

一起连锁故障的仿真模拟和理论分析

黄淼¹, 黄敏², 庄凯¹, 文一字¹, 刘育明¹, 朱晟毅¹

(1. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123; 2. 国网重庆市电力公司检修分公司, 重庆 400039)

摘要: 介绍并分析了实际电网中发生的一起连锁故障。该故障的演变过程较为复杂, 不仅某 110 kV 线路先后经历了多种故障形态, 而且其供电的某变电站主变和另一条 110 kV 线路均发生了动作跳闸行为。鉴于故障的复杂性, 运用仿真模拟和理论分析的手段, 详细探讨了相关继电保护装置的動作行为和動作原因, 并推导了 C 相断线并与 B 相搭接故障形式下相关电气量的数学公式。仿真和理论计算的结果表明对保护动作原因的分析是有效正确的。

关键词: 连锁故障; 继电保护; 故障分析; 仿真

Simulation and theoretical analysis of a cascading fault

HUANG Miao¹, HUANG Min², ZHUANG Kai¹, WEN Yi-yu¹, LIU Yu-ming¹, ZHU Sheng-yi¹

(1. State Grid Chongqing Electric Power Co. Electric Power Research Institute, Chongqing 401123, China;

2. State Grid Chongqing Power Maintenance Branch Company, Chongqing 400039, China)

Abstract: This paper describes and analyzes a cascading fault in an actual power grid. During the temporal evolution of the complicated contingency, not only several fault patterns occurred successively on a 110 kV line, but also a substation main transformer and another 110 kV line, which was powered by the faulted line, tripped due to the operation of some protection devices. This paper uses simulation and theoretical analysis to discuss the operation behavior and reasons of corresponding protection devices, and derives the mathematical formulae of related electric quantities in case of open-phase fault of phase C and lap joint of phase B and phase C. Simulation and theoretical calculation results show that the proposed analysis is effective and correct.

Key words: cascading failure; relay protection; fault analysis; simulation

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)13-0139-07

0 引言

2011 年末, 重庆市某地区一条 110 kV 线路在发生故障期间, 其供电的某变电站 1 号主变零序过压保护动作, 另一条 110 kV 线路在该区外故障下距离 I 段保护两次动作跳闸。

故障分析是提升电力系统运行管理水平的重要环节^[1-6]。为查找故障原因, 认识和了解故障, 论文结合故障录波, 运用仿真模拟和理论分析的手段, 对故障予以探讨。

1 故障简况

1.1 故障前运行方式

故障前系统接线如图 1 所示。甲、乙两站均为 220 kV 变电站。

因设备改造, 乙站 220 kV 设备全停; 1、2 号主变本体高压侧引流线已拆除; 1、2 号主变 220 kV

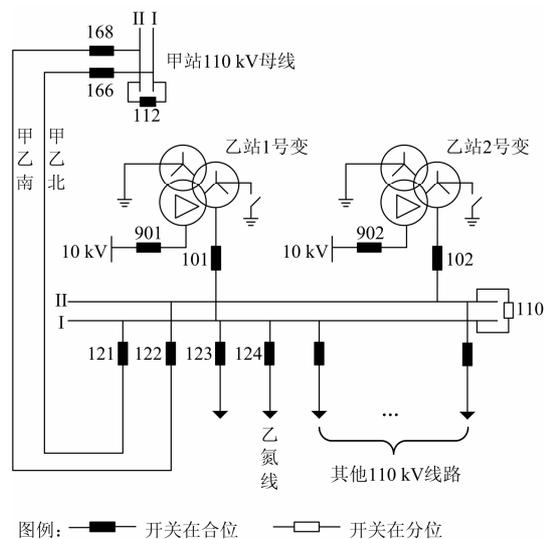


图 1 故障前系统接线示意图

Fig. 1 Pre-fault diagram of system

侧中性点接地运行, 110 kV 侧中性点不接地运行; 110 kV 母线分列运行。故障前, 甲站通过 110 kV 甲乙南、甲乙北线供乙站全部负荷, 甲乙南、甲乙北分别带负荷约 3.1 万 kW、6.6 万 kW。

乙氮线所供用户为一氮肥厂, 其 6 kV II 段和 III 段母线分列运行, II 段母线带有 3 台高压同步电动机负荷, III 段母线带有 7 台高压同步电动机负荷和 1 台高压异步电动机负荷, II、III 段母线所带站用变分别向若干低压异步电动机供电。

