}{(\sqrt{3}+1)I_A} \\ \dot{I}_B &= \frac{1}{\sqrt{3}K} \sqrt{I_A^2 + I_B^2} \angle (180^\circ + \text{tg}^{-1} \frac{I_B}{I_A}) \\ \dot{I}_C &= \frac{1}{2\sqrt{3}K} \sqrt{(\sqrt{3}-1)^2 I_A^2 + (\sqrt{3}+1)^2 I_B^2} \angle (180^\circ - \text{tg}^{-1} \frac{(\sqrt{3}+1)I_B}{(\sqrt{3}-1)I_A}) \end{aligned} \quad (2)$$

由式(2)可作出 \dot{I}_A 和 \dot{I}_B 为任意值时，高低压侧电流的向量图。当 $I_A = I_B$ 时，电流向量图如图2所示，在这种情况下，高压侧三相电流是完全对称的， \dot{I}_A 与 \dot{I}_B 的相位差和 \dot{I}_C 与 \dot{I}_B 的相位差均为 15° 电角度。当 $I_A \neq I_B$ 时，如 $I_A = I_B/2$ ，电流向量图如图3所示，在这种情况下， \dot{I}_A 、 \dot{I}_B 、 \dot{I}_C 失去了对称性， \dot{I}_A 与 \dot{I}_B 的相位差变为 28.2° 电角度， \dot{I}_C 与 \dot{I}_B 的相位差变为 7.6° 电角度。

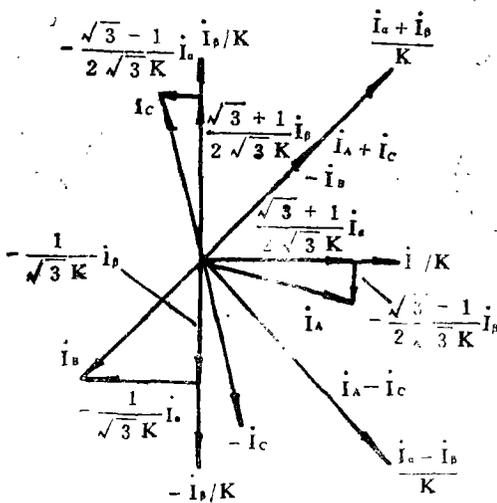


图2 $I_A = I_B$ 时电流向量图

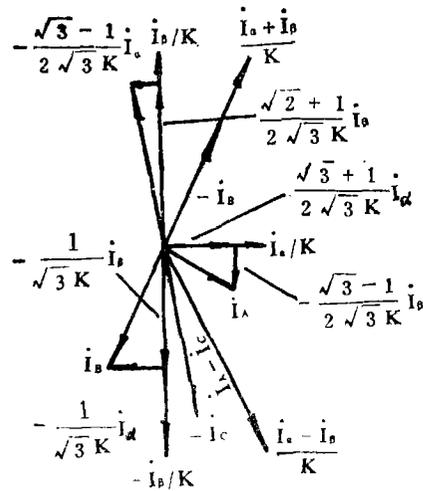


图3 $I_A = I_B/2$ 时电流向量图

通过对图2和图3的向量图分析，可以发现：无论两供电支臂电流 \dot{I}_A 和 \dot{I}_B 如何变化， $-\dot{I}_B$ 与 $(\dot{I}_A + \dot{I}_B)/K$ 始终同相位，且在数值上有一定的比例关系，而 $\dot{I}_A - \dot{I}_C$ 与 $(\dot{I}_A - \dot{I}_B)/K$ 也同相位，且在数值上相等。

上述结论，也可通过数学推导得出：

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B = \sqrt{I_A^2 + I_B^2} \angle \text{tg}^{-1} \frac{I_B}{I_A} \quad (3)$$

$$\dot{I}_A + \dot{I}_C = \frac{1}{\sqrt{3}K} \sqrt{I_A^2 + I_B^2} \angle \text{tg}^{-1} \frac{I_B}{I_A} \quad (4)$$

$$-\dot{i}_B = \frac{1}{\sqrt{3}} K \sqrt{I_A^2 + I_C^2} \angle \text{tg}^{-1} \frac{I_C}{I_A} \quad (5)$$

$$\dot{i}_A - \dot{i}_B = \sqrt{I_A^2 + I_C^2} \angle \text{tg}^{-1} \frac{I_C}{I_A} \quad (6)$$

$$\dot{i}_A - \dot{i}_C = \frac{1}{K} \sqrt{I_A^2 + I_C^2} \angle -\text{tg}^{-1} \frac{I_C}{I_A} \quad (7)$$

