

大容量电炉变压器保护差动方案比较

温靖华, 刘志远

(宁夏电力公司调度通信中心, 宁夏 银川 750001)

摘要: 针对电炉变压器特殊结构难以实现常规差动保护的问题,采用新型电子式互感器,实现了电炉变压器低压侧电流的采集;并通过分析计算,设计了电炉变压器差动保护配置方案。结果表明:电炉变压器三侧纵差与高压侧分差构成逻辑“或”门输出,是电炉变压器差动配置的最佳方案。

关键词: 电炉变压器; 差动保护; 配置方案; 动作特性

中图分类号: TM429 **文献标志码:** B **文章编号:** 1672-3643(2012)04-0015-06

Comparison and analysis on differential protection schemes of large capacity electric furnace transformer

WEN Jinghua, LIU Zhiyuan

(Dispatching Communication Center of Ningxia Electric Power Corporation, Yinchuan Ningxia 750001, China)

Abstract: Aiming at the problem of common differential protection difficult to realize for electric furnace transformer, adopting new type of electronical mutual inductor, realizes electric current collection in low voltage side of electric furnace transformer; by analyzing and calculating, designs the differential protection allocation scheme of electric furnace transformer. The result shows that the three side longitudinal differential protection and high voltage branch side differential protection forming ‘OR’ logic differential protection is the best differential protection allocation scheme for electric furnace transformer.

Key words: electric furnace transformer; differential protection; allocation scheme; action performance

由于电炉变压器低压绕组具有低电压和大电流的特性,其工作电流与短路电流之间没有明显的量值区别,仅从变压器高压侧电流互感器测量的电流值无法从根本上区分故障电流和负荷电流,也无法区分发生故障的位置在区内还是区外,致使高压侧过流保护的定值很难计算:定值过高则不能检测变压

器的内部故障,降低了保护的灵敏度,不利于电炉变压器的安全;定值过低则容易引起保护误动,造成不必要的损失。因此有必要在变压器低压侧增加电流互感器以实现电炉变压器差动保护,本文就不同的差动配置方案进行详细的比较分析,并分析比较了不同方案的整定计算原则及动作特性,提出了最佳

收稿日期: 2012-04-12

作者简介: 温靖华(1968)女,高级工程师,从事继电保护整定计算工作。

差动配置方案。

1 大容量电炉变压器的结构特点

大容量的电炉变压器基本是三线圈:高压为电源侧,与电力系统相连;中压侧除起调压作用外,其输出电压还供电给补偿电容器负载;低压侧供电给电炉负载。电炉变压器与电力变压器相比,它的显著特点是:二次电压低、电流大,而且调压范围宽(通常为25%~50%)。在运行过程中,需要改变二次电压,一般采用变磁通调压、串联变压器调压、自耦变压器调压三种方法^[1]。电炉变压器按结构形式又可分为主变压器加串联变压器和共铁心式主调合一的结构形式^[2],本文主要针对串联变压器调压进行说明。

2 大容量电炉变压器差动保护配置方案

首先实现低压侧电流的采集,由于大容量电炉变压器具有低压侧电流极大、动态范围宽、多路电流并联输出、空间狭小等特点,采用传统的铁心式电流互感器很难应用于电炉变压器的低压侧。利用电子互感器可采集到电炉变压器低压侧一次电流,然后转化成模拟量小信号输出到模拟量采集器,采集器将采集到的小信号模拟量转为符合“IEC 61850”标准的固定帧格式的数字量,通过光纤接入保护装置。实现差动配置有两种方案^[2-3]。

方案1:采用分侧差动配置

即高、中、低分侧差动保护,各侧各相的首端电流为 $\dot{I}_T$,中性点电流为 $\dot{I}_\Phi$;各侧差动保护都采用比率制动式,三相式“或”门输出。

$$\begin{cases} \text{差动电流 } I_{OP} = |\dot{I}_T + \dot{I}_\Phi| \\ \text{制动电流 } I_{res} = \frac{|\dot{I}_T + \dot{I}_\Phi|}{2} \end{cases} \quad (1)$$

