

串变调压电炉变压器差动保护研究

栗磊¹, 宋小会², 刘星³, 梁亚波¹, 李国斌³, 姜睿智³, 郭志忠²

(1. 国网宁夏电力科学研究院, 宁夏 银川 750001; 2. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
3. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 针对电炉变压器频繁调压且调压范围宽的特点, 提出根据当前电炉变压器有载调压档位实时计算差动保护的平衡系数方法。该方法首先将3个单相电炉变压器档位信息经有载调压档位控制器转换为BCD码信息; 然后差动保护装置通过开关量方式接入转换后的BCD码信息, 并解码还原为当前实际档位; 最后根据变压器调压总档位、各相变压器当前档位、低压侧标称最高电压及最低电压, 计算各相变压器低压侧当前工作电压, 再结合变压器额定容量、高压侧额定电压, 按相实时计算差动保护平衡系数。这种方法解决了电炉变压器差动保护的差动电流计算不正确的难题, 工程实践表明该方法明显增加差动电流计算正确性提高差动保护灵敏度。

关键词: 电炉变压器保护; 纵差保护; 平衡系数; 有载调压

Research on differential protection of the furnace transformer which adopts series transformer used for voltage-regulation

LI Lei¹, SONG Xiao-hui², LIU Xing³, LIANG Ya-bo¹, LI Guo-bin³, JIANG Rui-zhi³, GUO Zhi-zhong²

(1. Ningxia Power Scientific Institute Center, Yinchuan 750001, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 3. XJ Electric Company Limited, Xuchang 461000, China)

Abstract: The three single-phase on load transformer tap changing furnace transformer has the advantages of wide voltage controlled range and frequent voltage control. This paper presents the differential protection device of the furnace transformer should calculate the balance coefficient of the differential protection in real time. First, the gear information of 3 single-phase electric furnace transformer is converted to BCD code information through the OLTC gear controller; then the differential protection device accesses the converted BCD code through switch signal and decodes the information; finally, according to the transformer voltage total gears, each phase current transformer tap, low voltage side of the highest and lowest voltage nominal voltage, each phase current working voltage of low voltage side is calculated, combined with the transformer rated capacity, rated voltage of the high voltage side, the differential current calculation is adjusted in real time according to the current tap of the furnace transformer. This method solves the differential current electric transformer differential protection calculation problem is not correct. The engineering practice shows that the methods can increase the accuracy of the differential current calculation and significantly improve the differential current protection sensitivity.

Key words: furnace transformer; differential protection of furnace transformer; balance coefficient; load voltage regulation

中图分类号: TM772 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)16-0118-04

0 引言

当前运行中的电炉变压器大多数为串变调压的电炉变压器^[1]及共铁芯式主调合一的电炉变压器^[1]。从结构上看, 电炉变压器有些为三个单相电炉变压器(每个单相变为一个油箱)组成一台三相电炉变, 3个单相电炉变压器多达105级的有载调压档位, 不仅调压范围宽, 而且频繁, 在电炉变

器运行过程中每相的档位还允许不相同。如果差动保护采用变压器一、二次绕组固定变比计算出的平衡系数参与差动电流的计算, 则势必会在电炉变调压过程中引起差动保护装置的误动, 因此, 用于电炉变压器的差动保护装置必须实时地根据变压器有载调压档位计算差动保护的平衡系数。

2010年以前国内外电炉变压器的保护都只是简单的过电流保护, 2010年许继电气公司研制成功

含有纵差的电炉变压器成套保护^[1]。本文对串变调压电炉变压器差动保护进行改进, 根据档位实时调整各相平衡系数进行电流补偿, 增加电炉变压器差动保护^[2-4]的灵敏度及可靠性。

