

# 一起 35 kV 系统非金属性三相短路保护动作行为分析

戴网虎,汤大海,曹 斌,陈永明  
(镇江供电公司,江苏 镇江 212001)

**摘 要:**根据某 110 kV 变电所 35 kV II 段母线发生了一起 B 相接地造成 110 kV 主变 35 kV 后备保护越级跳闸的现象,以变电所设备参数和保护装置实际故障录波为参考,通过假设性推理和短路电流的故障反演计算分析,得到事故原因是由于 B 相单相接地而引起其他两相电压升高造成这两相整体绝缘下降引发了非金属性三相短路引起的,但 35 kV 出线保护由于 B 相无电流互感器(TA),无法判断故障发生,从而证实了 110 kV 主变 35 kV 后备保护的动作行为是正确的,并提出相应的改进意见。

**关键词:**35 kV 不接地系统;单相接地;非金属性三相短路;继电保护;动作行为分析

**中图分类号:**TM77

**文献标志码:**B

**文章编号:**1009-0665(2011)06-0009-04

2010 年 5 月,镇江供电公司某 110 kV 变电所 35 kV II 段母线系统(不接地系统)曾发生了一起由于 B 相单相接地,引起 2 号主变 35 kV 复合电压过流一段保护动作跳闸,而 35 kV 出线保护一套未动作。为什么单相接地时主变 35 kV 后备保护动作而 35 kV 出线保护不动作?通过调查和短路电流分析发现这是一起由于 B 相单相接地而引起其他两相电压升高造成这两相绝缘下降,引发了非金属性三相短路造成的。由于 35 kV 出线采用两相两继电器方式接线,且所有电流互感器(TA)接于出线 A 相、C 相两相,虽然在单相接地的出线 B 相电流很大,但 B 相无 TA 不能反映该线路故障,同时分到本线路和其他线路 A 相、C 相的短路电流却很小,而主变后备保护电流采用三相星型方式接线,B 相单相接地引起的非金属性三相短路,因而造成上述保护的動作行为。

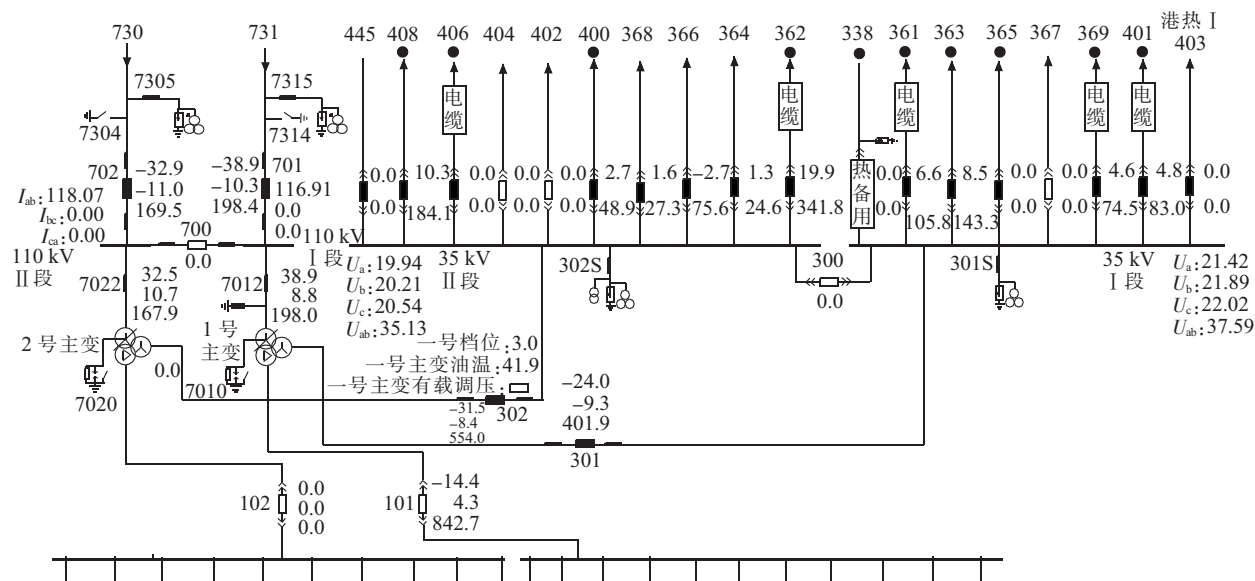
## 1 事故经过及继电保护动作情况

### 1.1 事故发生经过

2010 年 5 月 31 日 5 时 47 分 31 秒,某 110 kV 变电站 2 号主变 35 kV 后备保护动作启动,648 ms 后 35 kV 侧复压过流一段出口,跳开主变中压侧 302 开关;在保护启动时 35 kV 小电流接地选线系统报 368 线路接地。故障发生后,经现场检查一、二次设备,各保护设备经试验无异常,35 kV II 段母线查无异常,后经巡线发现 368 线路 B 相接地。处理好接地故障后系统恢复正常运行方式。