继电保护方面, 甲站甲乙北 166 保护投入, 乙站甲乙北 121 保护退出运行, 其他保护正常投入。

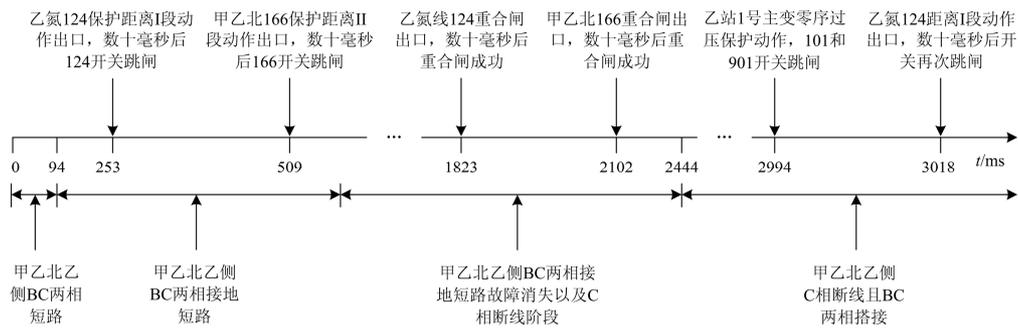


图 2 故障的演变时序

Fig. 2 Temporal evolution of fault

对乙氮线而言, 甲乙北线乙侧故障属于反向故障。按继电保护应满足选择性的要求, 乙氮线 124 保护不应动作。本文第 2 节, 将针对乙氮线距离 I 段保护第 1 次动作跳闸的原因进行分析。鉴于乙氮线距离 I 段第 2 次动作跳闸和乙站 1 号主变零序保护动作跳闸均发生在甲乙北线乙侧 C 相断线并与 B 相搭接期间, 故在第 3 节, 首先对这种很少见的并联一并型双重故障进行理论推导, 再针对不同的保护动作开展分析。

2 乙氮线 124 保护第 1 次动作跳闸分析

2.1 保护动作原理简介

乙氮线保护装置型号为 LFP-941A, 其距离 I 段继电器由方向阻抗继电器和电抗继电器组成^[7]。

方向阻抗继电器工作和极化电压分别表示为^[7]

$$\dot{U}_{OP\phi\phi} = \dot{U}_{\phi\phi} - \dot{I}_{\phi\phi} Z_{ZD} \quad (1)$$

$$\dot{U}_{P\phi\phi} = -\dot{U}_{1\phi\phi} e^{j\theta} \quad (2)$$

式(1)、式(2)中: 下标 $\phi\phi$ 表示两相相间, $\phi\phi = AB$ 、 BC 、 CA ; Z_{ZD} 表示整定阻抗; θ 为偏移角。

电抗继电器工作电压如式(1)所示, 极化电压表示为^[7]

1.2 故障的演变时序

通过分析故障录波数据、相关保护动作报文, 确定故障的演变时序如图 2 所示。由图 2 可知:

① 此次故障由甲乙北线乙侧发生故障所致, 随着时间的推移, 甲乙北线乙侧故障先后经历了 BC 两相短路、BC 两相接地短路、C 相断线、C 相断线并与 B 相搭接的过程;

② 在甲乙北线乙侧 BC 两相接地短路期间, 乙氮线 124 保护距离 I 段第 1 次动作跳闸;

③ 在甲乙北线乙侧 C 相断线并与 B 相搭接期间, 乙站 1 号主变零序过压保护动作导致主变跳闸, 乙氮 124 距离 I 段第 2 次动作跳闸。

$$\dot{U}_{P\phi\phi} = -\dot{I}_{\phi\phi} Z_D \quad (3)$$

式中, Z_D 为模拟阻抗。

方向阻抗继电器、电抗继电器比相动作条件均表示为

$$-90^\circ \leq \arg \frac{\dot{U}_{OP\phi\phi}}{\dot{U}_{P\phi\phi}} \leq 90^\circ \quad (4)$$

2.2 原因分析

由式(1)、式(3)易知, 在甲乙北乙侧 BC 两相接地短路状态下, 电抗继电器满足比相动作条件。下面分析方向阻抗继电器满足比相动作条件的原因。

录波分析表明, 距离 I 段第 1 次动作出口前, 方向阻抗继电器极化电压的相位基本未发生变化, 该继电器之所以满足比相动作条件, 源于其工作电压的相位变化。因甲乙北线乙侧处于 BC 两相接地短路状态, 根据式(1), 方向阻抗继电器工作电压的相位变化主要由乙氮线乙侧 BC 相间电流的相位决定。按故障录波计算得到的乙氮线乙侧 BC 相间电流的相对相位如图 3 所示。可见, 随着时间的推移, 其变化明显。这表明距离 I 段第 1 次动作的原因与乙氮线用户侧的响应相关。图 4 所示的用户侧有功也表明, 用户侧响应发生了剧烈的变化。