1 串变调压的单相电炉变压器

原理接线见图 1^[1], 含主变压器及串联变压器, 主变及串变各自有独立的铁芯, 每相的两个铁芯及有关绕组装在一个油箱内。

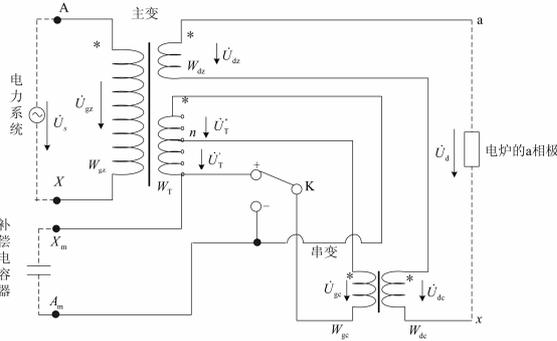


图 1 串变调压的单相电炉变压器原理接线图

Fig. 1 Elementary wiring diagram of the single-phase furnace transformer connected by a tandem on-load-tap-changing transformer

图 1 中: W_{gz} 为主变高压绕组; W_{dz} 为主变低压绕组; W_T 为主变调压绕组; W_{gc} 为串变高压绕组; W_{dc} 为串变低压绕组。

1.1 额定分接

K(+) 通, W_T 的分接头活动端 (图 1 中的 n 点) 移至 W_T 的最下端, $\dot{U}'_T = \dot{U}_{gc} = 0$, $\dot{U}_{dc} = 0$, $\dot{U}_d = \dot{U}_{dz} + \dot{U}_{dc} = \dot{U}_{dz}$ 为中间值。

1.2 正分接

K(+) 通, W_T 的分接头置于任何位置, $\dot{U}_{gc} = \dot{U}'_T$, $\dot{U}_d = \dot{U}_{dz} + \dot{U}_{dc}$, 忽略主变、串变的二次与一次间相角误差, $U_d = U_{dz} + U_{dc}$, U_d 高于中间值。

1.3 负分接

K(-) 通, W_T 的分接头置于任何位置, $\dot{U}_{gc} = -\dot{U}'_T$, \dot{U}_{dc} 为负, $\dot{U}_d = \dot{U}_{dz} - \dot{U}_{dc}$, $U_d = U_{dz} - U_{dc}$, U_d 低于中间值。

可见, 依靠 K(+) 通或 K(-) 通以及分接头的不同位置, 可使电炉变低压侧输出电压 U_d 在广泛范围内变化, 实现了调压效果。

2 根据串变调压电炉变压器当前档位实时调整平衡系数

见图 2, 有载调压控制器可把有载调压档位转

换为 BCD 码, 通过多芯电缆连接到继电保护控制室中的差动保护装置。

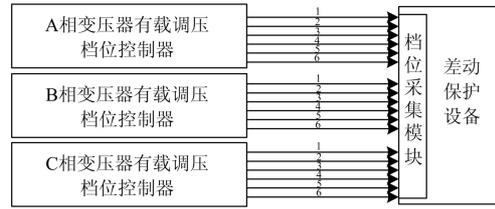


图 2 差动保护设备中档位采集模块接线图

Fig. 2 Wiring diagram of the transformer tap information collection of protection equipment

差动保护装置按开关量方式如表 1 所示接入变压器 A 相 BCD 码制信息, 按照以下方法进行解码: 每相档位信息用 6 ($A_7A_6A_5A_4A_3A_2A_1$) 个二进制数表示, 其中最高三位 ($A_7A_6A_5$ 最大为 7) 8421 码表示档位的十位数, 低四位 ($A_4A_3A_2A_1$ 最大为 9) 8421 码表示档位的个位数。

表 1 电炉变压器档位信息编码

Table 1 Transformer tap information coding of furnance transformer

档位控制器 (A 相为例) 含 BCD 码制转换		差动保护设备(A 相为例)
原始档位	编码	
01~79 级档位	分接位置个位数 2^0	低压侧档位信息 A1 开入
	分接位置个位数 2^1	低压侧档位信息 A2 开入
	分接位置个位数 2^2	低压侧档位信息 A3 开入
	分接位置个位数 2^3	低压侧档位信息 A4 开入
	分接位置十位数 2^0	低压侧档位信息 A5 开入
	分接位置十位数 2^1	低压侧档位信息 A6 开入
	分接位置十位数 2^2	低压侧档位信息 A7 开入

按同样的办法处置 B、C 相, 分别得到电炉变压器实际运行三相档位信息, 根据各相当前档位信息计算当前档位下各相低压侧工作电压, 并计算出低压侧 B、C 相相对低压侧 A 相平衡系数。