$$\text{则有 } \frac{\dot{i}_A + \dot{i}_B}{-\dot{i}_C} = \sqrt{3} K \quad (8)$$

$$\frac{\dot{i}_A - \dot{i}_B}{\dot{i}_A - \dot{i}_C} = K \quad (9)$$

平衡变压器的电流变化规律是设计差动保护接线方式的重要理论依据。

2 平衡变压器差动保护接线方式分析

2.1 差动保护接线方式选择

设计变压器差动保护接线方式的一般原则是：

(1) 在正常运行和外部故障时，电流互感器二次侧两差动臂的电流大小相等，相位相同，以减小流入差动继电器的不平衡电流。

(2) 能反应变压器各种内部故障（变压器高低压两侧电流互感之间的短路故障）而灵敏动作。

根据以上原则和平衡变压器电流的特殊变化规律，设计了平衡变压器差动保护的接线方式，如图4所示，图中1 LH是平衡变压器高压侧电流互感器，其变比为 n_{L1} ；2 LH和3 LH是平衡变压器低压侧两组电流互感器，其变比分别为 n_{L2} 和 n_{L3} ； CJ_1 和 CJ_2 是差动继电器。

接线图中，采用了两个差动回路：

a. 以 $(\dot{i}_A - \dot{i}_C)/n_{L1}$ 和 $(\dot{i}_A - \dot{i}_B)/n_{L2}$ 为差动臂与差动继电器 CJ_1 相连接构成一个差动回路。

b. 以 $-\dot{i}_B/n_{L1}$ 和 $(\dot{i}_A + \dot{i}_B)/n_{L3}$ 为差动臂与差动继电器 CJ_2 相连接构成另一个差动回路。

为了保证正常运行和外部故障时，两个差动回路的两个差动臂的电流大小相等，相位相同，除按以上接线方式构成差动保护外，还须按以下原则选取三组电流互感器变比。

$$n_{L2}/n_{L1} = (\dot{i}_A - \dot{i}_B)/(\dot{i}_A - \dot{i}_C) = K \quad (10)$$

$$n_{L3}/n_{L1} = (\dot{i}_A + \dot{i}_B)/(-\dot{i}_B) = \sqrt{3} K \quad (11)$$

可先按平衡变压器高压侧的额定电流选择1 LH的变比 n_{L1} ，再根据式(10)和(11)选择2 LH和3 LH的变比 n_{L2} 和 n_{L3} 。

2.2 平衡变压器内部故障时差动保护的動作情况分析

由于电气化铁道平衡变压器低压侧无电源，所以变压器内部短路时流入差动继电器的电流仅为高压侧短路电流的二次值：

$$\dot{I}_{J1} = (\dot{I}_A - \dot{I}_C) / n_{L1} \quad (12)$$

$$\dot{I}_{J2} = -\dot{I}_B / n_{L1} \quad (13)$$

根据平衡变压器短路计算公式和结论〔4〕可知：平衡变压器内部发生各种类型的相间短路或接地短路故障时，上述差动保护接线方式可以保证至少有一个差动继电器灵敏动作切除短路故障。

3 动模实验结果分析

阻抗匹配平衡变压器模型由昆明变压器厂制造，各项参数经测试均满足设计要求，该模型差动保护接线方式在湖南大学电力系统动态模拟实验室进行，取得了理想结果。

试验模型变压器容量为20kVA，高压侧额定电压为2kV，额定电流为5.74A，低压侧额定电压为220V，额定电流为45.45A。根据平衡变压器差动保护电流互感器变比选取原则：