### 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,110 kV 730 线路供 2 号主变,700 开关热备用,35 kV 母线分列运行,302 开关供 35 kV II 段母线。



## 2 短路电流和保护动作行为分析

如果故障点在母线及主变中压侧引线上,那么主变保护的動作行为正确。但经现场认真检查母线及主变中压侧引线,排除了此处发生故障的可能性,并且线路接地处理好后系统恢复正常。

### 2.1 保护装置动作录波图分析

为什么单相接地,主变 35 kV 侧复压过流一段动作跳闸,而 35 kV 出线保护没有跳闸呢?故障发生后,继电保护专业人员立即赶往现场,调阅了 2 号主变保护装置动作记录,装置动作报文显示:

5:47:31.121 后备保护启动 01  
5:47:31.731 复压过流 11 出口 02

打印故障时 2 号主变中压侧后备保护录波图,如图 2 所示。

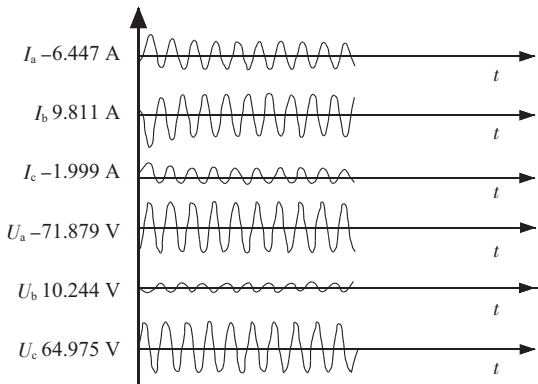


图 2 故障时 2 号主变中压侧后备保护录波图

根据录波图,B 相二次故障电流 7.175 A 明显达到并超过中压侧复压过流 I 段定值 6.9 A (二次值),2 号主变中压侧后备保护装置动作正确。由于 35 kV 出线录波数据很小与负荷电流差不多,故没有参考价值。取故障时某一时刻相关录波矢量值(二次值),如表 1 所示。

表 1 故障时各录波故障量

相别	35 kV II 段母 线二次电压/V	主变各相 二次电流/A
A 相	$65e^{j154.76^\circ}$	$4.937e^{j124.20^\circ}$
B 相	$10.144e^{-j24.31^\circ}$	$7.175e^{-j42.24^\circ}$
C 相	$72.205e^{-j113.83^\circ}$	$2.657e^{j164.72^\circ}$

### 2.2 保护 TA 配置分析

本变电站 35 kV 出线安装两相 TA,采用两相两继电器方式接线,且所有 TA 接于出线 A 相、C 相;主变后备保护电流采用三相星型方式接线。这样接线方式满足规程要求,是可行的。

### 2.3 保护定值配合正确性分析

保护装置无异常,那么是不是保护配置存在问

题?且查阅相关定值单。

(1) 2 号主变 35 kV 侧配置后备保护(TA 变比为 1 500/5)。复压过流 I 段整定电流 6.90 A(一次值为 2 070 A),时间 0.6 s,跳 2 号主变 35 kV 侧 302 开关;复压过流 II 段整定电流 3.90 A(一次值 1 170 A),时间 1.7 s,跳 2 号主变 35 kV 侧 302 开关;其中 2 号主变 35 kV 复压过流 I 段主要按 35 kV 母线故障有  $\geq 1.5$  倍的灵敏度整定<sup>[1]</sup>。

$$I_{dz}^I \leq I_{k,min}^{(2)} / K_{lm} \quad (1)$$

式(1)中: $I_{dz}^I$ 为 2 号主变 35 kV 复压过流 I 段整定值; $I_{k,min}^{(2)}$ 为在系统最小运行方式下 35 kV II 段母线两相短路电流; $K_{lm}$ 为灵敏系数,一般取 1.5。