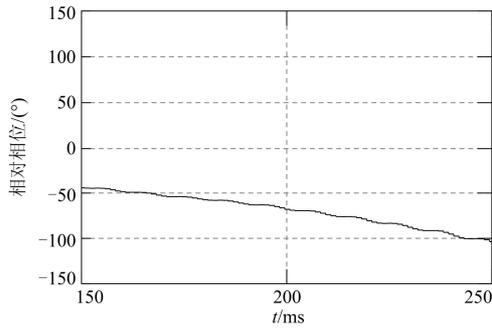


图 3 按录波数据得到的乙氮线乙侧 BC 相间电流相对于乙站 110 kV I 母 A 相电压的相位

Fig. 3 Relative phase angle between phase B-to-phase C current flowing through Yi side of line Yidan and phase A voltage at 110 kV bus I in substation Yi obtained from recorded data

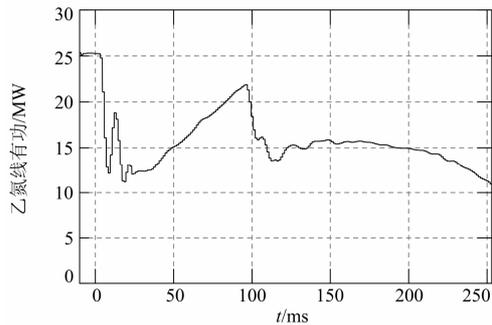


图 4 按录波数据得到的乙氮线有功

Fig. 4 Active power flowing through line Yidan obtained from recorded data

因故障前乙氮线用户侧不仅有高压同步电动机在运行, 还有高压异步电动机以及多台低压异步电动机在运行, 用解析的方法分析很困难, 为此采用仿真的手段来探究原因。乙氮线 BC 相间电流相对于乙站 110 kV I 母 A 相电压的相位仿真波形如图 5 所示, 乙氮线有功仿真曲线如图 6 所示。比较图 3 和图 5, 并比较图 4 和图 6, 可见, 故障录波和仿真波形在变化的趋势和幅值上均基本一致, 这说明用仿真手段来探究保护动作原因是有效的。

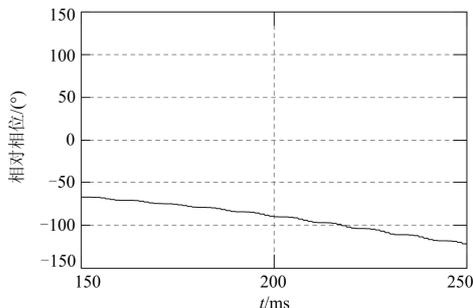


图 5 乙氮线乙侧 BC 相间电流相对于乙站 110 kV I 母 A 相电压的相位仿真波形

Fig. 5 Simulation curve of relative phase angle between phase B-to-phase C current flowing through Yi side of line Yidan and phase A voltage at 110 kV bus I in substation Yi

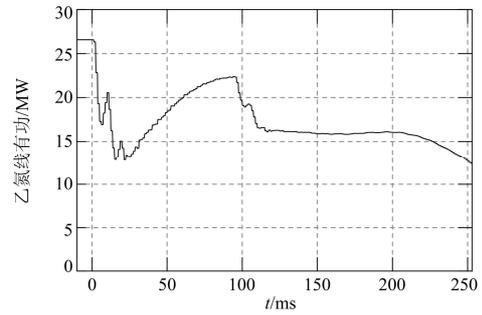


图 6 乙氮线有功仿真波形

Fig. 6 Simulation curve of active power flowing through line Yidan

因乙氮线既带高压同步电动机负荷, 又带异步电动机负荷, 所以分别模拟乙氮线仅带高压同步电动机、仅带异步电动机的情形。相应地, 方向阻抗继电器工作电压和极化电压相位差变化的仿真曲线分别如图 7、图 8 所示。仿真结果表明: 在乙氮线仅带高压同步电动机时, 在相同的故障和时间段内, 距离 I 段也会动作, 工作电压和极化电压相位差的变化趋势与实际故障时的情形相仿; 在乙氮线仅带异步电动机时, 距离 I 段不会动作。