以串联变压器调压的电炉变压器为例来说明分侧差动保护所用电流互感器LH的配置,如图1所示。共配置1LH~6LH三相6组共18台单相电流互感器。

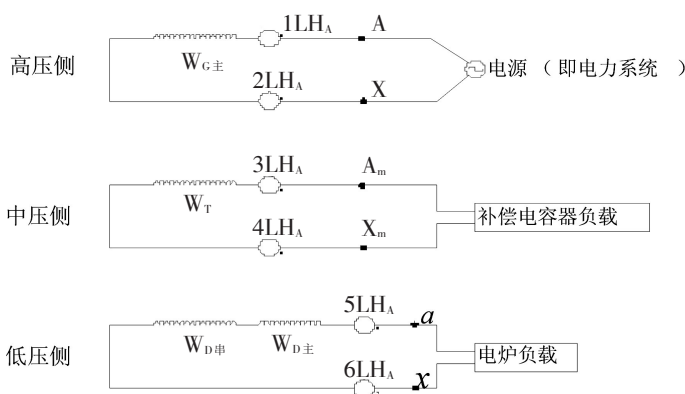


图1 电炉变压器分侧差动保护A相所用LH配置
(其他B、C两相同理)

方案2:采用三侧差动配置

保护装置混合接入高、中压侧常规电磁式互感器二次电流模拟量经A/D转换以及低压侧电流数字量,实现基于三侧电流的纵联差动保护。如图2所示。

3 大容量电炉变压器差动方案分析

3.1 分侧差动方案分析

3.1.1 高压侧分侧差动的整定计算分析及动作特性

如图1,1LH、2LH组成高压侧分侧差动保护。分侧差动每相的2个LH装在同一侧的同1个支路内,对保护整定计算很有利,2个LH同型号,正常运行及外部短路时变压器分接头改变不影响保护的不平衡电流(I_{unb}),故整定计算中无 ΔU 、 Δm 系数,这一点对电炉变压器特别重要,因电炉变压器分接头调整范围极大,可达 $\pm(20 \sim 25)\%$,而一般电力变压器仅为 $\pm 5\%$ 。

高压侧分侧差动保护的最大整定值($I_{OP \cdot set \cdot max}$)需躲开中压侧补偿电容器端部三相短路所出现的最大三相短路电流 $I_{d \cdot max}$ 对应的最大不平衡电流 $I_{unb \cdot max}$,确保高压侧分侧差动保护可靠地不误动,不跳开高压侧断路器,此时只需电容器保护动作跳开电容器出口的断路器^[4]。

$$I_{OP \cdot set \cdot max} = K_{rel} I_{unb \cdot max} = K_{rel} K_{CC} K_{er} K_{ap} I_{d \cdot max}^{(3)} \quad (2)$$

式中: K_{rel} —可靠系数,取1.3~1.5;

K_{CC} —同型系数,取1;

K_{er} —2个LH的变比误差的差异系数,取0.1;