1LH变比选择为 $n_{L1} = 5 / 5$

由式(10) $n_{L2} / n_{L1} = K$ ，已知 $K = 6.43$

则2LH计算变比为 $n_{L2} = 6.48$

2LH实际变化选择为 $n_{L2} = 30 / 5 = 6$

由式(11)， $n_{L2} / n_{L1} = \sqrt{3} K$

3LH计算变比为 $n_{L3} = \sqrt{3} k = 11.13$

3LH实际变比选择为 $n_{L3} = 50 / 5 = 10$

3.1 正常情况下各种运行方式的模拟试验

表1

电 流	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I_B / n_{L2}	8.50	7.00	5.33	3.77	2.83	2.00	0.80	8.75	8.60
I_β / n_{L2}	3.67	3.67	3.67	3.60	3.60	3.67	3.67	1.67	0
I_A / n_{L1}	6.30	5.16	4.05	4.05	1.95	1.5	0.3	6.39	6.39
I_C / n_{L1}	3.30	3.15	3.30	2.64	2.40	2.40	2.25	2.25	1.80
$-I_B / n_{L1}$	4.80	4.20	3.45	2.85	2.34	2.10	1.65	4.65	4.68
$(I_A + I_\beta) / n_{L3}$	5.25	4.59	3.90	3.15	2.85	2.55	2.25	4.95	4.98
$(I_A - I_C) / n_{L1}$	9.09	7.65	6.15	4.74	4.20	3.75	3.72	8.55	7.95
$(I_B - I_\beta) / n_{L2}$	9.73	8.13	9.60	5.10	4.50	4.13	3.77	9.17	8.63
$I_{J1} \approx$	0.54	0.50	0.45	0.40	0.30	0.30	0.20	0.50	0.65
I_{J2}	0.40	0.40	0.40	0.30	0.40	0.40	0.40	0.30	0.30

如图4所示，在差动保护接线二次回路中，各电流支路均接入相应量程的0.5级电流

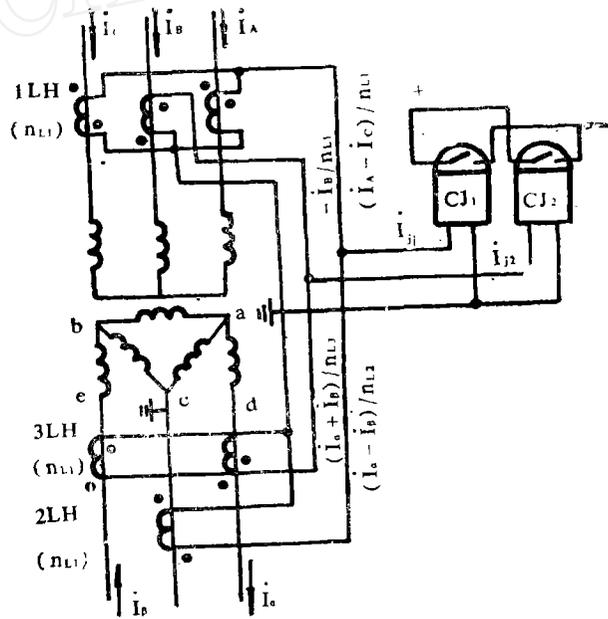


图4 平衡变压器差动保护接线方式

表, 通过改变 \dot{i}_a 和 \dot{i}_b 的大小模拟了九种不同运行方式, 测得各支路电流及流入两差动回路电流 \dot{I}_{11} 和 \dot{I}_{12} 如表 1 所示。

试验结果表明, 无论正常运行时电气化铁道两相负载如何变化, 流入两差动继电器的不平衡电流大大小于额定电流, 差动保护可靠不动作。

3.2 短路故障模拟试验

由于变压器短路电流大, 而动模室的模拟开关断路容量小, 所以变压器外部、内部短路都是在降压条件下做的, 采用 16 线光线示波器录取高压侧 B 相电流和流入两差动继电器 I_{11} 、 I_{12} 的电流波形。

3.2.1 外部故障模拟试验

短路是在 $\dot{U}_0 = 200\text{V}$ 条件下在出口制造 e—c 短路, 波形如图 5 所示。

由录波图尺寸且考虑电流互感器变比算得 $\dot{I}_A = 3.9\text{A}$, $\dot{I}_B = 10.66\text{A}$, $\dot{I}_C = 14.55\text{A}$,

$\dot{I}_a = 0$, $\dot{I}_b = 118.7\text{A}$ 。流入差动继电器的不平衡电流 $\dot{I}_{11} = 2\text{A}$, $\dot{I}_{12} = 1\text{A}$ 。这是由于电流互感器实际变比与计算变比不等及误差等原因所至, 该不平衡电流大大低于额定电流, 因此各种外部短路时差动保护均可靠不动作。

3.2.2 内部故障模拟试验

模拟了八种类型的内部短路。变压器高压侧出口三种类型短路是在 $\dot{U}_{AB} = 200\text{V}$ (额定电压为 2kV) 条件下模拟的, 录波图如图 6~8 所示。变压器低压侧五种类型短路是在 $\dot{U}_0 = 100\text{V}$ (额定电压为 220V) 条件下模拟的, 录波图如图 9~13 所示。