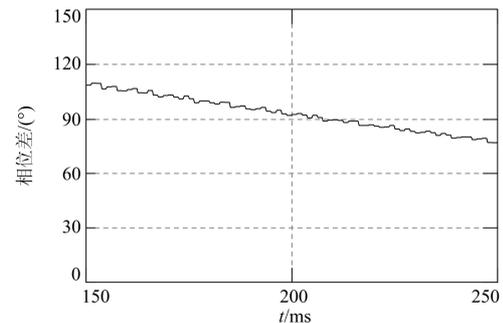


图 7 乙氮线仅带高压同步电动机时方向阻抗继电器工作电压与极化电压相位差的仿真波形

Fig. 7 Simulation curve of phase angle difference between working voltage and polarized voltage of direction impedance relay in case of only high voltage synchronous motors powered by line Yidan

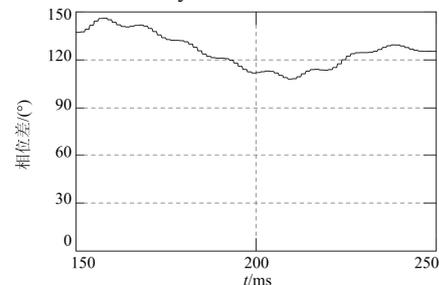


图 8 乙氮线仅带异步电动机时方向阻抗继电器工作电压与极化电压相位差的仿真波形

Fig. 8 Simulation curve of phase angle difference between working voltage and polarized voltage of direction impedance relay in case of only asynchronous motors powered by line Yidan

根据图 4 所示的乙氮线有功曲线,对乙氮线 BC 相间电流相位显著变化的原因作如下阐释:

① 甲乙北线乙侧发生故障时,乙氮线所带同步电动机的电磁转矩和机械转矩不平衡,导致其角速度变化,而角速度变化又会引起电磁转矩和机械转矩的进一步变化;

② 在距离 I 段第 1 次动作前,同步电动机角速度呈下降趋势,从而导致乙氮线乙侧 BC 相间电流相位的显著变化。

综上所述,由于乙氮线用户侧负荷的响应特性(主要是高压同步电动机的响应),导致 LFP-941A 距离 I 段满足比相动作条件,距离 I 段保护动作。

3 C 相断线并与 B 相搭接的故障分析

3.1 理论推导

该故障示意图如图 9 所示。图 9 中,记甲乙北线路断相处为故障口 F1,线路 BC 相搭接处为故障口 F2。

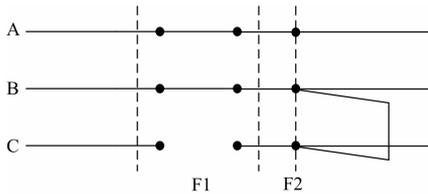


图 9 故障示意图
Fig. 9 Fault schematic

正、负序等值网络及节点编号如图 10 所示。图 10 中,节点 1 表示甲站 110 kV 母线;节点 5 表示乙站 110 kV I 号母线;故障口 F1 由节点 2、3 构成,故障口 F2 由节点 4 和零电位点构成; $Z_{S(1)}$ 、 $Z_{S(2)}$ 分别表示节点 1 侧的正序和负序等值阻抗; \dot{E} 表示节点 1 侧的等效电势; $Z_{Y(1)}$ 、 $Z_{Y(2)}$ 分别表示节点 5 侧的正序和负序等值阻抗; $Z_{L(1)}$ 表示甲乙北线甲侧至 C 相断线处的正序等值阻抗; $Z_{LII(1)}$ 表示甲乙北线 C 相断线处至 BC 两相搭接处的正序等值阻抗; $Z_{LIII(1)}$ 表示甲乙北线 BC 两相搭接处至甲乙北线乙侧末端的正序等值阻抗。由于线路正、负序阻抗相等,故 $Z_{L(1)}$ 、 $Z_{LII(1)}$ 、 $Z_{LIII(1)}$ 也表示相应的负序阻抗。因乙站及其负荷侧中性点未接地,无零序电流通路,所以图 10 中未画出零序等值网。需要说明的是,根据对乙氮线用户侧的响应分析可知,在发生该种双重故障时,因乙氮线用户侧高压同步电动机负荷已停运,所以节点 5 侧无电源。

