

双卷变压器平衡绕组回路分析及其对继电保护的影响

黄超, 刘斌

(广西电网电力调度中心, 广西 南宁 530023)

摘要: 工程中部分忽视平衡绕组的做法给平衡绕组双卷变压器的安全运行带来了隐患。因此,在总结平衡绕组双卷变压器参数录入的基础上,分析平衡绕组对正序、零序回路的影响,研究了平衡绕组对变压器抗短路能力及继电保护的影响。修正并完善了与平衡绕组双卷变压器相关的继电保护整定计算原则,从继电保护角度保证了平衡绕组双卷变压器及电网的稳定运行。

关键词: 双卷变压器; 平衡绕组; 回路分析; 继电保护; 整定计算

中图分类号: TM 41; TM 77

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.12.029

0 引言

在电力系统迅猛发展的过程中,变压器一直为最重要的设备之一。为了保证变压器可靠的供电质量、改善变压器感应电动势波形以及减少零序漏磁通在变压器结构件中产生的局部过热,变压器低压侧通常采用三角形接线(d)绕组^[1-2]。而对于仅连接于 2 个电压等级间的双卷变压器(常见于高压侧为 110 kV 及以上电压等级且中性点直接接地、低压侧为 35 kV 及以下电压等级且中性点不接地的情况),在保证上述技术要求的同时,为节约变压器制造成本,常增设更低电压等级(常为 10 kV)的三角形接线绕组,即平衡绕组^[3]。

带平衡绕组的双卷变压器本质上为三卷变压器,但因平衡绕组侧无引出线及相应母线,习惯上称之为双卷变压器带平衡绕组(本文简称为平衡双卷变压器)。国标及规程未对平衡双卷变压器进行详细规定^[4],因此工程中常将其归入双卷变压器属性,设备选型及继电保护配置均相应地按双卷变压器考虑,即部分忽视了平衡绕组的作用;且平衡绕组本身具有一定的封闭性,处于变压器中较隐蔽的位置,运行检修维护人员对其关注较少。平衡双卷变压器多应用于连接电厂及大用户(如工业负荷),因此一旦发生事故,后果往往较严重,经济损失较大。已经发生的与平衡绕组相关的事故^[5-8]说明按普通双卷变压器来衡量平衡双卷变压器存在不足及安全隐患,但已有文献多从变压器制造本身予以改进,从电网角度进行分析的较少。

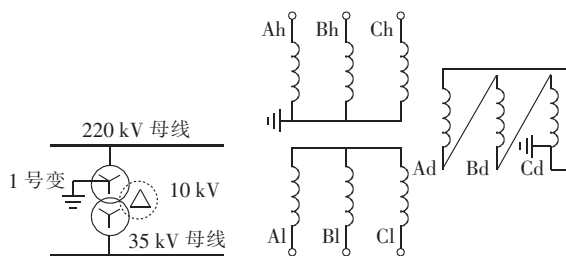
鉴于此,本文以广西电网中逐年增多的平衡双卷变压器(220 kV/35 kV + 10 kV 或 110 kV/35 kV + 10 kV,接线为 YNyn0+d)为例,通过分析平衡双卷变压器的正、零序回路,总结了其抗短路能力及对继电保护的影响,提出了相关的继电保护定值整定计算修正原则,为平衡双卷变压器在电网中的安全稳定运行

提供了理论支撑与实际指导,具有参考价值。

1 平衡双卷变压器参数录入

平衡双卷变压器示意图及对应的绕组结构见图 1,其具有以下特征:

- 10 kV 平衡绕组并无对应母线,即不带负荷;
- 高压侧中性点直接接地,低压侧中性点不接地(35 kV 侧为不接地系统,本文假定该侧系统为纯负荷),平衡绕组为零序网络提供通路;
- 平衡绕组为 3 次谐波提供通路^[9],保证感应电动势接近正弦波;
- 为了避免平衡绕组三相电位悬浮及便于检测吊装,平衡绕组通过 1 只或若干只套管引出后单点接地^[10]。



(a) 平衡双卷变压器示意图 (b) 平衡双卷变压器绕组结构图

图 1 平衡双卷变压器示意图

Fig.1 Schematic diagram of two-winding transformer with balancing winding

平衡双卷变压器参数(包括额定容量、电压、电流、铁芯结构、正序/零序电抗等)是进行潮流分析、故障分析、保护定值计算等工作的基础,完整的电抗参数如图 2(a)、(b)所示。与三卷变压器类似,平衡双卷变压器的高压、低压、平衡绕组侧正序和零序电抗分别记为 X_{h1} 、 X_{h2} 、 X_{h3} 和 X_{h0} 、 X_{h0} 、 X_{h0} , 高压侧系统等值正序、零序电抗分别为 X_{s1} 、 X_{s0} 。目前,国内多数继电保护定值计算软件在录入平衡双卷变压器的参数时存在以下两方面问题。