(2) 35 kV 各出线保护。电流速断保护整定电流最大 1 800 A,时间为 0 s;延时电流速断保护整定电流最大 1 780 A,时间为 0.3 s;过电流保护整定电流最大 700 A,时间为 1.4 s。其中电流速断保护主要按躲过出线上最大供电变压器低压母线故障流过本保护的最大短路电流整定;延时电流速断保护主要按线路末端故障有一定的灵敏度整定;过电流保护主要按躲过出线上最大负荷电流整定<sup>[1]</sup>。

以上保护定值完全按 DL/T 584—2007 规程进行整定,符合逐级配合的整定原则,正常情况下,当线路上发生了短路故障时,线路保护一般能先于主变后备保护动作,所以保护 TA 配置及相互配合上是没有问题的。

### 2.4 短路故障计算分析

通过上面保护动作行为分析,发现不管是保护装置,还是保护定值及定值之间的配合,都符合规程规定的要求,那为什么 B 相单相接地,主变 35 kV 侧复压过流一段动作跳闸,而 35 kV 出线保护却没有跳闸?通过对录波数据分析,发现三相均有电流,且不对称,其中 B 相电流最大,由此可见,这是一起典型的单相接地引起的非金属性三相短路。

假设 35 kV 电源系统三相对称,则  $E_A = a E_B = a^2 E_C$ ,其中  $a = e^{j120^\circ}$ 。该 35 kV 系统发生非金属性三相短路的等值电路如图 3 所示。

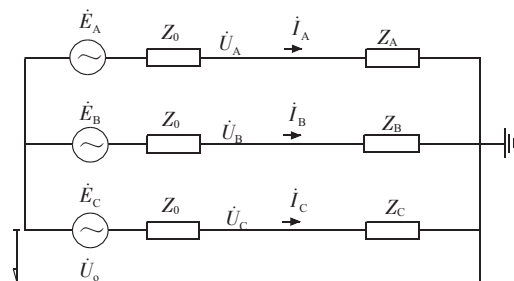


图 3 35 kV 系统非金属性三相短路等值电路

图 3 中,  $\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$  分别为等效三相电源电势;  $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$  分别为 35 kV II 段母线各相对地电压;  $Z_A, Z_B, Z_C$  分别为故障时 35 kV II 段母线以下部分各相对地等值阻抗 (以下简称各相对地等值阻抗);  $Z_0$  为系统等效电源阻抗;  $U_0$  为电源中性点对地电压。根据录波图某一时刻故障矢量值 (二次值), 求出相关录波量的一次值 (TA 变比为 1.5 kA/5 A, 电压互感器 (TV) 变比为 35 kV/100 V), 如表 2 所示。

表 2 故障时各故障量

相别	35kV II 段母线电压 /kV	主变各相电流 /kA	各相对地等值阻抗 / $\Omega$
A 相	$23.090e^{j154.76^\circ}$	$1.481 1e^{j124.20^\circ}$	$15.589 7e^{j30.56^\circ}$
B 相	$3.550e^{-j24.31^\circ}$	$2.152 5e^{-j42.24^\circ}$	$1.649 43e^{j17.93^\circ}$
C 相	$25.272e^{-j113.83^\circ}$	$0.797 1e^{j164.72^\circ}$	$31.704 6e^{j81.45^\circ}$

表 2 中 35 kV II 段母线各相对地等值阻抗由各自 35 kV II 段母线电压和主变 35 kV 侧各相电流算出。由图 3 可得方程:

$$E_A - U_0 = I_A (Z_0 + Z_A) = I_A Z_0 + U_A \quad (2)$$

$$E_B - U_0 = I_B (Z_0 + Z_B) = I_B Z_0 + U_B \quad (3)$$

$$E_C - U_0 = I_C (Z_0 + Z_C) = I_C Z_0 + U_C \quad (4)$$

将表 2 数据代入方程式 (2—4), 得到下列方程:

$$E_A - U_0 = 1.481 1e^{j124.20^\circ} Z_0 + 23.09e^{j154.76^\circ} \quad (5)$$

$$E_A e^{-j120^\circ} - U_0 = 2.152 5e^{-j42.24^\circ} Z_0 + 3.550 4e^{-j24.31^\circ} \quad (6)$$

$$E_A e^{j120^\circ} - U_0 = 0.797 1e^{j164.72^\circ} Z_0 + 25.27e^{-j113.83^\circ} \quad (7)$$