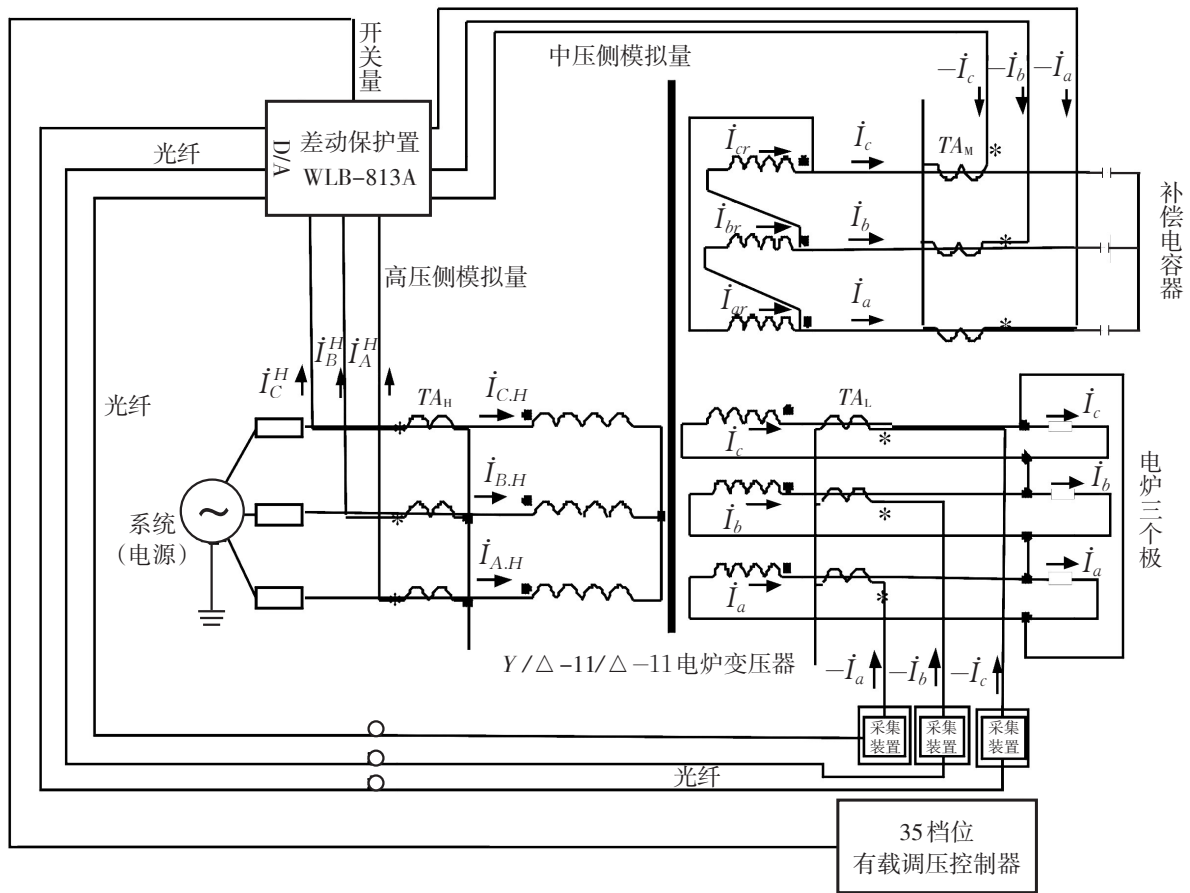


图2 电炉变三侧差动保护外部接线

K_{ap} — 计算得出的 $I_{d \cdot \max}^{(3)}$ 仅为短路电流的周期分量,需计及非周期分量,取 $K_{ap}=1.5 \sim 2$ 。

取 $K_{rel}=1.5$ 、 $K_{CC}=1$ 、 $K_{cr}=0.1$ 、 $K_{ap}=2$, 设 $I_{d \cdot \max}^{(3)}=5I_n$, I_n 为电炉变压器高压侧额定电流。

电炉变压器分侧差动,类似于发电机差动,故取 $I_{OP \cdot 0}=0.3I_n$, $I_{res \cdot 0}=0.8I_n$

$$\begin{aligned} I_{OP \cdot \text{set} \cdot \max} &= K_{rel} K_{CC} K_{cr} K_{ap} I_{d \cdot \max} \\ &= 1.5 \times 1 \times 0.1 \times 2 \times 5I_n = 1.5I_n \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k &= \frac{I_{OP \cdot \text{set} \cdot \max} - I_{OP \cdot 0}}{I_{d \cdot \max}^{(3)} - I_{res \cdot 0}} = \frac{1.5I_n - 0.3I_n}{5I_n - 0.8I_n} \\ &= 0.285 \\ &\approx 0.3 \end{aligned}$$

若设 $I_{d \cdot \max}^{(3)} = 3I_n$ (因电炉变压器为高漏抗变压器,且其高压侧有时装有串联电抗器以减少短路电流,故可能 $I_{d \cdot \max}^{(3)}$ 值小) 则 $I_{OP \cdot \text{set} \cdot \max} = 0.9I_n$

$$k = \frac{0.9 - 0.3}{3 - 0.8} = 0.27 \approx 0.3$$

若设 $I_{d \cdot \max}^{(3)} = 8I_n$, 则 $I_{OP \cdot \text{set} \cdot \max} = 2.4I_n$,

$$k = \frac{2.4 - 0.3}{8 - 0.8} = 0.29 \approx 0.3$$

以上分析得出高压侧分侧差动保护的定值应为:

$$I_{op,0} = 0.3I_n, I_{res,0} = 0.8I_n, k = 0.3$$

k 不宜大于 0.3, 因为按有关因素以最大系数计算 ($K_{rel}=1.5$ 、 $K_{ap}=2$ 、 $I_{d \cdot \max}^{(3)} \cdot \text{外} = 8I_n$), 得 $k=0.3$ 。其动作特性如图 3 所示。

