

一种新的高压线路振荡选相元件

索南加乐¹, 刘凯¹, 刘世明², 焦在滨¹, 张恽宁¹, 李小滨²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 烟台东方电子信息产业股份有限公司, 264001, 烟台)

摘要: 提出了一种基于阻抗相对变化的高压线路保护选相新原理, 用作振荡期间的选相元件. 对接地故障, 利用零序、负序电流之间相位差进行分区, 每个分区包括某相单相接地和另外两相短路接地两种故障, 根据故障环上的测量阻抗为一恒定数值, 而非故障环上的测量阻抗随振荡变化这一特征, 来得到选相结果. 本元件提高了振荡中不对称接地故障的选相速度, 不受系统运行方式和分支系数的影响, 且易于实现, 在现有的微机保护装置中可以直接使用. 动模数据仿真表明, 新选相元件具有较快的选相速度, 文中算例可以在 60 ms 内选出故障相.

关键词: 电力系统; 线路保护; 振荡; 选相元件

中图分类号: TM733 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)08-0949-05

New Fault Phase Selector for High Voltage Transmission Line Protective Relaying During Power Swing

Suonan Jiale¹, Liu Kai¹, Liu Shiming², Jiao Zaibin¹, Zhang Yining¹, Li Xiaobin²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Yantai Dongfang Electric Information Industry Co., Ltd. Yantai 264001, China)

Abstract: Based on the relative variation of impedance during power swing, a novel phase selector for high voltage transmission lines is proposed. When a grounding fault occurs, the fault is divided into three regions according to the phase-angle between the zero sequence and negative sequence components of the current, and each region contains one kind of single-phase-to-ground fault and the other kind of other two phase-to-phase-with-ground fault. Aiming at the characteristic that the measured impedance remains constant in faulty phase and variable in sound phase, the fault phase can be selected. The proposed phase selector enables to select the fault phase quickly during power swing, and different system cases have no effect on the selector. The performance of the proposed method is evaluated with the data created by dynamic model system, and the results show that the selector is able to identify fault phases within 60 ms.

Keywords: power system; transmission line protection; power swing; fault phase selector

目前在高压线路保护中一般采用突变量选相和稳态量选相结合, 突变量选相主要用于故障初期^[1], 在故障后期和系统振荡期间采用稳态量选相元件^[2].

系统振荡中的选相问题一直没有得到很好的解决, 国内外的继电保护工作者对此进行了大量的研究^[3-5]. 目前的保护一般是利用负序和零序电流之间

的相位关系, 再结合阻抗进行选相^[4], 这种方法因使用了阻抗判别, 必须在系统两侧电源电势角差小的情况下才能使用. 文献[5]提出了基于相间故障弧光电压特征的选相元件, 对振荡中选相的性能有所改善. 但是, 这个元件仍有不足, 振荡中线路发生相间接地故障时, 选相速度未有提升, 当振荡中线路发生单相接地故障, 要在两侧电源电势角差小于 145° 时

才可以选出故障相别。

振荡期间的故障选相元件,其难点和核心问题是从不对称接地故障中选出故障相^[5]。本文根据振荡中线路上发生不对称接地故障时,故障环上的测量阻抗不变,而非故障环上的测量阻抗随振荡而变化的特点,提出了基于阻抗相对变化原理的选相元件,对于不对称接地故障,可以快速选出故障相别。理论分析和动模数据验证了新选相元件的快速性和有效性。

1 振荡中保护存在的问题

1.1 保护动作速度慢

为避免振荡时距离保护误动,保护中采取了振荡闭锁措施,当有故障时才开放保护。对于不对称故障,一般采用不对称故障开放条件

$$I_2 + I_0 \geq mI_1 \quad (1)$$

式中: I_2 、 I_0 和 I_1 分别是保护测量到的负序、零序和正序电流有效值;制动系数 m 为0.5~0.7,一般取 $m=0.65$ 。当式(1)满足时开放保护。

系统振荡后,如果故障发生于线路出口处,式(1)可以立即满足。如果故障点距离保护较远,保护测量到的零序、负序电流会较小。记两侧电源电势角差为 δ ,如故障时 δ 较大,则式(1)不易满足,要在 δ 变小时才能满足,导致保护不能快速动作。

图1为双侧电源供电的单回线模型,如在F点发生故障,因M侧保护远离故障点,测量到的零序、负序电流小,只有 δ 在 0° 左右时式(1)才能满足并开放保护,M侧保护动作速度会较慢。