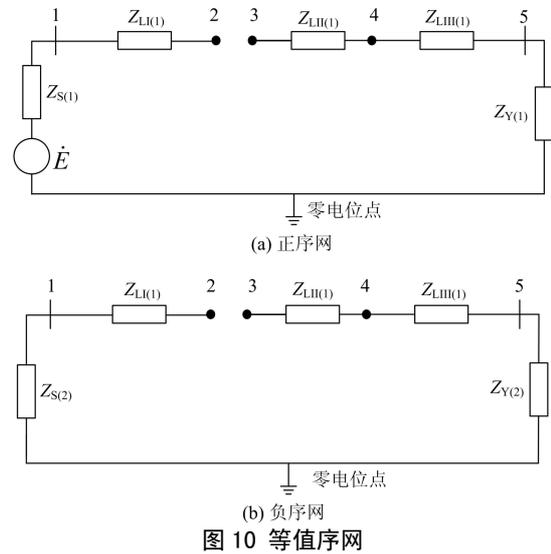


图 10 等值网

Fig. 10 Equivalent sequence networks

下面进行理论推导^[8-10],推导时,全部采用标幺值形式。

① 形成正序和负序节点阻抗矩阵

由图 10 所示的等值网络,可得到正、负序节点阻抗矩阵,分别表示为

$$\mathbf{Z}_{(1)} = \begin{bmatrix} Z_{S(1)} & Z_{S(1)} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{S(1)} & Z_{S(1)} + Z_{L(1)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{LII(1)} + Z_{LIII(1)} + Z_{Y(1)} & Z_{LIII(1)} + Z_{Y(1)} & Z_{Y(1)} \\ 0 & 0 & Z_{LIII(1)} + Z_{Y(1)} & Z_{LIII(1)} + Z_{Y(1)} & Z_{Y(1)} \\ 0 & 0 & Z_{Y(1)} & Z_{Y(1)} & Z_{Y(1)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{Z}_{(2)} = \begin{bmatrix} Z_{S(2)} & Z_{S(2)} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{S(2)} & Z_{S(2)} + Z_{L(1)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{LII(1)} + Z_{LIII(1)} + Z_{Y(2)} & Z_{LIII(1)} + Z_{Y(2)} & Z_{Y(2)} \\ 0 & 0 & Z_{LIII(1)} + Z_{Y(2)} & Z_{LIII(1)} + Z_{Y(2)} & Z_{Y(2)} \\ 0 & 0 & Z_{Y(2)} & Z_{Y(2)} & Z_{Y(2)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{Z}_{Port(1)} = \begin{bmatrix} Z_{L(1)} + Z_{S(1)} + Z_{Y(1)} & -Z_{LIII(1)} - Z_{Y(1)} \\ -Z_{LIII(1)} - Z_{Y(1)} & Z_{LIII(1)} + Z_{Y(1)} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{Z}_{Port(2)} = \begin{bmatrix} Z_{L(1)} + Z_{S(2)} + Z_{Y(2)} & -Z_{LIII(1)} - Z_{Y(2)} \\ -Z_{LIII(1)} - Z_{Y(2)} & Z_{LIII(1)} + Z_{Y(2)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

② 形成正序和负序口阻抗矩阵

根据口阻抗的物理意义和节点阻抗矩阵,正序和负序网口阻抗矩阵可分别表示为式(7)和式(8)。式(7)、式(8)中, $Z_{L(1)} = Z_{L(1)} + Z_{LII(1)} + Z_{LIII(1)}$ 。

③ 建立故障计算方程

正、负序网络故障口的电压方程分别表示为

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{F1(1)} \\ \dot{V}_{F2(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{V}_{F1}^{(0)} \\ \dot{V}_{F2}^{(0)} \end{bmatrix} - \mathbf{Z}_{\text{port}(1)} \begin{bmatrix} \dot{I}_{F1(1)} \\ \dot{I}_{F2(1)} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{F1(2)} \\ \dot{V}_{F2(2)} \end{bmatrix} = -\mathbf{Z}_{\text{port}(2)} \begin{bmatrix} \dot{I}_{F1(2)} \\ \dot{I}_{F2(2)} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式(9)、式(10)中, $\dot{V}_{F1(1)}$ 、 $\dot{V}_{F1(2)}$ 分别表示故障口 F1 的正、负序电压; $\dot{I}_{F1(1)}$ 、 $\dot{I}_{F1(2)}$ 分别表示故障口 F1 的正、负序电流; $\dot{V}_{F2(1)}$ 、 $\dot{V}_{F2(2)}$ 分别表示故障口 F2 的正、负序电压; $\dot{I}_{F2(1)}$ 、 $\dot{I}_{F2(2)}$ 分别表示故障口 F2 的正、负序电流; $\dot{V}_{F1}^{(0)}$ 、 $\dot{V}_{F2}^{(0)}$ 分别表示两个故障口的开路电压, 并可表示为式(11)、式(12)。

