

# 一起 35 kV 变压器单相高压绕组短路故障分析

严国平<sup>1</sup>, 汤大海<sup>2</sup>, 陈永明<sup>2</sup>, 孙东杰<sup>2</sup>, 马海薇<sup>2</sup>, 陈燕<sup>2</sup>, 曹斌<sup>2</sup>

(1. 国网江苏省电力公司, 江苏南京 210024; 2. 国网镇江供电公司, 江苏镇江 212001)

**摘要:** 针对电网某 35 kV 变电所变压器发生的一起 A 相高压绕组短路故障造成 35 kV 变压器差动保护动作跳闸的现象, 以变电所设备参数和保护装置的故障录波为参考, 进行了短路电流理论分析, 推导出短路电流计算公式并进行短路电流反演计算。理论分析和短路电流计算结果与故障录波图提供的信息相一致, 从而证实了 35 kV 变压器差动保护的动作为是正确的。

**关键词:** 35 kV 不接地系统; 35 kV 变压器; 单相高压绕组短路; 差动保护; 动作行为

**中图分类号:** TM77

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-0665(2016)04-0080-40

2013年3月12日, 电网某 35 kV 变电所发生了一起 35 kV 变压器 A 相高压绕组引线与中性点套管桩头之间的短路故障。故障时 B 相与 C 相电流大小相等, 相位一致, 而 A 相电流大小为 B 相或 C 相电流的 2 倍, 相位与 B 相或 C 相电流反相; 该故障造成了该变压器差动速断和比率差动保护动作, 跳开变压器高、低压断路器切除故障; 上级 35 kV 电源线路断路器保护动作跳闸, 重合成功。变压器绕组引线之间发生相间或单相接地故障比较常见<sup>[1-5]</sup>, 但变压器某相绕组引线与中性点套管桩头之间发生短路故障却不常见。

## 1 事故经过及继电保护动作情况

### 1.1 事故发生经过及继电保护动作情况

2013年3月12日 21:04, 电网某 35 kV 变电所 1

号变压器发生故障, 1 号变压器差动保护动作, 跳开变压器高、低压断路器切除故障; 1 号变压器故障跳闸, 致使 10 kV I 段母线失去电源, 10 kV 备自投动作, 合上 10 kV 分段 100 断路器, 10 kV I 段母线由 2 号变压器转供。

### 1.2 事故时系统运行方式

故障前系统一次接线如图 1 所示。故障前, A 变电所 35 kV 汤侯 336 断路器、35 kV 其侯 366 断路器运行, 35 kV 内桥 310 断路器热备用, 35 kV 备自投启用; 1 号变压器 10 kV 侧 101 断路器带 10 kV I 段母线; 2 号变压器 10 kV 侧 102 断路器带 10 kV II 段母线。10 kV 分段 110 断路器热备用, 2 台主变分列运行, 10 kV 备自投启用。35 kV 系统为不接地系统。变压器容量为 10 MV·A, 型号为 SFZ9-10000/35, 接线组别为 YNd11, 变压比为 35 kV/10 kV, 2002 年 5 月 28 日投运。