(1) 变压器厂家方面的问题。

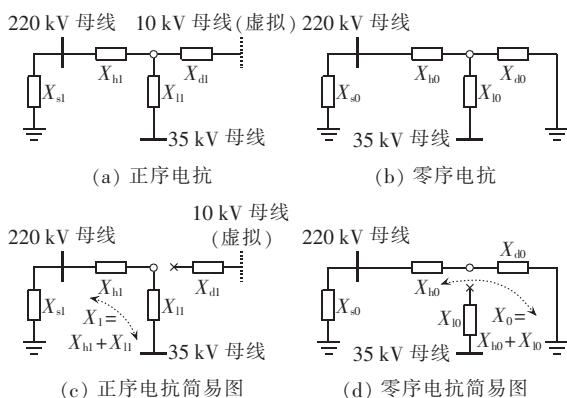


图 2 平衡双卷变压器电抗图

Fig.2 Reactance diagram of two-winding transformer with balancing winding

a. 正序电抗: 尽管部分文献提及高压侧、低压侧和平衡绕组侧的正序电抗值^[4-5], 但厂家提供的出厂试验报告多数仅有短路电压百分比 $u_{k(h-1)}\%$ 这个参数, 即对应图 2(c) 中的 $X_1 = X_{h1} + X_{d1}$ 。考虑到平衡绕组侧无负荷, 正常运行时 X_{d1} 不发挥作用, 故出厂试验报告中略去该值, 这给故障分析及保护整定留下了隐患。

b. 零序电抗: 试验报告按三卷变压器实测得出高压侧、低压侧和平衡绕组侧的零序电抗, 当低压侧中性点不接地时 (如图 1 所示), 零序电抗实际可简化为图 2(d), 即采用高压侧加电、低压侧开路时的测量电抗值 $X_0 = X_{h0} + X_{d0}$ 。

(2) 定值整定计算软件方面^[11]的问题。

定值整定计算软件虽然提供了四卷变压器 (即三卷变压器带平衡绕组) 模型, 但平衡双卷变压器无对应模型, 仅能用普通双卷变压器或三卷变压器进行等效。若采用双卷变压器模型, 考虑到零序通路, 必须将其设置为 YNd 接线形式, 这与平衡双卷变压器低压侧实际为 Y 型接线不符, 故建议用三卷变压器模型进行等效: 若出厂试验报告提供各侧阻抗, 则按厂家数据录入; 若出厂试验报告取简化情形, 则建议 X_{h1} 取 X_1 , X_{h1} 取极小值, X_{d1} 取极大值, X_{h0} 取 X_0 , X_{h0} 取极大值或任意值 (通过方式设置使低压侧中性点不接地), X_{d0} 取极小值。

通过上述处理对平衡双卷变压器进行等效, 保证了其零序回路由高压侧与平衡绕组侧连接构成, 正序回路由高压侧与低压侧连接构成, 但正序等效回路中仍存在故障分析及保护整定隐患。

2 平衡绕组对零序回路的影响

平衡绕组主要为零序回路提供通路, 具体从 2 个方面考虑其影响。

a. 对保护的影响。 由图 2(b)、(d) 可知, 平衡双卷变压器的零序回路仅由高压侧与平衡绕组侧构

成, 即等价于 YNd 型接线的双卷变压器。因此平衡双卷变压器的高压侧出线零序电流保护、接地距离保护、高压侧母线保护、高压侧 (中性点) 零序电流保护均可按现有规程进行整定。

b. 对平衡绕组抗短路能力的影响。 平衡双卷变压器与普通双卷变压器的重要区别在于平衡绕组容量。为节省成本, 平衡绕组侧容量通常较小, 目前无相应国家标准, 工程实际中常取变压器额定容量的 33% 或 50% (普通双卷变压器则多为额定容量的 50% 或 100%)。变压器抗短路校核通常采用最严重故障情况即三相短路, 而正常运行或发生三相短路时, 流过平衡绕组的电流接近于 0, 只有在发生不对称接地故障时, 平衡绕组才有零序电流环流。因此平衡双卷变压器在设计选型时经常忽视平衡绕组的抗短路能力, 从而留下隐患。下文将对发生不对称故障时的零序环流作详细分析。