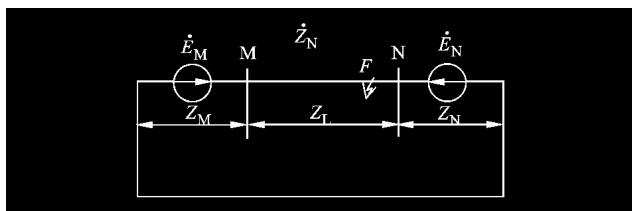


图1 系统模型

1.2 单相故障时保护有时会误跳三相

振荡时线路发生单相故障,希望两侧保护快速跳闸,且仅切除故障相,这样对系统最有利,但因保护要在式(1)满足时才开放,线路两侧的保护投入时刻会有不同。于是有可能在单相故障的情况下先开放侧先跳闸,造成后开放侧误提前开放、误选相而三相跳闸^[6]。

可见,振荡中线路发生故障时,保护的性有待提高。振荡中线路发生故障时,故障相继电器可以正

确测量。如果能够正确选相,则可以根据选相结果直接投入距离元件,不再需要故障开放元件,保护可以快速动作。本文提出了基于阻抗相对变化的选相元件,不需等待不对称故障开放条件满足后才投入,选相速度快,可以有效地解决上述问题。

2 基于阻抗相对变化的高压线路选相元件

2.1 故障相和健全相阻抗的特征

系统振荡时,保护的测量阻抗为^[1]

$$Z = -Z_M + (Z_M + Z_L + Z_N)/(1 - \dot{E}_N/\dot{E}_M)$$

式中: Z_M 、 Z_N 为两侧系统阻抗; Z_L 为线路阻抗; $\dot{E}_M$ 、 $\dot{E}_N$ 为两侧系统电源电势。测量阻抗 Z 随振荡而变化。

故障时,设线路上发生了a相金属性接地故障。a相测量阻抗为 $Z_a = \dot{U}_a/(\dot{I}_a + k3\dot{I}_0)$,其中 $\dot{U}_a$ 、 $\dot{I}_a$ 为a相电压和电流, $\dot{I}_0$ 为零序电流, k 为零序补偿系数。 Z_a 可以正确反映从保护安装处到故障点的距离,且不随振荡而变化。此时b、c相间测量阻抗为 $Z_{bc} = \dot{U}_{bc}/\dot{I}_{bc}$,其中 $\dot{U}_{bc}$ 、 $\dot{I}_{bc}$ 分别为b、c相间电压和电流,测量值 Z_{bc} 不受a相故障的影响,仍随振荡而变化。

当发生b、c两相接地故障时, Z_{bc} 反映保护安装处到故障点的距离,不随振荡而变化。 Z_a 虽受故障时产生的零序电流的影响,但仍是随振荡而变化的。

2.2 选相元件的基本原理

振荡中线路发生短路故障时,与故障相别对应的测量阻抗不变,而健全相的测量阻抗仍随振荡呈周期性变化。基于这种特征,本文提出了基于阻抗相对变化的选相元件。

对于不对称接地故障,根据零、负序电流的相位差可分成如下区域:A区(包括AG和BCG; $-30^\circ \sim +90^\circ$);B区(包括BG和CAG; $+90^\circ \sim +210^\circ$);C区(包括CG和ABG; $-150^\circ \sim -30^\circ$)。其中,AG、BG、CG、BCG、CAG、ABG等故障类型的定义参见文献^[7]。

当发生BCG故障时,b、c相间阻抗不变,而a相测量阻抗不断变化。反之,当发生a相接地故障时,a相的测量阻抗不变,与之对应的b、c相间测量阻抗则不断变化。本元件据此特征来选相。当保护测量到零序及负序电流时,记录当时的a相阻抗 Z_a^0 和b、c相间阻抗 Z_{bc}^0 ,然后不断检测这两个阻抗的相对变化量,表达式如下

$$\left. \begin{aligned} |Z_a^k - Z_a^0| &> k_1 |Z_{bc}^k - Z_{bc}^0| \\ |Z_a^k - Z_a^0| &> Z_{Set} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} |Z_{bc}^k - Z_{bc}^0| &> k_1 |Z_a^k - Z_a^0| \\ |Z_{bc}^k - Z_{bc}^0| &> Z_{Set} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

当阻抗关系满足式(2)时,确认为 b、c 相间接地故障,满足式(3)时,确认为 a 相故障。

只要健全相的阻抗变化量大于故障相的阻抗变化量,就可以确定故障相别,所以系数 k_1 只要整定大于 1 即可,一般可取 1.1~1.2。 Z_{Set} 为阻抗变化量定值,当健全相的阻抗变化量大于此定值时,才确认选相结果,以保证可靠性,其整定值只需躲开因频率偏移而引起的阻抗计算误差。发生故障时,故障环上的测量阻抗理论上不会变化,只要因频率偏移而引起的计算误差不超过 Z_{Set} ,就不会误选。

振荡中线路发生三相故障时,有些保护装置利用阻抗变化率 dZ/dt 来开放保护,如下式

$$(Z_k - Z_{k-nT_s})/(nT_s) < \epsilon \quad (4)$$

式中: T_s 为采样间隔。本方法与 dZ/dt 有些类似,但有本质区别。振荡中发生三相短路故障时,阻抗变化率理论上为 0,式(4)满足,延时开放保护。为了保证在振荡周期长时不误开放,式(4)要加较长的延时,因此在振荡周期短时不利于保护的快速动作。