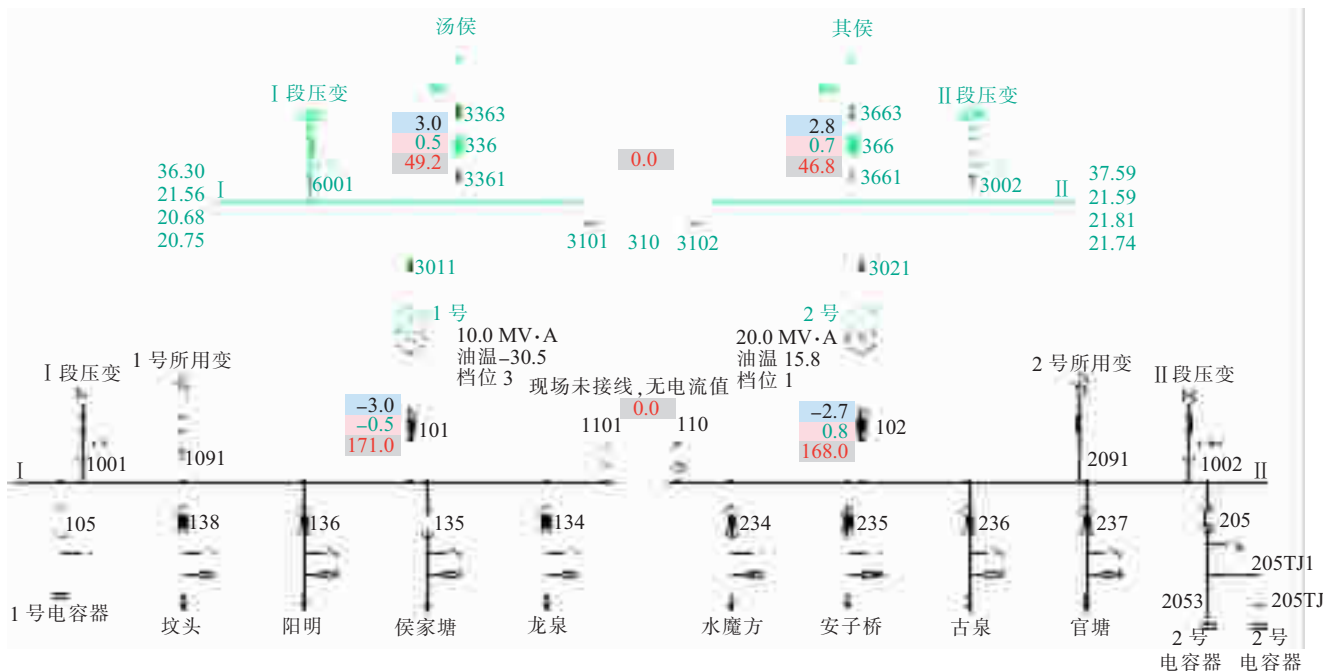


图 1 故障前系统一次接线图

### 1.3 故障时天气情况

气象报告表示 2013 年 3 月 12 日天气为中雨转阴,温度为 6~15℃。当晚 21:00 左右,该地区突降大雨,并伴有 7 级大风,阵风 8~9 级,气象条件恶劣。

## 2 故障检查情况

故障发生后,相关人员迅速到达现场,组织开展故障查找和分析工作,对 1 号变压器本体进行油色谱采样分析、变压器诊断性试验和检测,变压器各项试验数据合格;对 1 号变压器差动保护范围内的相关一次设备、汤侯线 336 断路器套管电流互感器(TA)、1 号变压器差动保护进行各项试验,各项试验数据正常。对 1 号变压器外观进行检查,发现 1 号变压器 35 kV 侧中性点套管瓷件最上层伞裙表面局部有严重的放电灼伤痕迹,与变压器 35 kV 侧 A 相套管的引线形成了放电通道,如图 2 所示(图中红线为异物形成的放电通道)。所以故障点位置为 1 号变压器 35 kV 侧中性点套管桩头与 35 kV 侧 A 相套管的引线由于异物形成了短路(放电)。

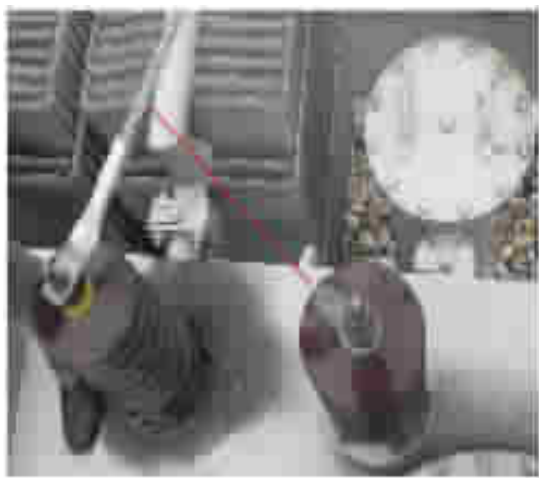


图 2 1 号变压器中性点套管放电痕迹照片

## 3 短路电流和保护动作行为分析

### 3.1 故障录波情况

故障发生后,继电保护专业人员调阅了 1 号主变保护装置和动作记录,保护装置动作报文信息如下:

2013-03-12T21:04:22:827,A 变 1 号变压器 A 相差动速断保护动作(动作值  $I_{DA}=19.16$  A,差动速断保护整定值 19 A,比率差动保护整定值 1.43 A,TA 变比为 600/5);

2013-03-12T21:04:22:829,A 变电所 1 号变压器 A 相比率差动动作;

2013-03-12T21:04:23:336,A 变电所汤侯线 336 断路器分闸;

2013-03-12T21:04:23:358,A 变电所 1 号变压器低压侧 101 断路器分闸;

2013-03-12T21:04:23:553,A 变电所 1 号电容器 105 断路器分闸;

2013-03-12T21:04:28:033,A 变电所 10 kV 备自投动作;

2013-03-12T21:04:28:109,A 变电所 10 kV 母联 110 断路器合闸;10 kV I 段母线由 2 号变压器转供电。

调阅了 1 号变压器 35 kV 侧后备保护录波波形如图 3 所示。



图 3 1 号变压器 35 kV 侧后备保护录波波形图

图 3 中,从上到下分别为 1 号变压器 35 kV 侧后备保护 A 相电压  $U_A$ 、B 相电压  $U_B$ 、C 相电压  $U_C$ 、A 相电流  $I_A$ 、B 相电流  $I_B$ 、C 相电流  $I_C$ 、3 倍零序电压  $3U_0$  及 3 倍零序电流  $3I_0$ 。

由图 3 的故障录波波形可以看出,故障时,B 相和 C 相电流同相且大小相等,而 A 相电流与 B 相和 C 相电流反相且大小与 B 相和 C 相电流之和相等。由保护动作信息和故障录波可知,差动保护的差动速断整定值 19 A,而差动差流电流值为 19.16 A,超过定值,故差动速断保护动作(2 ms 后比率差动保护动作),启动 336 和 101 断路器跳闸,切除故障。故障持续了约 5 个周波 100 ms。

### 3.2 短路故障定性分析

1 号变压器 35 kV 侧 A 相绕组短路,出现了 B 相和 C 相电流同相且大小相等,而 A 相电流与 B 相和 C 相电流反相且大小与 B 相和 C 相电流之和相等的情况。1 号变压器 35 kV 侧 A 相短路时供电的电路示意图如图 4 所示。

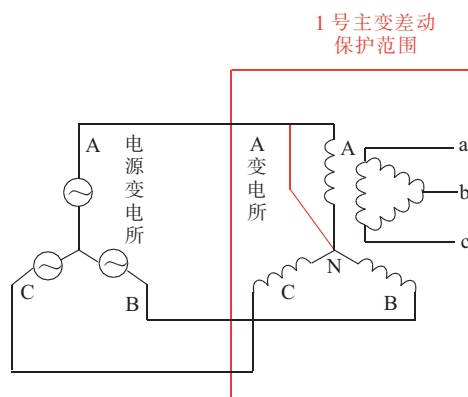


图 4 1 号变压器 35 kV 侧 A 相短路时电路示意图

由于变压器 35 kV 侧 A 相绕组短路 (假设为金属性短路), 则 B 相绕组、C 相绕组分别承受线电压  $U_{BA}$  和  $U_{CA}$ , 该电压传变到变压器二次绕组对应 ab 绕组与 cb 绕组的等效电势为  $E_{ab}=\sqrt{3} E_{AB}/n$  和  $E_{cb}=\sqrt{3} E_{CA}/n$ ,  $n$  为变压器变比, 即变压器高压侧与低压侧线电压之比。  $E_{ab}$  与  $E_{cb}$  的合成等值电势为:

$$E_{ac}=E_{ab}-E_{cb}=\sqrt{3} E_{AB}/n-\sqrt{3} E_{CA}/n=3\sqrt{3} E_A/n \quad (1)$$