考虑最苛刻情形, 在大方式下将故障点设置在高压侧母线, 计算值均为标幺值, 系统负序电抗等于正序电抗, 利用对称分量法进行故障分析。

发生单相接地故障 (A 相) 时, 流过故障点和平衡双卷变压器的零序电流分别为:

$$I_{fA0}^{(1)} = \frac{1}{2X_{s1} + X_{s0}/X_0} \quad (1)$$

$$I_0^{(1)} = \frac{X_{s0}}{X_{s0} + X_0} I_{fA0}^{(1)} = \frac{1}{2X_{s1}(1 + X_0/X_{s0}) + X_0} \quad (2)$$

发生两相接地故障 (BC 相) 时, 流过故障点和平衡双卷变压器的零序电流分别为:

$$I_{fA0}^{(1,1)} = \frac{1}{X_{s1} + X_{s1}(X_{s0}/X_0)} \frac{X_{s1}}{X_{s1} + X_{s0}/X_0} \quad (3)$$

$$I_0^{(1,1)} = \frac{X_{s0}}{X_{s0} + X_0} I_{fA0}^{(1,1)} = \frac{1}{X_{s1}(1 + X_0/X_{s0}) + 2X_0} \quad (4)$$

将式 (2)、(4) 的倒数作差, 得式 (5):

$$\Delta = \frac{1}{I_0^{(1)}} - \frac{1}{I_0^{(1,1)}} = X_{s1}(1 + X_0/X_{s0}) - X_0 \quad (5)$$

由式 (5) 可得如下结论。

(1) 若主网系统无穷大, 即 $X_{s1} \rightarrow 0$, $X_{s0} \rightarrow 0$, 则

$$I_0^{(1)} \approx I_0^{(1,1)} \approx \frac{1}{3X_0}。$$

(2) 若主网系统有限, 则有如下结论。

a. 当 $X_{s0} \leq X_{s1}$ 时, 则 $\Delta \geq X_{s1} > 0$, 即 $I_0^{(1)} < I_0^{(1,1)}$ 。

b. 当 $X_{s0} > X_{s1}$ 时, 若 $X_0 < X'_s$, 则 $\Delta > 0$, 即 $I_0^{(1)} < I_0^{(1,1)}$; 若 $X_0 = X'_s$, 则 $\Delta = 0$, 即 $I_0^{(1)} = I_0^{(1,1)}$; 若 $X_0 > X'_s$, 则 $\Delta < 0$, 即 $I_0^{(1)} > I_0^{(1,1)}$, 其中 $X'_s = X_{s1}X_{s0}/(X_{s0} - X_{s1})$ 。

上述结论表明, 除了 $X_{s0} > X_{s1}$ 且 $X_0 > X'_s$ 的情况外, 发生两相接地故障时流过平衡双卷变压器的零序电流均大于发生单相接地故障时流过平衡双卷变压器的零序电流, 即两相接地故障更严重。

发生不对称故障时流过平衡绕组的零序电流 I_{00} 及过载倍数 K 分别为:

$$I_{d0} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_0 \frac{S_B}{\sqrt{3} U_{Bd}} \quad (6)$$

$$K = \frac{I_{d0}}{I_{Ed}} = I_{d0} \frac{\sqrt{3} U_{Ed}}{S_{Ed}} = I_0 \frac{S_B U_{Ed}}{\sqrt{3} S_{Ed} U_{Bd}} \quad (7)$$

其中, I_0 为流过平衡双卷变压器的零序电流; $S_B=100 \text{ MV} \cdot \text{A}$, 为基准容量; U_{Bd} 为 d 型接线侧基准电压, 本文取 10.5 kV ; S_{Ed} 为 d 型接线侧额定容量; U_{Ed} 为 d 型接线侧额定电压, 常取 10.5 kV 左右。

由式(7)可知, 平衡绕组过载倍数的影响因素包括故障零序电流及平衡绕组额定容量。在给定电网系统的前提下, 若过载倍数增大至不满足要求, 则应从设计上考虑对平衡绕组进行扩容; 对于已投产的平衡双卷变压器, 则应及时向电网相关部门提供短路分析, 梳理设备风险点, 尽快结合停电进行扩容。