电炉变压器虽然分接头 ΔU 很大,但由于采用分侧差动保护,其 k 值比采用高低压侧 LH 组成的一般电力变压器纵差保护的 k 值低,比发电机纵差保护也低。

3.1.2 中压侧分侧差动的整定计算分析及动作特性

如图 1, 3LH、4LH 组成中压侧分侧差动保

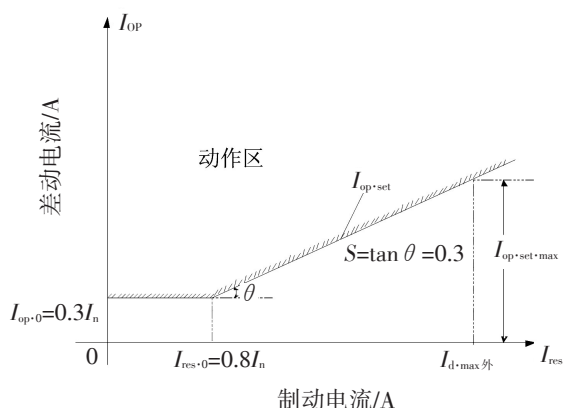


图3 电炉变压器高压侧分侧差动保护动作特性

护。同理,中压侧分侧差动保护的最大整定值 $I_{OP,set,max}$ 也需躲开中压侧补偿电容器端部三相短路所出现的最大三相短路电流 $I_{d,max}$ 对应的最大不平衡电流 $I_{unb,max}$,确保中压侧分侧差动保护可靠地不误动。同理中压侧分侧差动保护的定值(标么值)与高压侧分侧差动保护的定值完全相同,为: $I_{OP,0} = 0.3I_n$, $I_{res,0} = 0.8I_n$, $k = 0.3$,其动作特性如图3所示。

3.1.3 低压侧分侧差动的整定计算分析及动作特性

如图1,5LH、6LH组成低压侧分侧差动保护。

电炉变压器低压侧出口与电炉负载之间无断路器,当电炉本身及其引出线短路时,允许电炉变压器低压侧的分侧差动保护动作跳开高压侧的断路器。也就是低压侧分侧差动保护的 $I_{OP,set,max}$ 无需躲开电炉本身三相短路所对应的最大不平衡电流 $I_{unb,max}$,只需躲开低压侧最大负荷电流 $I_{fh,max}$ 时的不平衡电流 I_{unb} ,容许低压侧分侧差动保护外部(即电炉本身及其引出线)短路时 $I_{OP} = I_{unb,max} > I_{OP,set,max}$,低压侧分侧差动保护动作,跳开高压侧断路器。因此低压侧分侧差动保护的 $I_{OP,set,max}$ 为:

$$I_{OP,set,max} = K_{rel} I_{unb} = K_{rel} K_{CC} K_{er} I_{fh,max} \quad (3)$$

式中, $I_{fh,max}$ 为最大负荷电流的稳态值,不是外部短路电流的初始值,故(3)式中无非周期分量系数 K_{ap} 。

最大负荷电流 $I_{fh,max}$ 出现在电炉冶炼熔化期, $I_{fh,max}$ 值根据实际运行确定。

设 $I_{fh,max} = 2.5I_n$, I_n 为电炉变压器低压侧的额定电流。

又同理 $I_{OP,0} = 0.3I_n$, $I_{res,0} = 0.8I_n$,

$$I_{OP,set,max} = K_{rel} K_{CC} K_{er} I_{fh,max} \quad (4)$$

$$= 1.5 \times 1 \times 0.1 \times 2.5I_n = 0.375I_n$$

$$k = \frac{I_{OP,set,max} - I_{OP,0}}{I_{fh,max} - I_{res,0}} \quad (5)$$

$$= \frac{0.375 - 0.3}{2.5 - 0.8} = 0.04$$

理论上应取 $k = 0$ 。但为了提高 $I_{fh,max}$ 时不误动的可靠性,取 $k = 0.15$ 较适合。

$I_{res} > I_{fh,max}$ 时, $k = 0$,动作特性成为一条水平线,维持 $I_{OP,set} = I_{OP,set,max}$ 不变, $I_{OP,set}$ 不再增大(如图4),提高了低压侧分侧差动保护在外部(即电炉)短路时动作的可能性。