该电势加在变压器二次 ac 绕组上。变压器二次 ac 绕组与变压器一次 AN 绕组组成一个单相变压器, 如图 5 所示。

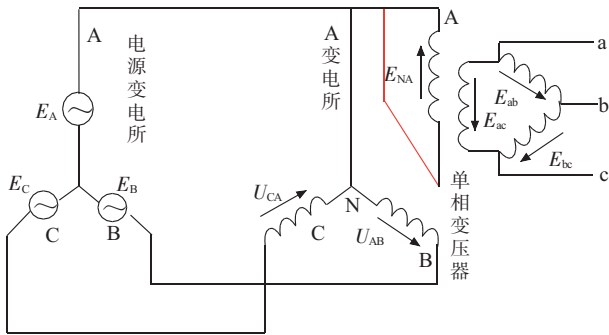


图 5 1 号变压器 35 kV 侧 A 相短路时电压分布图

变压器二次 ac 绕组电压传变到 AN 绕组的等效电源电势为:

$$E_{NA}=U_{AN}=(3\sqrt{3} E_A/n)\times(n/\sqrt{3})=3E_A \quad (2)$$

单相变压器高压 A 相绕组短路电流为:

$$I_{NA}=3E_A/Z \quad (3)$$

式(3)中:  $Z$  为综合阻抗折算到单相变压器高压绕组侧的阻抗。该电流由单相变压器高压绕组传变到低压绕组侧的电流为  $I_{ac}$  仅是变比的变化, 即:

$$I_{ac}=I_{NA}\times n/\sqrt{3}=n\sqrt{3} E_A/Z \quad (4)$$

因为 35 kV 变压器二次绕组接成三角形, 同时变压器低压侧没有电源, 该短路电流没有流出变压器三角形二次绕组, 所以  $I_{ac}$  在变压器三角形二次绕组形成环流, 该环流电流大小相等相位一致, 即有  $I_{ac}=I_{cb}=I_{ba}$ , 如图 6 所示。由 35 kV 变压器低压绕组侧的电流  $I_{cb}$ ,  $I_{ba}$  传变到高压绕组侧  $I_B, I_C$  仅是变比的变化, 则有  $I_B=I_C$ 。短路电流  $I_B, I_C$  为:

$$I_B=I_C=I_{ac}\times\sqrt{3}/n=3E_A/Z \quad (5)$$

因为综合阻抗  $Z$  的角度约为  $80\sim 90^\circ$ , 故短路电流  $I_B, I_C$  滞后  $U_A$  约  $80\sim 90^\circ$ ; 而 1 号变压器 35 kV 侧 A 相引线的电流为  $I_A=-(I_B+I_C)=-2I_B$ , 即 A 相电流大小为 B 相、C 相电流的 2 倍, 相位与 B 相、C 相电流反相, 超前  $U_A$  约  $80\sim 90^\circ$  电流分布如图 6 所示。

由式(3)、式(5)可知, 变压器 35 kV 侧 A 相绕组

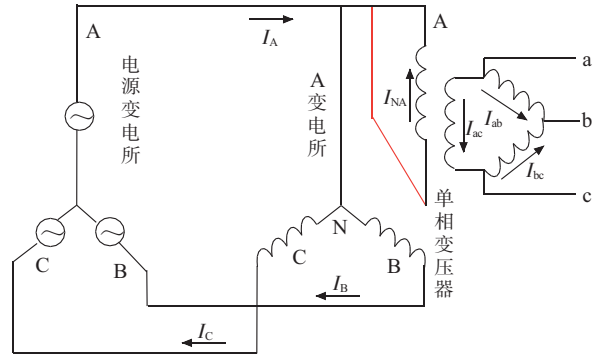


图 6 1 号变压器 35 kV 侧 A 相短路时电流分布图

的电流与 B 相绕组或 C 相绕组的电流大小相等相位相同。因为从变压器绕组磁链平衡角度来看, 有:

$$(i_{NA} W_1 - i_{ac} W_2) + (i_B W_1 - i_{ba} W_2) + (i_C W_1 - i_{cb} W_2) \approx 0 \quad (6)$$

式(6)中:  $i_{NA}, i_B, i_C$  分别为  $I_{NA}, I_B, I_C$  的瞬时值;  $i_{ac}, i_{ba}, i_{cb}$  分别为  $I_{ac}, I_{cb}, I_{ba}$  的瞬时值;  $W_1, W_2$  为高压一相绕组的匝数和低压一相绕组的匝数。

因为  $I_{ac}=I_{cb}=I_{ba}$ , 因此根据式(6)也有  $I_{NA}=I_B=I_C$ , 即变压器 35 kV 侧 A 相绕组的电流与 B 相绕组或 C 相绕组的电流大小相等相位相同。