本文计算了广西电网中 19 台三卷变压器(仅限三侧电压为 $220 \text{ kV} / 35 \text{ kV} / 10.5 \text{ kV}$)的三卷变压器高压侧接地故障流过 d 型接线绕组的电流 I_{d0} , 得到过载倍数 K 及不同过载倍数区间中的变压器数量占比 p 见图 3。详细分析计算结果可得到以下结论。

a. 计算发现发生高压侧接地故障时 I_{d0} 最高为 11377 A 。此外, 两相接地故障的影响比单相接地故障的影响更严重的三卷变压器占总数的 58% (11 台)。故分析 d 型接线绕组(含平衡绕组)时不仅需考虑外部三相故障, 更应该关注不对称接地故障, 尤其是两相接地故障。

b. 过载倍数 K 最低为 1.27 , 最高为 8.96 。大多数三卷变压器的 K 值在 5 以下, 占总数的 84.21% ; 实际应用中应重点关注 K 值在区间 $[7.2, 9.2)$ 的三卷变压器, 其占总数的 10.53% 。

c. 分析发现 K 值在区间 $[1.2, 3.2)$ 的多为普通三卷变压器, 且它们的低压侧容量等于高压侧容量; K 值在 $[7.2, 9.2)$ 区间的均为平衡双卷变压器, 且它们的低压侧容量为高压侧容量的 33% 。因此, 平衡双卷变压器变的 K 值一旦偏高, 就会危及变压器安全, 此时应考虑平衡绕组扩容。在进行变压器设计选型时, 可考虑将 K 值作为重要参考依据。

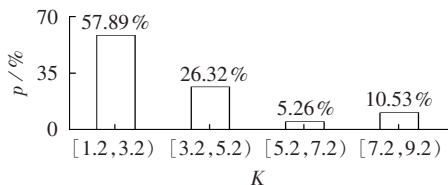


图 3 计算结果柱状图

Fig.3 Histogram of calculation results

3 平衡绕组对正序回路及保护的影响

3.1 平衡绕组正序回路分析

平衡绕组对平衡双卷变压器正序回路的影响集

中体现于 X_{dl} , 目前平衡双卷变压器的出厂试验报告及电网人员常忽略该值。不考虑 d 型接线侧故障的原因在于: d 型接线侧不带负荷, 正常状态下无正序电流通过; 平衡绕组三相首尾相连, 引出端子数量有限, 形成几乎封闭的整体, 故忽略其发生故障的可能性; 平衡绕组侧少有电流互感器, 所以变压器保护也仅按照考虑高、低压侧的双卷变压器保护配置。

但是, 电网运行中确实多次发生平衡绕组故障导致保护动作或变压器损坏的实例, 这说明完全忽略 X_{dl} 欠妥, 应该引起重视。参考故障实例将平衡绕组故障原因分为 2 类。

a. 区外不对称故障(多为 220 kV 或 110 kV 出线单相接地故障)。由第 2 节分析可知, 不对称故障易导致平衡绕组内零序环流值过大, 引发短路。

b. 容量及绝缘水平较低的平衡绕组自身故障(多发生在运行年限长或者雷暴雨极端天气引发套管放电拉弧、绝缘降低的情况)。鉴于正常运行时平衡绕组已固定一点接地, 当另一点发生接地故障时, 相当于 d 型接线侧两相短路, 实际故障的事故后测试及绕组解拆也证明了这一点。

平衡双卷变压器发生 d 型接线侧两相短路时可按照普通双卷变压器(以 YN0d11 型接线、d 型接线侧发生 BC 相短路为例)进行分析。按照对称分量法进行短路计算(计算过程略), 故障点 A 相正序电流标幺值见式(8); 流过高压绕组与平衡绕组的正序相电流见图 4。

$$I_{fal} = \frac{1}{2(X_{s1} + X_{h1} + X_{d1})} \quad (8)$$

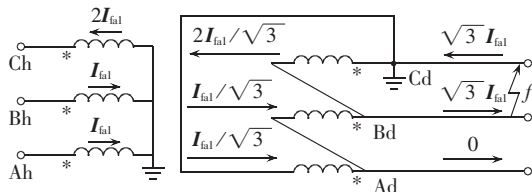


图 4 平衡双卷变压器 d 侧发生两相故障时的短路电流

Fig.4 Short circuit currents under phase-to-phase fault at angle-connected side of two-winding transformer with balancing winding

由图 4 可知, 平衡绕组 BC 相发生故障时, 高压侧 C 相(即滞后相)短路电流最大, 为 A 相(或 B 相)短路电流的 2 倍, 相当于平衡绕组侧发生三相故障的情况。这说明变压器厂家应该完整地提供高压侧、低压侧和平衡绕组侧正序电抗, 在进行实际故障分析或定值整定时应考虑上述短路情形。

3.2 平衡绕组对继电保护的影响

由已有文献提供的完整三侧正序电抗的相对大小关系(X_{hl} 较大, 约为 X_{dl} 的 2 倍; X_{ll} 接近于 0 或为接近 0 的负值)^[4-5]可知部分规律, 如在非高压侧发