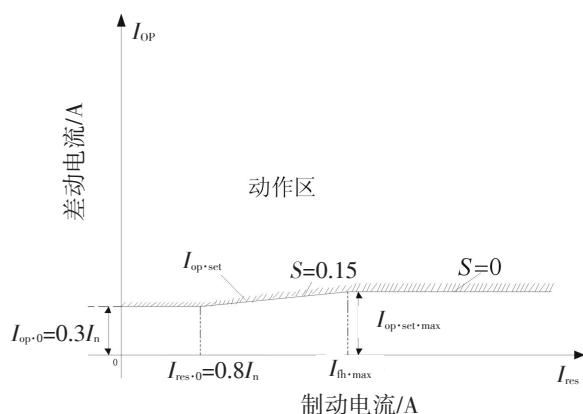


图4 电炉变压器低压侧分侧差动保护动作特性

通过分析可以得到低压侧分侧差动保护的整定值应为:

$I_{OP,0} = 0.3I_n$, $I_{res,0} = 0.8I_n$, $I_{fh,max}$ 根据实际整定。

$I_{res} < I_{res,0}$ 时, $k = 0$;

$I_{res,0} < I_{res} < I_{fh,max}$ 时, $k = 0.15$;

$I_{res} > I_{fh,max}$ 时, $k = 0$ 。

动作特性见图4。

3.1.4 分侧差动保护的优缺点

根据以上分析可以得出分侧差动的优点:

(1)电炉变高压侧系统一般为中性点直接接地系统,高压侧的分侧差动对高压绕组单相接地动作快速且灵敏度很高,无死区,灵敏度基本与高压绕组内部接地点的位置无关;

(2)电炉变压器为高漏抗变压器且其高压侧往往装有串联电抗器以减小短路电流,内部短路时短路电流较小,甚至与最大负荷电流相近,而分侧差动保护计算中无需考虑 ΔU 、 Δm 系数,而且

低压侧定值只需躲开 $I_{fh,max}$, 不必躲开 $I_{d,max}$ 等, 从而使分侧差动的 k 值小, 灵敏度高;

(3) 分侧差动保护的 2 个 LH 处于同一侧、同一个分支绕组的首端及中性点端, 各侧差动保护不受励磁涌流的影响, 在软件中省去二次谐波制动等反涌流措施, 提高保护动作的快速及可靠性;

(4) 一般的三侧差动, 当变压器为 Y/△ 接线方式时, 为了使正常运行及外部短路时减少不平衡电流, 保护软件中需采取校正电流的措施, 而分侧差动的 2 个电流取自同一相绕组的首尾端, 与 Y 接、△ 接无关, 无需采取电流校正的措施。

3.1.5 分侧差动保护的缺点

(1) 采用的 LH 数量多, 三侧共计 18 个。

(2) 由 3 个单相电炉变压器组成 1 台三相电炉变压器运行, 最常规的故障之一是绕组的匝间短路, 而分侧差动的主要缺点是不能保护各侧绕组的匝间短路。

3.2 三侧差动方案分析

3.2.1 不具备开关量自适应改变平衡系数特性的三侧差动分析

优点:

采用的 LH 数量少, 三侧共计 9 个 LH。

缺点:

(1) 电炉变压器分接头很多 (如 35 个) 且调整范围广, 最大为 $\pm 25\%$, 如果三侧差动保护不采用特殊措施, 则纵差保护整定计算中系数 $\Delta U = 0.25$, 三侧差动保护的 $I_{OP,set,max}$ 为

$$I_{OP,set,max} = K_{rel} I_{unb,max} = K_{rel} (K_{ap} K_{CC} K_{er} + \Delta U + \Delta m) I_{d,max,gz} \quad (6)$$