由于 35 kV 系统中性点不接地, 零序电流为系统的电容电流, 在进行短路电流计算时可以忽略不计, 由故障时的等值电路图可以得出:  $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$ 。

同时通过主变保护录波量可验证得到:  $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0.014 1e^{-j123^\circ}$ 。这就是说母线上的零序电压等于故障点的零序电压, 即该电网中的零序电压处处相等, 与故障点的位置无关<sup>[4]</sup>。于是有:

$$U_0 = -(U_A + U_B + U_C) / 3 = 10.51e^{j27.86^\circ}$$

将  $U_0$  结果代入方程式 (5, 6), 得:

$$E_A = 1.481 1e^{j124.20^\circ} Z_0 + 18.769e^{j128.17^\circ} \quad (8)$$

$$E_A e^{-j120^\circ} = 2.152 5e^{-j42.24^\circ} Z_0 + 12.989e^{j15.39^\circ} \quad (9)$$

解式 (8, 9) 得到短路时,  $E_A = 20.449e^{j1143.82^\circ}$  kV,

电源线电压为 35.41 kV,  $Z_0 = 3.784e^{j84.41^\circ} \Omega$ 。其中,  $Z_0$  与理论短路电流计算用的 35 kV 母线的系统电源等值阻抗 3.45~5.48  $\Omega$  的结果很接近, 且角度也接近

90°, 证明上述假设与电网实际发生的情况是一致的。由短路电流分析与录波图可以得出, 这是一个典型的非金属性三相短路<sup>[2,3]</sup>。

## 2.5 保护动作行为分析

由  $Z_B = 1.649 4 \Omega$  可以确定, B 相接地点离母线较近, 查阅线路资料, B 相接地的 368 线路的首端线路为电缆, 长度为 0.512 km, 短路阻抗和角度均符合该电缆发生短路的情况; 同时由  $Z_A = 15.589 7 \Omega$ ,  $Z_C = 31.704 6 \Omega$  可以确定, A 相和 C 相对地等值电阻较小, 联系到此变电站地处化工园区, 35 kV 出线较多; 同时根据小电流接地系统单相金属性接地, 另外两相对地电压升高为线电压的特性, 进一步加剧 A 相和 C 相对地绝缘下降, 由此可判断这是一起由于小电流接地系统 B 相接地, A 相和 C 相对地整体绝缘下降, 由多条 35 kV 出线 A 相和 C 相多点提供短路电流的一起非典型短路故障。据此可画出如图 4 所示的 B 相接地时的电网图。

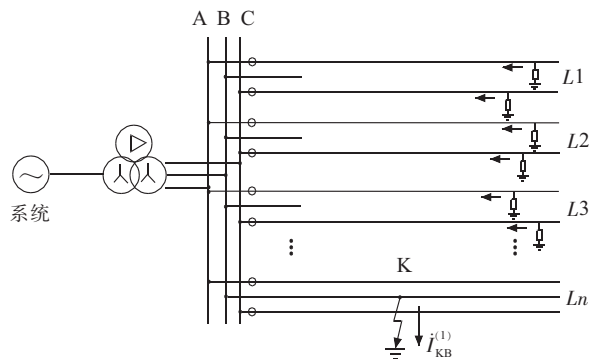


图 4 35 kV 系统 B 相接地时的电网图

由于本变电站 35 kV 线路保护采用 A 相和 C 相两相不完全星型电流接线, 根据 2 号主变 35 kV 后备保护录波图可以看到, A 相和 C 相两相最大电流为 A 相 4.93 A (二次值), 虽然 368 线路 B 相故障电流很大, 但 B 相没有装设 TA, 不能反映本线路发生故障了; 同时本线路和其他线路 A 相和 C 相两相各自分得的电流却很小 (共有 7 条线路, 假设每条线路均相等, 则每条线路分得的电流为  $1.481 / 7 = 212$  A; 即使每条线路不均衡, 但每条线路分得的电流也不是很大, 可以肯定, 线路越多, 每条线路分得的电流就越小, 由 35 kV 出线保护录波证明了这一结论), 加上该线路负荷电流后可以看出远小于线路延时电流速断保护定值 (最小 1 200 A, 0.3 s), 因此线路保护不会动作。

而主变保护采用了三相电流完全星型接线, B 相故障电流 7.175 A (二次值) 大于主变中复压过流 I 段 6.9 A (二次值) 的定值, 因此故障达到 2 号主变 35 kV 复压过流 I 段时间定值后动作跳闸, 该保护动作行为是正确的。