(1) 已知变压器低压侧标称最低电压为 U_{\min} , 标称最高电压为 U_{\max} , 调压总档位数为 N 。设 A 相档位为 X_a , B 相档位为 X_b , C 相档位为 X_c , U_a 为低压侧 A 相绕组当前工作电压, U_b 为低压侧 B 相绕组当前工作电压, U_c 为低压侧 C 相绕组当前工作电压。则

低压侧当前 A 相电压为

$$U_a = \frac{(U_{\max} - U_{\min}) \times (N - X_a)}{N - 1} + U_{\min}$$

低压侧当前 B 相电压为

$$U_b = \frac{(U_{\max} - U_{\min}) \times (N - X_b)}{N - 1} + U_{\min}$$

低压侧当前 C 相电压为

$$U_c = \frac{(U_{\max} - U_{\min}) \times (N - X_c)}{N - 1} + U_{\min}$$

低压侧 B、C 相相对 A 相平衡系数分别为 U_b/U_a 、 U_c/U_a 。

(2) 以高压侧额定电流为基准电流，结合电炉变压器参数计算低压侧 A 相平衡系数。

按公式 $I_e = S_n / (\sqrt{3} \times U_n \times n_{CT})$ 计算出的高压侧二次额定电流。

其中， S_n 、 U_n 、 n_{CT} 是系统参数中的“变压器铭牌最大容量”和“高压侧一次线电压”及“高压侧 CT 变比”。

按公式 $I_M = S_n / (\sqrt{3} \times U_M \times n_{CT})$ 计算出的低压侧 A 相二次额定电流。

其中， S_n 、 U_M 、 n_{CT} 是系统参数中的“变压器铭牌最大容量”和“中压侧一次线电压”及“中压侧 CT 变比”。

按公式 $I_A = S_n / (3 \times U_x \times n_{CT})$ 计算出的低压侧 A 相二次额定电流。

其中， S_n 、 U_x 、 n_{CT} 是系统参数中的“变压器铭牌最大容量”和“A 相低压侧绕组电压”及“低压侧 CT 变比”。

可得低压侧 A 相差动保护平衡系数为

$$p_A = I_e / I_A$$

中压侧平衡系数 $p_M = I_e / I_M$ 。

(3) 低压侧 A 相差动保护平衡系数分别与低压侧 B、C 相相对 A 相平衡系数相乘得到低压侧 B、C 相差动保护平衡系数。

低压侧 A 相差动保护平衡系数为

$$p_A = I_e / I_A$$

低压侧 B 相差动保护平衡系数为

$$p_B = p_A \times \left(\frac{U_b}{U_a} \right)$$

低压侧 C 相差动保护平衡系数为

$$p_C = p_A \times \left(\frac{U_c}{U_a} \right)$$

电炉变压器差动保护装置根据式 (1) 计算各相差动电流，根据式 (2) 计算各相制动电流。

$$I_{OP.A} = \left| \dot{I}_{Aj}^H + p_M \times (-\dot{I}_{Aj}^M) + (-p_A \times \dot{I}_{Aj}^L) \right| \quad (1)$$

$$I_{OP.B} = \left| \dot{I}_{Bj}^H + p_M \times (-\dot{I}_{Bj}^M) + (-p_B \times \dot{I}_{Bj}^L) \right|$$

$$I_{OP.C} = \left| \dot{I}_{Cj}^H + p_M \times (-\dot{I}_{Cj}^M) + (-p_C \times \dot{I}_{Cj}^L) \right|$$

$$I_{res.A} = \text{Max}(I_{Aj}^H, p_M \times I_{Aj}^M, p_A \times I_{Aj}^L)$$

$$I_{res.B} = \text{Max}(I_{Bj}^H, p_M \times I_{Bj}^M, p_B \times I_{Bj}^L) \quad (2)$$

$$I_{res.C} = \text{Max}(I_{Cj}^H, p_M \times I_{Cj}^M, p_C \times I_{Cj}^L)$$

其中：

\dot{I}_{Aj}^H 、 \dot{I}_{Bj}^H 、 \dot{I}_{Cj}^H 为参与纵差保护 I_{op} 、 I_{res} 软件计算的按文献[1]所述相位补偿后高压侧电流；