式中 $I_{d,max,gz}$ 为电炉冶炼的熔化期频繁出现的正常工作短路电流, 其值为电炉变额定电流的 2~5 倍, 要求纵差保护躲开 $I_{d,max,gz}$ 对应的不平衡电流, 保证可靠不误动。为了与分侧差动合理比较, 除 ΔU 、 Δm 外, 其他各系数的值与 (2) 式的选值相同。取

$K_{rel} = 1.5, K_{ap} = 2, K_{CC} = 1, K_{er} = 0.1, \Delta U = 0.25, \Delta m = 0.05, I_{d,max,gz} = 5I_n$ 得:

$$I_{OP,set,max} = 1.5(2 \times 1 \times 0.1 + 0.25 + 0.05) \times 5I_n = 3.75 I_n$$

又取 $I_{OP,0} = 0.4 I_n$ (因三侧差动考虑有 ΔU 、 Δm

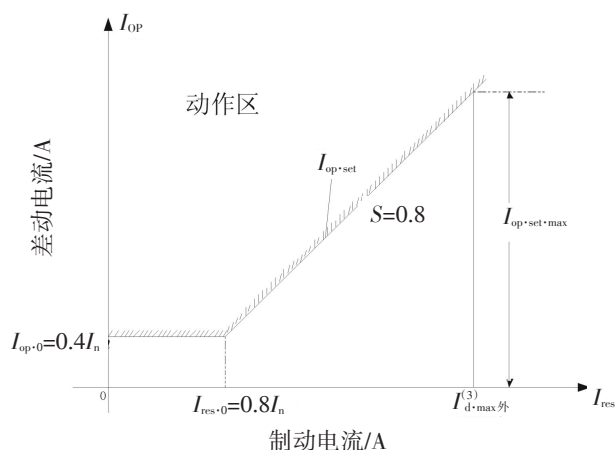


图5 电炉变压器采用三侧差动保护(无开关量自适应改变平衡系数)动作特性

系数, 故 $I_{OP,0}$ 比 (1) 式项的 $I_{OP,0}$ 大)。 $I_{res,0} = 0.8 I_n$ 。

$$k = \frac{I_{OP,set,max} - I_{OP,0}}{I_{d,max} - I_{res,0}} = \frac{3.75 - 0.4}{5 - 0.8} = 0.798 \approx 0.8 \quad (7)$$

又三侧差动的制动电流为

$$I_{res} = \text{Max} [I_A, I_B, I_C] \quad (8)$$

式中, I_A, I_B, I_C 为电炉变压器高压侧 (电源侧) 的相电流。

比较图 3 (分侧差动) 与图 5 (三侧差动) 内部短路时的动作性能如下:

设电炉变压器高压绕组内部相间短路 $I_d = 4 I_n$, 根据图 3 的动作特性得到

$$I_{res} = \frac{1}{2} I_d = \frac{1}{2} \times 4 I_n = 2 I_n \quad (9)$$

此 I_{res} 对应的

$$I_{OP,set} = I_{OP,0} + k(I_{res} - I_{set,0}) = 0.3 I_n + 0.3(2 I_n - 0.8 I_n) = 0.96 I_n \quad (10)$$

$$I_{OP} = I_d = 4 I_n$$

高压侧分侧差动保护动作的灵敏度

$$K_{lmd} = \frac{I_{OP}}{I_{OP,set}} = \frac{4 I_n}{0.96 I_n} = 4.17 \quad (11)$$

根据图 5 的动作特性得到:

$$I_{res} = \text{Max} [I_A, I_B, I_C] = I_d = 4 I_n \quad (12)$$

此 I_{res} 对应的

$$I_{OP,set} = I_{OP,0} + k(I_{res} - I_{res,0}) = 0.4 I_n + 0.8(4 I_n - 0.8 I_n) = 2.96 I_n$$

$$I_{OP} = I_d = 4 I_n$$

三侧差动保护动作的灵敏度

$$K_{\text{imd}} = \frac{I_{\text{OP}}}{I_{\text{OP} \cdot \text{set}}} = \frac{4 I_n}{2.96 I_n} = 1.35 \quad (14)$$