$$\dot{V}_{F1}^{(0)} = \dot{E} \quad (11)$$

$$\dot{V}_{F2}^{(0)} = 0 \quad (12)$$

两处故障都属于并联型故障, 以 A 相为对称分量基准相, 故障口 F1 发生 C 相开断的边界条件为

$$\begin{cases} a\dot{I}_{F1(1)} + a^2\dot{I}_{F1(2)} = 0 \\ a\dot{V}_{F1(1)} = a^2\dot{V}_{F1(2)} = \dot{V}_{F1(0)} \end{cases} \quad (13)$$

式中, $\dot{V}_{F1(0)}$ 表示故障口 F1 的零序电压。

故障口 F2 发生 BC 两相搭接的边界条件为

$$\begin{cases} \dot{I}_{F2(0)} = 0 \\ \dot{I}_{F2(1)} + \dot{I}_{F2(2)} = 0 \\ \dot{V}_{F2(1)} = \dot{V}_{F2(2)} \end{cases} \quad (14)$$

④ 求解序网口电流和口电压

根据两故障的边界条件和正、负序网络故障口电压方程, 即式(9)~式(14), 联立求出正序和负序网的口电流 $\dot{I}_{F1(1)}$ 、 $\dot{I}_{F2(1)}$ 、 $\dot{I}_{F1(2)}$ 、 $\dot{I}_{F2(2)}$, 进而求出正序和负序网的口电压 $\dot{V}_{F1(1)}$ 、 $\dot{V}_{F1(2)}$ 、 $\dot{V}_{F2(1)}$ 、 $\dot{V}_{F2(2)}$ 。

⑤ 求解节点 5 的零序电压

由式(13)及上一步求出的故障口 F1 的正序电压, 可求出节点 5 的零序电压, 其表达式为

$$\dot{V}_{5(0)} = \frac{-a\dot{E}Z_M}{Z_N} \quad (15)$$

式中:

$$\begin{aligned} Z_M &= Z_{LIII(1)}(2Z_{L(1)} + a^2Z_{LIII(1)} + 2Z_{S(2)}) + \\ &(Z_{L(1)} + Z_{S(2)} - aZ_{LIII(1)})(Z_{Y(1)} + Z_{Y(2)}) + \\ &(1-a)Z_{Y(1)}Z_{Y(2)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_N &= Z_{LIII(1)}(4Z_{L(1)} - Z_{LIII(1)} + 2Z_{S(1)} + 2Z_{S(2)}) + \\ &(Z_{Y(1)} + Z_{Y(2)})(Z_{S(1)} + Z_{S(2)} + 2Z_{L(1)} + Z_{LIII(1)}) + \\ &3Z_{Y(1)}Z_{Y(2)} \end{aligned}$$

则节点 5 的零序电压幅值为

$$|\dot{V}_{5(0)}| = \frac{|\dot{E}||Z_M|}{|Z_N|} \quad (16)$$

在两故障靠近节点 5 的情况下, 若近似认为 $Z_{LIII(1)}=0$, 并且各元件正序阻抗约等于其负序阻抗, 则可将节点 5 的零序电压幅值表示为

$$|\dot{V}_{5(0)}| \approx \frac{|\dot{E}||2 + (1-a)K|}{|4 + 3K|} \quad (17)$$

式中, $K = \frac{Z_{Y(1)}}{Z_{L(1)} + Z_{S(1)}}$ 。

由式(17), 可以看出, 节点 5 的零序电压幅值很大程度上取决于系数 K。

⑥ 求解距离 I 段方向阻抗继电器比相方程

根据各序网的阻抗节点方程可得节点 5 的电压, 再根据节点 5 的序电压和乙氮线的序阻抗, 求出乙氮线的相电流, 最后根据式(1)、式(2)计算方向阻抗继电器的工作电压和极化电压。工作电压和极化电压之比表示为

$$\frac{\dot{U}_{OP\Phi\Phi}}{\dot{U}_{P\Phi\Phi}} = \frac{\bar{Z}_{zd}(Z_{yd(2)} - Z_{yd(1)})}{Z_{yd(1)}Z_{yd(2)}e^{j\theta}} \quad (18)$$