由于变压器 35 kV 侧 TA 的极性是以母线指向变压器为正方向, 所以图 3 的录波图中 A 相电流、B 相电流、C 相电流与上述分析的  $I_A, I_B, I_C$  电流相位相反, 录波图中(即实际的电流)的 B 相电流与 C 相电流超前  $U_A$  约  $80\sim 90^\circ$ , 而 A 相电流滞后约  $80\sim 90^\circ$ 。

### 3.3 短路故障电流推导与计算

#### 3.3.1 短路故障电流计算公式推导

短路电流计算等值电路<sup>[5]</sup>图如图 7 所示。

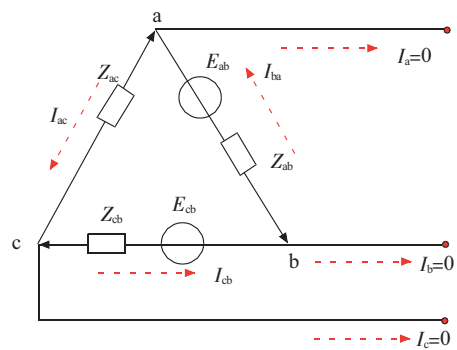


图 7 短路电流计算等值电路图

图 7 中,  $Z'_S, Z'_B$  分别为电网某 35 kV 变电所侧母线的 B 相与 C 相电源阻抗、35 kV 侧的 B 相与 C 相的变压器阻抗  $Z_B$ , 折算到变压器 10 kV 绕组侧的等值阻抗(其中变压器阻抗  $Z_B$  和单相变压器  $Z_{ab}$  阻抗相等)。

图 7 中 ab 臂电源和 bc 臂电源的等值阻抗  $Z_{cb}=Z_{ab}=Z'_B+Z'_S$ , ac 臂的等值阻抗  $Z_{ac}=Z'_B$ 。由图 7 得到变压器低压三角侧环流电流为:

$$I_{ac} = I_{cb} = I_{ba} = (\sqrt{3} E_{CA}/n + \sqrt{3} E_{BA}/n) / (Z_{ab} + Z_{cb} + Z_{ac}) = 3\sqrt{3} U_A [n(2Z'_S + 3Z'_B)] \quad (8)$$

该环流电流折算到变压器 35 kV 侧的电流为:

$$I_B = I_C = 0.5I_A = [3\sqrt{3} U_A/n(3Z_B + 2Z_S)] \times (n/\sqrt{3}) = 3U_A/(3Z_B + 2Z_S) \quad (9)$$

### 3.3.2 短路故障电流计算

A 变电所 35 kV 母线短路容量为 155 MV·A, 10 MV·A 的变压器短路电压为 7.5%, 取基准容量为 100 MV·A, 基准电压为平均电压 37 kV, 则有 35 kV 的基准电流  $I_j = 1560$  A, 电源内阻抗  $Z_S$  的标幺值  $Z_{S^*} = 0.645$  p.u., 35 kV 变压器阻抗  $Z_B$  的标幺值  $Z_{B^*} = 0.75$  p.u.。所以根据式(9)计算 A 相短路电流的大小为(采用标幺值计算):

$$I_A = 3I_j / (Z_{S^*} + 1.5Z_{B^*}) \quad (10)$$

由式(10)计算得  $I_A = 3 \times 1560 / (0.645 + 1.5 \times 0.75) = 2664$  A。

由保护动作信息得到差动保护 A 相差动速断的动作电流为 19.16 A, TA 变比为 600/5。1 号变压器差动保护装置型号为 DSA-321, 变压器差动保护采用高压侧移相。由于  $I_A = -2I_B$ , 因此 TA 的二次电流有  $I_{a2} = -2I_{b2}$ , 所以流入 A 相差动继电器回路的差电流值  $I_{DA}$  为  $I_{DA} = (I_{a2} - I_{b2}) / \sqrt{3} = I_{a2} \sqrt{3} / 2$ , 而  $I_A = I_{a2}/n$ , 所以折算到变压器 35 kV 侧 A 相一次的实际短路电流为  $I_A = 2I_{DA} \times n / \sqrt{3} = 2 \times 19.16 \times 120 / \sqrt{3} = 2655$  A, 该短路电流与式(10)的短路电流 2644 A 接近, 所以计算结果与根据保护动作信息得到的短路电流是相符的。