规程要求变压器纵差保护的 $K_{\text{imd}} > 2$, 三侧差动保护不符合要求。

可见, 电炉变压器不能采用高、中、低压侧 LH 组成的无开量自适应改变平衡系数的三侧差动保护。

(2) 三侧差动保护受励磁涌流的影响, 保护软件需反涌流措施, 计算量多, 使保护的快速性及可靠性降低。

(3) 电炉变压器若为 Y/Δ 接线, 三侧差动保护软件需有校正外部短路及正常运行时两侧电流相等的措施。

3.2.2 具有开量自适应改变平衡系数特性的三侧差动

3.2.2.1 优点

电炉变压器调压绕组有许多分接头 (如 35 个), 当分接头改变时以开量自适应地改变大差动的平衡系数, 则纵差整定计算中所用的系数可以大大降低, 例如 35 个分接头, 理论上 $\Delta U = \frac{1}{35} = 0.03$ 。以 $\Delta U = 0.05$, 按差动躲开低压侧电炉最大正常工作短路电流的原则进行整定计算, 得差动的比率制动斜率 k 仅为 0.3。因此, 三侧差动只需按躲开中压侧最大外部三相短路电流的原则整定, 中压侧输出到补偿电容器的电压是稳定的, 不受调压分接头改变的影响, 其 $\Delta U = 0$, 计算得到的斜率 $k = 0.5 \sim 0.6$, 能保证在三侧差动保护范围内部相间短路时动作灵敏度较高, 匝间短路时有相当的灵敏度。

3.2.2.2 缺点

大容量电炉变压器高压侧的系统为中性点直接接地系统, 当高压绕组单相接地短路时要求电炉变压器保护快速跳闸。但是不管电炉变压器高压绕组中性点是否接地运行, 三侧差动保护对高压绕组单相接地短路有死区, 接地点位于高压绕组的首端时灵敏度最高, 接地点越靠近中性点灵敏度越低。其本质原因是低压侧为特殊的三角形接线, 高压侧的零序电流能感应到低压侧, 低压侧 TA 能测量出此零序电流, 致使当高压绕组内部单

相接地短路时, 三侧差动保护感受到的是幅值不等的穿越性电流, 这是造成保护灵敏度不高、有死区的主要因素。

4 结论

(1) 大容量电炉变压器几乎全部由 3 个单相变压器组成 (A、B、C 各相有自己独立的油箱), 其主要短路故障是绕组匝间短路及高压绕组的单相接地短路。因此电炉变压器纵差保护的 best 方案为高压侧的分侧差动与三侧 TA 组成的纵差构成逻辑“或”门输出, 能达到互相取长补短的功效。

(2) 高压侧的分侧纵差能以很高的灵敏度保护高压绕组的单相接地短路, 弥补三侧 TA 的纵差对高压绕组单相接地短路保护灵敏度低、有死区的缺点; 而后者能以相当的灵敏度保护各侧绕组的匝间短路, 弥补前者对保护匝间短路无能为力的缺点。后者对保护各侧绕组相间短路的灵敏度较高, 而前者对高压绕组相间短路的灵敏度更高, 有局部双重化保护意义。

(3) 只需在低压侧三相输出端安装电子式电流互感器, 而高中压侧三相输出端及高压绕组中性点的 TA 可以采用价格较便宜的传统的电磁式电流互感器, 在造价成本上并不高, 对于冶金、化工企业已运行的大容量电炉变压器都可以采用这种模式进行改造, 可提高设备的安全性和电网的稳定性, 具有良好的市场应用前景。

参考文献:

- [1] 刘福斌. 串联变压器调压的电炉变压器设计 (上) [J], 变压器, 2000, 37(9): 14-17.
- [2] 崔产君, 管永利. 共铁心式主调合一单相电炉变压器的调压原理及电路和磁路分析, 变压器 [J]. 1995, (2): 2-5.
- [3] 邓茂军, 吴起, 陈亮, 等. 基于电子式互感器的电炉变压器差动保护研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 114-118.
- [4] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1994.