生故障时,高压侧保护的最大短路电流计算多将故障设置在低压侧,最小短路电流计算多将故障设置在平衡绕组侧。

在第 2 节的正序回路故障分析基础上,相关的继电保护(如主变差动保护、高压侧电流保护、高压侧母线及出线保护等)整定计算均应该考虑发生平衡绕组两相故障情况,下面具体分析其影响。

3.2.1 主变差动保护

对于由高压侧与低压侧变压器构成的主变差动电流保护,平衡绕组两相故障属于区内故障,应校核主变差动保护能否准确动作。

以常见保护装置相位补偿为例,补偿后 Y 型接线侧(高压侧、低压侧)有 $I'_A = (I_A - I_B)/\sqrt{3}$ (I'_A 为补偿后 Y 型接线侧 A 相电流; I_A, I_B 分别为补偿前 Y 型接线侧 A、B 相电流; I'_B, I'_C 公式类推),d 型接线侧(平衡绕组侧)相电流补偿前后不变。

因低压侧为纯负荷不接地系统,故动作电流与制动电流均可忽略低压侧电流。以图 4 所示高压侧 A 相电流方向为参考方向,可知:

$$\begin{cases} I_{Acd} = I'_{Ah} + I'_{Al} = (I_{Ah} - I_{Bh})/\sqrt{3} = 0 \\ I_{Bcd} = I'_{Bh} + I'_{Bl} = (I_{Bh} - I_{Ch})/\sqrt{3} = \sqrt{3} I_{fal} \\ I_{Ccd} = I'_{Ch} + I'_{Cl} = (I_{Ch} - I_{Ah})/\sqrt{3} = -\sqrt{3} I_{fal} \end{cases} \quad (9)$$

其中, $I_{Acd}, I_{Bcd}, I_{Ccd}$ 分别为高、低压侧 A 相、B 相和 C 相的差流值。若制动电流 I_r 取高、低压侧相电流绝对值之和的 1/2,则 B、C 相 I_r 的大小均为差流大小的 1/2;若制动电流 I_r 取高、低压侧相电流绝对值中的较大者,则 B、C 相 I_r 的大小均等于差流的大小,显然此时的制动电流较大,保护灵敏度较低。

因此,对于平衡双卷变压器而言,为防止发生平衡绕组故障时主变差动电流保护拒动,应校核平衡绕组故障下主变差动保护的灵敏度,尤其是当制动电流 I_r 取两侧电流绝对值中的较大者时,需引起保护人员足够的重视。

3.2.2 主变高压侧后备保护

主变高压侧后备保护包括过流保护和阻抗保护。过流保护分为复压闭锁过流保护及纯过流保护。

a. 复压闭锁过流保护:按躲过变压器额定电流整定并校核低压侧故障时灵敏度;低电压取 0.6 p.u.~0.7 p.u.。发生平衡绕组 BC 相故障时,由对称分量法可知高压侧三相电压为 $\sqrt{3}/2$ p.u.、 $\sqrt{3}/2$ p.u. 与 0,可见低电压元件能够正确反映平衡绕组故障,仅需在校核低压侧故障灵敏度时补充校核平衡绕组侧故障灵敏度。

b. 纯过流保护通常会设置其中一段保护作为保护变压器安全的最后一道跳闸,保证对低压侧故障最小短路电流有足够的灵敏度,即保护范围涵盖整个

变压器。笔者认为该原则应更正为保证对其他侧(多为平衡绕组侧)故障最小短路电流有足够灵敏度,动作时间与低压侧连接设备最长后备时间配合,这样在平衡绕组故障时,纯过流保护能够以较长时间出口,其启动电流整定值按式(10)计算。

$$I_{dz} \leq \frac{I_{f\phi\min}}{K_{lm}} \quad \phi = A, B, C \quad (10)$$

其中, $I_{f\phi\min}$ 为主变低压侧或平衡绕组侧发生两相故障时流过高压侧的最小故障电流; K_{lm} 为灵敏系数。

对于高压侧(多为 500 kV)阻抗保护,其按照式(11)进行整定计算:

$$Z_{dz} \geq K_{lm} Z_T \quad (11)$$

其中, Z_T 为变压器阻抗。

设定 Z_T 时应考虑以下 2 点:

a. 若阻抗保护定位为躲变压器其他侧,因 X_{dl} 通常大于 X_{ll} ,故可忽略 X_{dl} ,此时 Z_T 为高低压侧阻抗之和;

b. 若阻抗保护定位为保护主变,则需考虑 X_{dl} ,此时 Z_T 为高压侧、平衡绕组侧阻抗之和,应校核定值伸出低压侧的范围。

3.2.3 主变失灵保护

在计算主变失灵启动电流(由主变保护或母差保护实现)时,规程要求主变失灵保护对变压器各侧故障都有足够的灵敏度,整定公式类似式(10)。对于普通双卷变压器,仅需考虑高、低压侧发生两相故障时流过高压侧的最小相电流;对于平衡双卷变压器,还应考虑平衡绕组侧发生两相故障的情况。