\dot{I}_{Aj}^M 、 \dot{I}_{Bj}^M 、 \dot{I}_{Cj}^M 为参与纵差保护 I_{op} 、 I_{res} 软件计算的按文献[1]所述相位补偿后中压侧电流；

\dot{I}_{Aj}^L 、 \dot{I}_{Bj}^L 、 \dot{I}_{Cj}^L 为参与纵差保护 I_{op} 、 I_{res} 软件计算的按文献[1]所述相位补偿后低压侧电流。

纵差保护为比率制动式，如图 3，三相式组成“或”门输出，动作方程为

$$\begin{cases} I_{op} > I_{op,0}, & \text{当 } I_{res} \leq I_{res,0} \\ I_{op} \geq I_{op,0} + S(I_{res} - I_{res,0}), & \text{当 } I_{res,0} < I_{res} \leq 6I_e \\ I_{op} \geq I_{op,0} + S(6I_e - I_{res,0}) + 0.6(I_{res} - 6I_e), & \text{当 } I_{res} > 6I_e \end{cases} \quad (3)$$

式中： I_{op} 为差动电流； $I_{op,0}$ 为纵差保护启动电流定值； I_{res} 为制动电流； $I_{res,0}$ 为最小制动电流值，取 0.8 倍的基准电流； S 为比率制动系数值，取 0.5；各侧电流的方向都以指向变压器为正方向， I_e 为变压器额定电流。

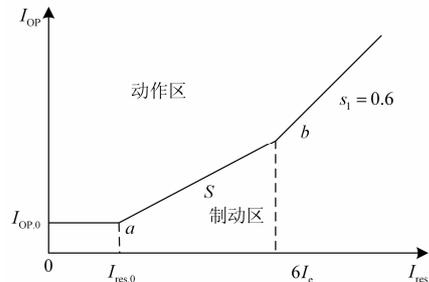


图 3 电炉变压器差动保护动作特性
Fig. 3 Operating characteristics of differential protection

3 结语

串变调压式电炉变压器根据当前档位实时计算低压侧各相平衡系数的纵差保护既简单可靠又动作灵敏度高,是电炉变最重要的主保护。

本文所述平衡系数修正方法对文献[1]所述电炉变压器保护装置差动保护计算进行了完善。产品在宁夏、陕西、四川、新疆等矿热炉使用企业进行推广,良好地应对电炉变压器频繁调压,差动保护计算随档位调节而实时进行调整,保证了保护装置差动电流计算正确性且2012年在陕西某电石冶炼企业快速、正确跳闸,减少了企业烧毁电炉变压器的可能,大大降低了企业损失。

参考文献

- [1] 姚晴林,李瑞生,刘星,等.电炉变压器成套保护装置研制[J].电力系统自动化,2012,36(17):95-102,118.
YAO Qing-lin, LI Rui-sheng, LIU Xing, et al. Development of microprocessor-based assembly protection equipment for furnace transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 95-102, 118.
- [2] 邓茂军,吴起,陈亮,等.基于电子式电流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):114-118,124.
DENG Mao-jun, WU Qi, CHEN Liang, et al. Development of microprocessor-based assembly protection

equipment for furnace transformer[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 114-118, 124.

- [3] 李瑞生,姚晴林,刘志远,等.Y0/Δ-11(或Y/Δ-11)变压器保护的低压启动新方案研究[J].电力系统保护与控制,2012,40(2):111-115,140.
LI Rui-sheng, YAO Qing-lin, LIU Zhi-yuan, et al. Comment on the research of electronic current transformers[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 111-115, 140.
- [4] 邓茂军,姚东晓,倪传坤,等.基于电子式互感器的变压器励磁涌流识别方法[J].电力系统保护与控制,2013,41(18):149-153.
DENG Mao-jun, YAO Dong-xiao, NI Chuan-kun, et al. Inrush current recognition in power transformer based on electronic transformer[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(18): 149-153.

收稿日期:2013-11-06; 修回日期:2013-12-25

作者简介:

栗磊(1982-),男,工程师,研究方向为电力系统继电保护;

宋小会(1970-),男,博士,研究方向为智能电网及继电保护原理;

刘星(1972-),男,高级工程师,主要研究方向为电力系统继电保护。