### 3.4 变压器差动保护动作行为分析

变压器差动保护的差动速断整定值为 19 A, 而差流电流值为 19.16 A, 超过了整定值, 故变压器差动速断保护能够启动并动作跳闸。

(1) 在  $I_{\max} \leq I_{\text{set}}/k + 1.5$  时, 变压器比率差动保护的动作为:

$$I_d = I_{\text{set}} \quad (11)$$

(2) 在  $I_{\max} \geq I_{\text{set}}/k + 1.5$  时, 变压器比率差动保护的动作为:

$$I_d = k(I_{\max} - 1.5) \quad (12)$$

式(11, 12)中:  $I_d$  为差动保护动作电流;  $I_{\max}$  为最大侧电流(即变压器各侧二次电流中最大的电流值);  $I_{\text{set}}$  为起始电流;  $k$  为比率制动系数(取值为 0.5)。

变压器比率差动保护的  $I_{\max}$  为 19.16 A, 起始电流  $I_{\text{set}}$  整定值为 1.43 A, 计算  $I_{\text{set}}/k + 1.5 = 4.36$ , 得到  $I_{\max}$  大于 4.36 A, 所以取式(12)进行计算, 得到差动保护动作电

流  $I_d$  为 8.83 A, 而差动保护的差动电流为 19.16 A 大于动作电流  $I_d$ , 即变压器比率差动保护的灵敏系数为  $19.16/8.83 = 2.17$ , 且大于 1, 所以变压器比率差动保护能够启动并动作跳闸。

## 4 结束语

根据录波图提供的数据、短路电流理论分析和反演分析计算结果可以得出下列结论:

(1) 变压器 35 kV 侧 A 相绕组短路, B 相与 C 相电流大小相等相位一致, 而 A 相电流大小等于 B 相与 C 相电流之和, 即 A 相电流等于 B 相或 C 相电流的 2 倍, 相位与 B 相或 C 相电流反相。

(2) 1 号变压器 35 kV 侧 B 相电流或 C 相电流超前 A 相电压约  $80 \sim 90^\circ$ ; A 相电流滞后 A 相电压约  $80 \sim 90^\circ$ 。

(3) 变压器 35 kV 侧最大短路电流(即故障相)理论计算公式为  $I_A = 3E_A / (Z_S + 1.5Z_B)$ ; 理论计算的短路电流与根据保护动作信息得到短路电流是相符的。

(4) 变压器 35 kV 侧 A 相绕组的电流与 B 相绕组的电流或 C 相绕组的电流大小相等相位相同。

(5) 变压器差动保护的差动速断和比率差动保护的动作为是正确的。

### 参考文献:

- [1] DL/T 584—2007 3~110 kV 电网继电保护运行整定规程[S].
- [2] 江苏省电力公司. 电力系统继电保护原理与实用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006: 174-197.
- [3] 国家电力调度通信中心. 国家电网继电保护培训教材[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 152-158.
- [4] 戴网虎, 汤大海, 曹斌, 等. 一起 35 kV 系统非金属性三相短路保护动作行为分析[J]. 江苏电机工程, 2010, 30(6): 9-12.
- [5] 袁宇波, 李澄, 葛永高, 等. 复杂故障情况下的变压器差动保护动作特性分析[J]. 江苏电机工程, 2006, 26(5): 9-11.

### 作者简介:

严国平(1965), 男, 江苏常州人, 高级工程师, 从事电网技术管理工作;

汤大海(1963), 男, 江苏镇江人, 研究员级高级工程师, 从事电网继电保护运行管理工作;

陈永明(197), 男, 江苏海安人, 高级工程师, 从事电网继电保护运行管理工作;

孙东杰(1985), 男, 江苏镇江人, 工程师, 从事电网继电保护运行管理工作;

马海薇(1981), 女, 江苏镇江人, 工程师, 从事电网调度运行管理工作;

陈燕(1981), 女, 江苏镇江人, 工程师, 从事电网调度运行管理工作;