式中: \bar{Z}_{zd} 表示乙氮线距离保护整定阻抗归算到一次侧的标幺值; $Z_{yd(1)}$ 和 $Z_{yd(2)}$ 分别表示乙氮线及所带负荷的正、负序等效阻抗。

相应的方向阻抗继电器的比相方程为

$$\arg \frac{\dot{U}_{OP\Phi\Phi}}{\dot{U}_{P\Phi\Phi}} = \arg \left(\frac{\bar{Z}_{zd}(Z_{yd(2)} - Z_{yd(1)})}{Z_{yd(1)}Z_{yd(2)}e^{j\theta}} \right) \quad (19)$$

由式(19)可知, 在甲乙北线乙侧 C 相断线并与 B 相搭接的双重故障下, 距离 I 段保护是否动作取决于乙氮线及所带负荷的正、负序等效阻抗。

3.2 乙站 1 号主变跳闸原因

首先用录波和仿真来核查乙站 1 号主变零序过压保护动作是否正确。按录波数据和按仿真模型得到的乙站 110 kV I 母 $3U_0$ 二次侧有效值分别如图 11、图 12 所示, 可见, 在甲乙北线乙侧发生 C 相断线并与 B 相搭接的情况下, $3U_0$ 二次侧有效值大于整定值 180 V, 乙站 1 号主变零序过压保护动作正确。

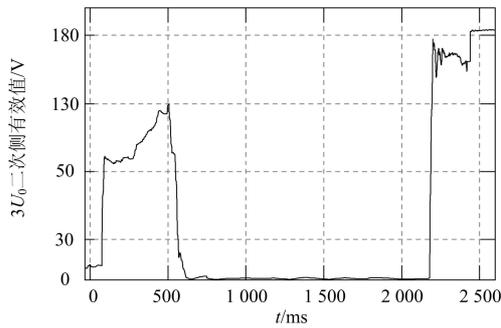


图 11 按录波数据得到的乙站 110 kV I 母 $3U_0$ 二次侧有效值
Fig. 11 Effective value of the secondary side for $3U_0$ at 110 kV bus I in substation Yi obtained from recorded data

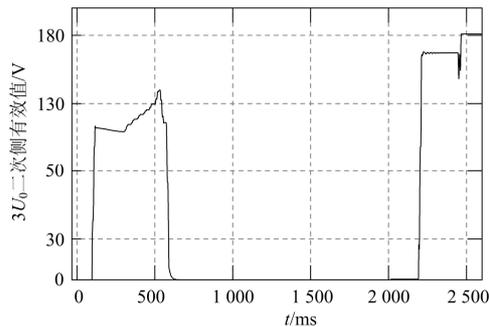


图 12 仿真得到的乙站 110 kV I 母 $3U_0$ 二次侧有效值
Fig. 12 Effective value of the secondary side for $3U_0$ at 110 kV bus I in substation Yi obtained from simulation

其次,用式(16)估算乙站 110 kV I 号母线的 $3U_0$ 二次侧有效值。根据故障时运行方式,针对甲乙北线乙侧发生 C 相断线并与 B 相搭接的情况,对式(16)中涉及的相关电气量进行估算,得到节点 5 (即乙站 110 kV I 号母线)的零序电压有效值,为 38.467 5 kV,相应地 $3U_0$ 二次侧有效值为 181.711 8 V。若按式(17)估算乙站 110 kV I 号母线的零序电压有效值,则为 38.458 4 kV,相应的 $3U_0$ 二次侧有效值为 181.668 6 V。因 $3U_0$ 二次侧有效值大于整定值 180 V,乙站 1 号主变零序过压保护动作。可见,定性分析结果与事故实际情况、仿真波形相符。

3.3 用户线 124 保护第 2 次动作跳闸原因

在乙站 1 号主变跳闸后,乙氮 124 保护距离 I 段再次动作。因此时,乙氮线所带高压同步电动机已停机,所以距离 I 段再次动作的原因与第 1 次动作的原因是不同的。按第 3.1 节的理论分析可知,在甲乙北线乙侧发生 C 相断线并与 B 相搭接的双重故障情况下,乙氮线距离 I 段是否动作取决于乙氮线及所带负荷的正、负序等效阻抗。

根据故障时运行方式,对式(19)所涉及的电气量进行估算,再由式(19),得到方向阻抗继电器工作电压与极化电压的相位差,为 49.43° ,此值满足方向阻抗继电器比相动作条件。可以看到,定性分