### 3 关于 35 kV 线路保护 TA 配置的探讨

由上述分析可知,非金属性三相短路时,单相接地线路的 B 相故障电流很大,但由于 35 kV 出线保护没有配置 TA,而无法判断故障的发生,那么可以通过改进线路保护 TA 接线方式解决此问题。

#### 3.1 两相三继电器方式

在线路开关只有两相 TA 的情况下,是否可利用线路保护采 A 相、C 相电流之和为 -B 相(即两相三继电器方式),将 A 相、C 相电流短接反方向接入 B 相的采样回路,此时若一条线路发生 B 相接地,在 A 相、C 相绝缘降低的情况下,B 相采样电流是否能够反映本线路短路故障由线路保护快速切除故障呢?

如图 4 所示,由于 B 相短路电流是由多条线路的 A 相、C 相提供,本线路的 A 相、C 相短路电流却很小,故两相三继电器方式还是不能完全避免在这种情况下保护越级跳闸,但此接线方式仅能提高线路保护的灵敏度。

#### 3.2 三相三继电器方式

如果线路保护采用三相完全星型电流接线,则发生 B 相接地的线路会因为 B 相电流大于线路保护动作值而正确动作,而不会由主变后备保护动作而越级动作扩大停电范围。

但是该接线方式缺点是不仅每条线路增加了 1 只 TA,原理上还存在一定的缺陷,即不同线路异相单相接地故障会造成 2 条线路同时跳闸,增加了负荷损失。

### 4 结束语

根据录波图提供的数据和系统短路电流反演分析计算结果可以得出:

(1) 由于变电所地处化工区,B 相单相接地而

引起其他两相电压升高造成这两相整体绝缘下降,引发非金属性三相短路造成的;

(2) 由于 35 kV 出线 B 相无 TA 不能反映故障的发生,所以 2 号主变 35 kV 后备保护的動作行为是正确的;

(3) 对于化工工业园区和污秽等级较高的变电所,条件许可情况下,建议小电流接地系统出线保护 TA 接线方式应接成三相三继电器方式,防止由于发生非金属性三相短路时出线保护无法动作而由主变后备保护动作跳闸来切除故障;

(4) 化工园区或污秽等级较高的电力线路,应提高线路的防污等级设计;

(5) 根据计算,该小电流接地系统接地电容电流已超过了规程规定的小于 10 A 要求(短路电流分析中显示的实际电容电流已达 14.1 A),需在该系统变压器中性点加装消弧线圈。

#### 参考文献:

- [1] DL/T 584—2007, 3 kV ~ 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.
- [3] 崔家佩,孟庆炎,陈永芳,等. 电力系统继电保护与安全自动装置整定计算[M]. 北京:中国电力出版社,2000.
- [4] 许正亚. 变压器及中低压网络数字式保护[M]. 北京:中国水利水电出版社,2004.

#### 作者简介:

戴网虎(1974-),男,江苏镇江人,工程师,从事电网继电保护运行管理工作;

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

曹 斌(1977-),男,江苏海安人,工程师,从事电网继电保护运行管理工作;

陈永明(1979-),男,江苏海安人,工程师,从事电网继电保护运行管理工作。

## Analysis of Protection Operation Behavior for One Nonmetallic Three-phase Short Circuit Fault in 35 kV Power System

DAI Wang-hu, TANG Da-hai, CAO Bin, CHEN Yong-ming

(Zhenjiang Power Supply Company, Zhenjiang 212001, China)

**Abstract:** The tripping operation of the 35 kV back-up protection of the 110 kV main transformer is analyzed in the paper, which caused by the B-phase grounding in II section of 35 kV bus in 110 kV substation. Based on the substation equipment parameters and the actual fault wave in the protection, the hypothetical reasoning and inversion analysis of short-circuit fault current are carried on. The cause of the accident is that the voltages of other two phases rise, resulting in the overall insulation deterioration, which caused the nonmetallic three-phase short circuit fault at last. However, as there is no current transformers in B-phase of 35 kV system, so the B-phase grounding fault cannot be detected. Thus, the 35 kV back-up protection operation behavior in 110 kV main transformer is confirmed to be correct. Finally, suggestions for improvement are also proposed.

**Key words:** 35 kV power system without grounding; single-phase grounding; nonmetallic three-phase short circuit; relay protection; protection operation behavior