曹斌(1977), 男, 江苏海安人, 高级工程师, 从事电网继电保护运行管理工作。



流下满足一次电流传变的精度要求。同时还应定期根据系统短路容量校核电流互感器,必要时通过调整系统运行方式限制短路电流,或者更换电流互感器,确保电流互感器在系统故障下满足测量精度要求;

(2) 电流互感器可能发生性能下降,保护装置日常校验应重视电流互感器及其二次回路检验,如通过试验发现电流互感器抗饱和和性能不能满足现场运行要求应及早更换,如发现二次阻抗过大应及时调整处理,只有这样才能保证继电保护装置正确动作。

#### 参考文献:

- [1] 陈国清. 浅析电流互感器饱和对继电保护的影响及对策[J]. 自动化技术与应用, 2007, 26(10): 115-116.
- [2] 国家电力调度通信中心. 国家电网公司继电保护培训教材[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 522-528.
- [3] 袁宇波, 李 鹏, 黄浩声. 继电保护受电流变压器差动保护误动原因分析及对策综述[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(6): 8-11.
- [4] 陈宏山, 余 江, 周红阳. 继电保护受电流互感器饱和的影响及防误动措施[J]. 南方电网技术, 2013, 07(1): 65-67.
- [5] 王志华. 高压电网电流互感器饱和对继电保护的影响应用分

析与研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(3): 39-49.

- [6] 王 奕. 电流互感器饱和引起的保护误动分析及试验方法[J]. 广东电力, 2005, 18(1): 16-18.
- [7] 何小飞, 王 锐, 李江陵, 等. 电流互感器饱和对继电保护装置动作影响分析与对策[J]. 四川电力技术, 2015, 38(3): 46-49, 77.
- [8] 方榆冬, 杨 涛, 吴春娣. UR T35/T60 变压器差动保护误动分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(14): 118-121.
- [9] 景 胜, 刘向阳. 变流器饱和引起母差保护误动事故的分析[J]. 继电器, 2004, 32(2): 70-71.
- [10] 梁仕斌, 王求松, 赵立昌, 等. 如何进行电流互感器伏安特性试验[J]. 云南电力技术, 2005, 33(2): 49-52.
- [11] 刘春艳, 周多思. 保护用电流互感器的特性检测及应用分析[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(15): 94-102.

#### 作者简介:

刘志仁(1984), 男, 江苏无锡人, 工程师, 从事变电站二次技术工作;

殷 志(1986), 女, 江苏常州人, 工程师, 从事变电站运行维护工作。

## Analysis of Protective Action Resistance Accidents Caused by Current Transformer Saturation

LIU Zhiren, YIN Zhi

(State Grid Wuxi Power Supply Company, Wuxi 214061, China)

**Abstract:** The current transformer (TA) may influence the normal operation of measurement and protection devices. In this paper, a transformer protection tripping accident after a fault occurred in the outing line is taken as an example. According to the fault current data, the protection setting data, the TA secondary circuit testing data and the principle and saturation process of CT, their impacts on the protection devices are studied. The analysis shows that the action resistance of the line protection and transformer protection are caused by TA saturation. Therefore, the corresponding countermeasures for this kind of accident are proposed in the paper.

**Key words:** current transformer; saturation; protective action resistance

(上接第 83 页)

## Analysis of Single-phase Short Circuit Fault in 35 kV Transformer High Voltage Winding

YAN Guoping<sup>1</sup>, TANG Dahai<sup>2</sup>, CHEN Yongming<sup>2</sup>, SUN Dongjie<sup>2</sup>, MA Haiwei<sup>2</sup>, CHEN Yan<sup>2</sup>, CAO Bin<sup>2</sup>

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China;

2. State Grid Zhenjiang Power Supply Company, Zhenjiang 212001, China)

**Abstract:** The fault at the phase A of a 35 kV transformer high voltage winding activated its differential protection. This paper theoretically analyses the short circuit current by using the substation equipment parameters and fault recording data. Also, the short circuit current is calculated by using the derived short circuit current computing formula. It turns out that the theoretical and computational results of the short circuit current are consistent with each other, which confirms the 35 kV transformer differential protection's correct action.

**Key words:** 35 kV neutral-unearthed system; 35 kV transformer; single-phase high voltage winding short circuit; differential protection, actions