析的结果与事故实际情况吻合,距离 I 段满足动作特性,距离 I 段保护动作。

4 结束语

本文针对实际电网中发生的一起复杂故障,运用仿真模拟和理论分析的手段,深入分析了故障过程中相关保护的動作行为,结论为

① 故障中,相关保护动作行为符合保护装置原理。

② 故障中,乙氮线所带负荷的动态行为是乙氮线距离 I 段保护两次动作跳闸的主要因素,第 1 次动作跳闸主要取决于乙氮线所带高压同步电动机负荷的响应特性;第 2 次动作跳闸取决于乙氮线及所带异步电动机负荷的正、负序等效阻抗。

③ 故障发生时,系统处于一种特殊的运行方式,又因供电线路 C 相断线并与 B 相搭接,造成乙站 1 号主变零序过压保护动作,进而主变跳闸。由于 C 相断线并与 B 相搭接故障的发生属小概率事件,因此,不建议在此类特殊运行方式下,专门对 220 kV 主变零序过压保护装置进行调整。

④ 论文针对线路 C 相断线并与 B 相搭接的故障,所做的推导具有一定的普遍意义。

参考文献

- [1] 周文,毛志强,毛志芳,等.一起线路接地故障引起机组主变保护误动的事故分析[J].电力系统保护与控制,2010,38(12):149-152.
ZHOU Wen, MAO Zhi-qiang, MAO Zhi-fang, et al. Analysis of the main transformer differential protection maloperation of generator units caused by single-phase ground fault[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(12): 149-152.
- [2] 胡卫东,王凤岭,柏峰,等.一起 500 kV 接地故障暂态特征和继电保护动作行为分析[J].电力系统保护与控制,2010,38(2):83-85,105.
HU Wei-dong, WANG Feng-ling, BAI Feng, et al. Analysis on ground fault transient characteristics and the behaviour of protection of 500 kV transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 83-85, 105.
- [3] 邓茂军,许云龙,张童,等.变压器区外故障 CT 饱和对主变保护的影响[J].电力系统保护与控制,2012,40(4):129-133.
DENG Mao-jun, XU Yun-long, ZHANG Tong, et al.

- Analysis on outside transformer fault causing CT saturation and its influence on transformer protection[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(4): 129-133.
- [4] 束洪春, 田鑫萃, 董俊, 等. 基于多重分形谱的高压直流输电线路区内外故障识别方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 251-258.
- SHU Hong-chun, TIAN Xin-cui, DONG Jun, et al. Recognition method of HVDC transmission line fault based on multifractal spectrum[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 251-258.
- [5] 齐磊, 原辉, 李琳, 等. 架空电力线路故障状况下对埋地金属管道感性耦合的传输线计算模型[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 264-270.
- QI Lei, YUAN Hui, LI Lin, et al. Transmission line modelling of inductive coupling of overhead power lines subjected to grounding fault to underground metal pipeline[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 264-270.
- [6] 尹金良, 朱永利, 俞国勤, 等. 基于高斯过程分类器的变压器故障诊断[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 158-164.
- YIN Jin-liang, ZHU Yong-li, YU Guo-qin, et al. Fault diagnosis of transformers based on Gaussian process classifier[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 158-164.
- [7] 金勇, 叶锋. 用于 110 kV 输电线路的成套微机保护装置 LFP-941[J]. 电力系统自动化, 1995, 19(5): 45-48.
- JIN Yong, YE Feng. A new digital protection equipment used on high voltage transmission line-LFP-941[J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(5): 45-48.
- [8] 刘万顺, 黄少峰, 徐玉琴. 电力系统故障分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- LIU Wan-shun, HUANG Shao-feng, XU Yu-qin. Power system fault analysis[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [9] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- ZHU Sheng-shi. The theory and technique of high voltage network protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.
- [10] BLACKBURN J L. Symmetrical components for power systems engineering[M]. New York: Marcel Dekker, Inc, 1993.
-
- 收稿日期: 2013-12-05; 修回日期: 2014-03-18
- 作者简介:
- 黄 淼 (1978-), 男, 博士, 工程师, 研究方向为电力系统故障分析和电磁暂态仿真; E-mail: 412512836@qq.com
- 黄 敏 (1983-), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为继电保护;
- 庄 凯 (1982-), 男, 博士, 工程师, 研究方向为电力系统故障分析和电磁暂态仿真。