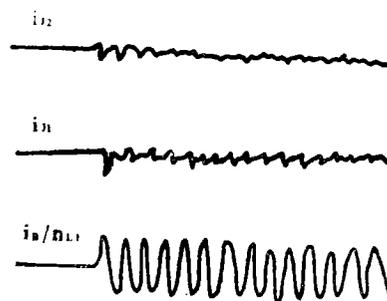


图 5 变压器外部 e—c 短路时波形图

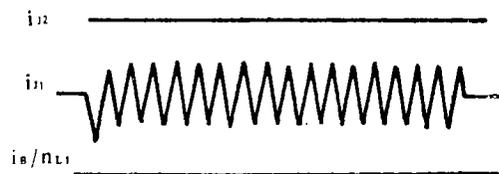


图 6 高压侧 A—C 两相短路波形图

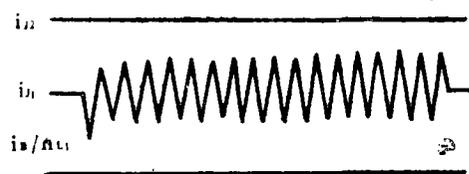


图 7 高压侧 A—C 两相接地短路波形图

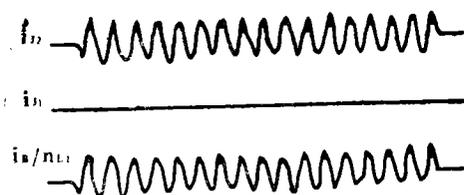


图 8 高压侧 B 相接地短路波形图

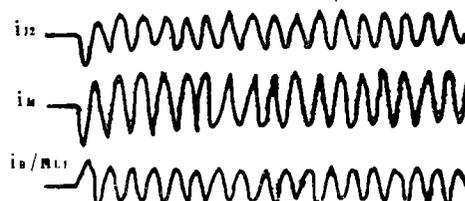


图 9 低压侧 e—c 短路波形图

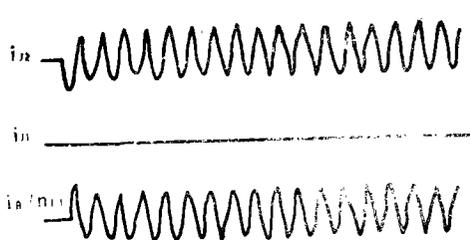


图10 低压侧d—c短路波形图

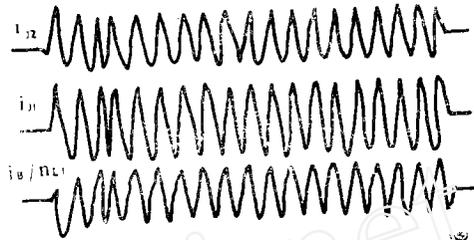


图11 低压侧d—e—c短路波形图

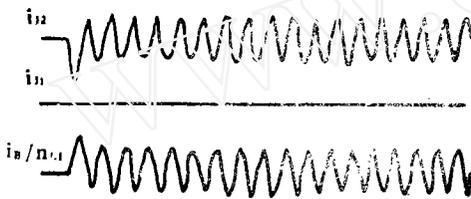


图12 低压侧a—b短路波形图

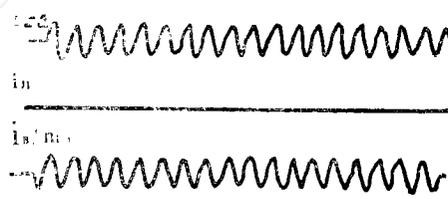


图13 低压侧b—e短路波形图

各种类型内部短路波形图均可按每格1.3 A计算二次电流。由各类录波图可以看出,图13中平衡变压器低压侧支臂 β -e短路时,流入差动继电器的工作电流最小,换算到额定条件下短路, $I_{11} \approx 10\text{A}$,差动继电器将灵敏、可靠动作。其它类型的内部短路,因短路电流更大,将使差动继电器动作的灵敏性更高。

4 结 论

1. 本文根据阻抗匹配平衡变压器的结构特点,高低压侧电流在正常运行和短路情况下的分布规律,提出的一种新颖的阻抗匹配变压器差动保护接线方式,原理是正确的,方案是可行的,动模试验结果也充分证明了这一点。

2. 本文提出的阻抗匹配平衡变压器差动保护接线方式,电路简单,功能完善,它可以保证正常运行及外部故障时,差动保护可靠不动作,而反应各种内部故障将灵敏、可靠动作,满足了变压器差动保护对接线方式的各种要求。

3. 本文提出的差动保护接线方式可适用于电气化铁道阻抗匹配平衡变压器的差动保护,也可用于原理类似的其它型式平衡变压器。采用该接线方式构成差动保护,差动继电器的整定计算原则与普通Y/ Δ -11变压器类似。

参 考 文 献

- [1] 刘福生、聂光前. 《铁道学报》. 1988(4) 16~22.
- [2] 刘福生、左辰. 《电网技术》. 1989(1) 26~32.
- [3] 刘福生等. 《阻抗匹配平衡变压器短路计算》1990.10.
- [4] 贺家李等. 《电力系统继电保护原理》 1980.