3.2.4 高压侧线路保护

当高压侧出线对侧保护整定值按远后备考虑(常见于本变压器所在站为 220 kV 终端站,且未配置失灵保护和高压侧为 110 kV 出线的情况)时,高压侧出线对侧保护的保护区应覆盖到相邻变压器,此时需要考虑平衡绕组。以对侧距离保护Ⅲ段的整定计算为例:

$$Z_{dz\text{III}} \geq K_{lm} (Z_{line} + K_{z\max} Z_T) \quad (12)$$

其中, Z_{line} 为出线阻抗; $K_{z\max}$ 为最大助增系数; Z_T 对应于式(11)设定 Z_T 时考虑的 **b** 点。

综上可知,平衡双卷变压器对保护的影响主要体现在保护范围需覆盖整个主变时,需在普通双卷变压器整定的基础上按照上述公式进行修正,将平衡绕组纳入保护范围,真正发挥保护变压器的作用。

4 工程实例

以广西电网某 220 kV 变电站 A 为例,该变电站为终端用户站,仅有 1 条 220 kV 出线 L_1 (正序阻抗 $Z_1 = 0.0023 \angle 82.47^\circ$ p.u.) 与主网相连,站内 1 号变压器为平衡双卷变压器,其参数如下:

- a. 高压绕组、低压绕组和平衡绕组的额定容量分别为 $180\text{ MV}\cdot\text{A}$ 、 $180\text{ MV}\cdot\text{A}$ 、 $60\text{ MV}\cdot\text{A}$, 高压绕组、低压绕组和平衡绕组的额定电压分别为 $(220\pm 8\times 1.25\%)\text{ kV}$ 、 36 kV 、 10.5 kV , 高压绕组、低压绕组和平衡绕组的额定电流分别为 472.4 A 、 $2\,886.8\text{ A}$ 、 $3\,299.1\text{ A}$;
- b. 连接组标号 YNyn0+d , 高、低压侧之间的短路阻抗百分比为 23.98% , 零序阻抗测量值(高压侧加电低压侧开路)为 $44.80\,\Omega$;
- c. $X_1=X_{h1}+X_{l1}=0.1332\text{ p.u.}$, $X_0=X_{h0}+X_{d0}=0.0847\text{ p.u.}$;
- d. 电流互感器变比为 $n_a=800:1$ 。
- 各保护原有的整定原则如下。
- a. 1 号变压器差动保护: 启动电流定值 I_{dz} 按照 $0.5I_{eqh}$ 进行整定, 并校核低压侧故障灵敏系数 $K_{lm}\geq 2$, 其中, I_{eqh} 为经过平衡系数调平衡后的二次额定电流, 等于变压器某侧二次额定电流与该侧平衡系数的乘积, 平衡系数的计算见对应型号保护的厂家说明书。
- b. 1 号变压器高压侧复压闭锁过流保护: 启动电流定值 I_{dz} 按躲过额定电流整定, 并校核低压侧故障灵敏系数 $K_{lm}\geq 1.3$ 。
- c. 主变失灵保护: 失灵启动电流 I_{dz} 按保证对变压器低压侧故障有足够灵敏度整定。
- d. L_1 对侧距离保护Ⅲ段的 Z_{dz} 按保证对 1 号变压器低压侧故障有足够灵敏度整定。
- 按照上述整定原则的计算结果见表 1 中的原整定值。

表 1 定值计算结果

Table 1 Calculation results of setting values

保护	原整定值		新定值		变化量	
	I_{dz}	K_{lm}	I_{dz}	K_{lm}	$\Delta I_{dz}/\%$	$\Delta K_{lm}/\%$
a	$0.5I_{eqh}$	3.54	$0.5I_{eqh}$	3.31	0	-6
b	0.79 A	2.15	0.79 A	1.76	0	-18
c	0.85 A	2.00	0.69 A	2.00	-19	0
d	$31.3\,\Omega$	1.20	$46.5\,\Omega$	1.20	48	0

注: 保护 a、b、c、d 分别对应 1 号变压器差动保护、1 号变压器高压侧复压闭锁过流保护、主变失灵保护、 L_1 对侧距离保护Ⅲ段。

计及平衡绕组侧参数 X_{dl} (根据已有文献及工程经验, X_{dl} 暂取 X_{h1} 的 $1/2$)后, 按照本文第 3 节的修正原则重新进行整定计算, 结果见表 1 中的新整定值。

由于篇幅限制, 下面列举 1 号变压器差动电流保护计算过程。保护型号为 PRS-778S-2BNW, 高压侧额定电流 $I_e=472.4/(800/1)=0.591(\text{A})$, 高压侧平衡系数为 1, 则 $I_{eqh}=0.591\text{ A}$, 启动电流 $I_{dz}=0.5I_{eqh}=0.3(\text{A})$ 。

忽略平衡绕组侧, 由整定软件计算得发生低压侧两相(BC 相)故障时流过高压侧的最小短路相电流 $I_{min}=1357\text{ A}$ (B、C 相电流方向相反), 将其按第 3.2 节所述相位补偿修正后各相差流值的较大值(本文为 B 相)记为 I_{cdmin} , 可得 $I_{cdmin}=2I_{min}/\sqrt{3}=1567(\text{A})$ (二

次值为 1.959 A); 制动电流 $I_r=0.5I_{cdmin}/n_a=0.979(\text{A})$ 。查阅厂家说明书可知 $I_e<I_r<6I_e$, 对应动作电流 $I_{op}=0.5(I_r-I_e)+0.1I_e+I_{dz}=0.5531(\text{A})$, 计算可得灵敏系数 $K_{lm}=I_{cdmin}/I_{op}=3.54\geq 2$, 满足规程要求。

计及平衡绕组时, 由整定软件计算得发生平衡绕组两相(BC 相)故障时流过高压侧的最小短路相电流 I_{min} 为 1110 A (对应图 4 中高压侧 C 相电流), 将其按式(9)进行修正后可得 $I_{cdmin}\approx\sqrt{3}I_{min}/2\approx961(\text{A})$ (二次值为 1.202 A), 则 $I_r\approx0.6\text{ A}$, $I_{op}=0.5(I_r-I_e)+0.1I_e+I_{dz}=0.3636(\text{A})$, 则 $K_{lm}=3.31\geq 2$, K_{lm} 虽有降低, 仍满足规程要求。

由表 1 可知, 1 号变压器差动保护和高压侧复压闭锁过流保护的原整定值在考虑平衡绕组参数 X_{dl} 后, 灵敏度分别降低了 6% 和 18% , 但均满足规程要求, 说明采用原整定值时保护范围可以覆盖 1 号变压器的高压、低压和平衡绕组侧。在保证规程要求灵敏度的前提下, 1 号变压器高压侧失灵保护的整定值降低了 19% , 高压侧出线对侧距离保护Ⅲ段的整定值增加了 48% ; 校核计算发现考虑平衡绕组参数 X_{dl} 之后, 1 号变压器高压侧失灵保护和高压侧出线对侧距离保护Ⅲ段原有整定值对应的灵敏度分别降至 1.63 和 0.81 , 达不到规程要求。这说明原整定值保护范围仅覆盖低压侧及部分平衡绕组, 一旦平衡绕组发生故障, 则此 1 号变压器高压侧失灵保护和高压侧出线对侧距离保护Ⅲ段存在拒动风险。

上述工程实例说明忽略平衡绕组后计算出的部分整定值(如高压侧失灵保护整定值及高压侧出线对侧距离保护Ⅲ段整定值)的保护范围并不能完全覆盖平衡绕组侧, 即当平衡绕组发生故障时这些保护存在拒动风险。故平衡绕组需纳入保护整定值计算考虑范畴, 尤其对于保护范围为整个变压器的保护, 应该予以重点关注, 因此笔者建议变压器厂家提供完整的正、零序参数的出厂试验报告。

5 结论

针对目前设备选型及继电保护配置中忽略平衡绕组的做法, 本文详细分析了平衡绕组对平衡双卷变压器的零序回路及抗短路能力、正序回路及继电保护的影响, 提出了平衡双卷变压器设计选型及继电保护定值整定计算的修正规则, 对该类型变压器在电网中的安全稳定运行提供了理论支撑与实际指导。

鉴于几乎封闭的平衡绕组具有隐蔽性强、故障率低、危害性大的特点, 故在以下方面可进一步开展深入研究:

- a. 加强对平衡绕组的巡检及维护, 具体如何量化实施有待研究;
- b. 考虑平衡绕组的低概率故障后, 会牺牲保护

灵敏性能,代价较大,因此可以考虑建立兼顾概率与后果的平衡双卷变压器风险模型,进一步优化其稳定运行性能。

参考文献:

- [1] 凌光,姚文熙. Y/ Δ 接线变压器三角形侧环流计算新方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(10):157-162.
LING Guang,YAO Wenxi. Circulating current calculation for delta windings of transformer with Y/ Δ connection[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(10):157-162.
- [2] 王雪,王增平. 变压器绕组参数在线计算方法[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):71-75.
WANG Xue,WANG Zengping. Online calculation of transformer winding parameters[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(7):71-75.
- [3] 董景义,段玉柱,张贤国,等. 平衡绕组在变压器中的作用及接线方式浅述[J]. 变压器,2009,46(12):20-23.
DONG Jingyi,DUAN Yuzhu,ZHANG Xiangguo,et al. Brief discussion on function and connection mode of balancing winding in transformer[J]. Transformer,2009,46(12):20-23.
- [4] 罗瑞彬,欧强,李英,等. 变压器平衡绕组抗短路能力分析与研究[J]. 变压器,2014,51(6):1-5.
LUO Ruibin,OU Qiang,LI Ying,et al. Research on withstanding short circuit for balancing winding in transformer[J]. Transformer,2014,51(6):1-5.
- [5] 李中祥,周成兵,李英,等. 一起变压器平衡绕组短路损坏的强度校核与分析[J]. 变压器,2015,52(9):10-15.
LI Zhongxiang,ZHOU Chengbing,LI Ying,et al. Analysis and calculation of short-circuit strength for transformer with balancing winding fault[J]. Transformer,2015,52(9):10-15.
- [6] 鲍有理,刘春光. 主变平衡绕组故障引起差动保护动作的分析[J]. 江苏电机工程,2011,30(2):20-21.
BAO Youli,LIU Chunguang. Analysis of differential protection caused by main transformer shielding coils fault[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2011,30(2):20-21.

- [7] 李泽财,程中岳,李喜荣,等. 空冷电厂一起变压器平衡绕组故障的分析及处理[J]. 华电技术,2013,35(7):53-55.
LI Zecai,CHENG Zhongyue,LI Xirong,et al. Analysis on transformer balance winding fault of an air-cooled power plant and treatment[J]. Huadian Technology,2013,35(7):53-55.
- [8] 王建明,李鹏. 基于波形特征量的变压器平衡绕组故障诊断方法[J]. 江苏电机工程,2011,32(6):62-65.
WANG Jianming,LI Peng. Method for transformer balancing wing fault diagnosis based on waveform characteristic[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2011,32(6):62-65.
- [9] 王艾萌. 分裂变压器平衡绕组结构分析[J]. 华北电力大学学报,2000,27(1):29-32.
WANG Aimeng. Tertiary winding structure analysis of the split-winding transformers[J]. Journal of North China Electric Power University,2000,27(1):29-32.
- [10] 张成飞,李英,苏忠焕,等. 平衡绕组对星形绕组中性点电位漂移影响的计算与仿真[J]. 变压器,2014,51(2):34-37.
ZHANG Chengfei,LI Ying,SU Zhonghuan,et al. Simulation and calculation of influence of balancing winding to potential driftage at neutral point of star winding [J]. Transformer,2014,51(2):34-37.
- [11] 李银红,王星华,骆新,等. 电力系统继电保护整定计算软件的研究[J]. 继电器,2001,29(12):5-7,15.
LI Yinhong,WANG Xinghua,LUO Xin,et al. Study of relay coordination software[J]. Relay,2001,29(12):5-7,15.

作者简介:



黄超

黄超(1987—),男,湖北荆门人,工程师,硕士,研究方向为电力系统继电保护整定计算及定值优化(E-mail:huang_c.dd@gx.csg.cn);

刘斌(1986—),男,湖北仙桃人,工程师,研究方向为电力系统继电保护运行维护管理(E-mail:liu_b.dd@gx.csg.cn)。

Circuit analysis of two-winding transformer's balancing winding and its influence on relay protection

HUANG Chao,LIU Bin

(Guangxi Electric Power Dispatching and Control Center,Nanning 530023,China)

Abstract: The partial neglect of balancing winding brings hidden trouble to the safe operation of two-winding transformer with balancing winding in engineering. The impacts of balancing winding on the transformer's anti-short-circuit ability and relay protection are studied,and based on the parameter input of two-winding transformer with balancing winding,the influences of balancing winding on positive-sequence and zero-sequence circuits are analyzed. The setting calculation principles of relay protection associated with two-winding transformer with balancing winding are modified and improved,which guarantees the stable operation of two-winding transformer and power grid from the perspective of relay protection.

Key words: two-winding transformer; balancing winding; circuit analysis; relay protection; setting calculation