基于阻抗相对变化的选相元件选相所需的时间与振荡周期自适应。对于周期长的振荡,健全相的阻抗变化会慢一些,其变化量超过 Z_{Set} 的时间要长一些,选相所需时间稍长,对于周期短的振荡,则可以更快地确认故障相。

2.3 选相元件的改进

在振荡过程中,健全相的阻抗呈周期性变化。设在 $\delta=\delta_0$ 时的阻抗为 Z_{δ_0} ,在 $\delta=360^\circ+\delta_0$ 时的阻抗为 $Z_{360^\circ+\delta_0}$,则 $Z_{\delta_0}=Z_{360^\circ+\delta_0}$,二者之差为 0,式(2)或式(3)不再满足,选相结果出现中断。

因为健全相的阻抗在周期性变化,所以如固定阻抗初值,总是会出现选相结果中断的情况。为弥补这个缺陷,一个简单的办法是实时比较故障相与健全相的阻抗变化率

$$|Z_a^k - Z_a^{k-nT_s}| > k_2 |Z_{bc}^k - Z_{bc}^{k-nT_s}| \quad (5)$$

$$|Z_{bc}^k - Z_{bc}^{k-nT_s}| > k_2 |Z_a^k - Z_a^{k-nT_s}| \quad (6)$$

式中: k_2 为可靠系数,可以取为 1.1~1.2。

式(5)、式(6)与式(2)、式(3)的区别在于不记录初值,不会出现因记录初值而导致的健全相阻抗变化量为 0 的情况。本文利用这个特点对新选相元件进行辅助判别。

例如,当式(2)满足时,选择为 b、c 相间接地故障,

如果式(2)不满足,则检测式(5)是否满足,如果满足,仍然确认为 b、c 相间接地故障。同样,当式(3)满足时,确认为 a 相故障,如果式(3)不满足,则检测式(6)是否成立,如果成立,则仍然确认为 a 相接地故障。

2.4 选相元件的流程

当 $I_0 > 0.05I_1$ 且 $I_0 > 0.1$ A 时,确认系统中有零序电流;当 $I_2 > 0.05I_1$ 且 $I_2 > 0.15$ A 时,确认有负序电流。检测到零序、负序电流后,通过零序、负序电流之间的相位差进行分区(本例为 A 区),如果 $U_{bc}\cos\varphi > U_g$ (式中各符号的意义见文献[5]),则可以确定是 a 相接地故障。否则分区后(本例为 A 区),记录当时的 a 相接地阻抗 Z_a^0 和相间阻抗 Z_{bc}^0 ,实时计算 a 相接地阻抗 Z_a^k 和相间阻抗 Z_{bc}^k ,将其与 Z_a^0 和 Z_{bc}^0 相比较,记 $\Delta Z_a = Z_a^k - Z_a^0$, $\Delta Z_{bc} = Z_{bc}^k - Z_{bc}^0$ 。如果阻抗变化关系满足式(3),即 $\Delta Z_{bc} > k_1 \Delta Z_a$,则选为 a 相故障。如果不满足,检查一下上次的选相结果,如果上次选为 a 相,则判断阻抗的变化关系是否满足式(6),如果式(6)满足,仍旧保持上次的选相结果。

如果阻抗变化关系满足式(2),即 $\Delta Z_a > k_1 \Delta Z_{bc}$,则选为 b、c 相间故障。如式(2)不满足,检查一下上次的选相结果,如果上次选为 b、c 相间故障,判断式(5)是否满足,如果阻抗变化关系满足式(5),仍旧保持上次的选相结果。

图 2 为基于阻抗相对变化的选相元件的简化流程图。图中 α 为以 a 相为基准的零序电流超前负序电流的角度,当 $-30^\circ < \alpha \leq 90^\circ$ 时,为 A 区。

3 仿真分析

本节利用动模实验数据,验证了新选相元件的性能。实验采用 500 kV 双回无互感输电线路系统模型,线路长度为 400 km,动模实验的系统模型及运行参数见文献[7]。系统振荡时,在 M 侧出口、线路中点、N 侧出口 3 个点模拟各种不对称接地故障。因目前保护在振荡中的动作速度主要受制于不对称故障开放条件,本文将基于阻抗相对变化的选相元件的输出时刻及不对称故障开放条件式(1)满足的时刻示于图 3~图 5 中,以做对比。两种算法的输出结果都经过了 25 ms 的延时, Z_{Set} 取为 1 Ω ,已足够保证可靠性。

图 3~图 5 中绘出了零序电流,以清楚地分辨故障起始时刻。不对称故障开放条件式(1)的判别结果,1 表示当前的电流条件满足式(1),0 表示不满

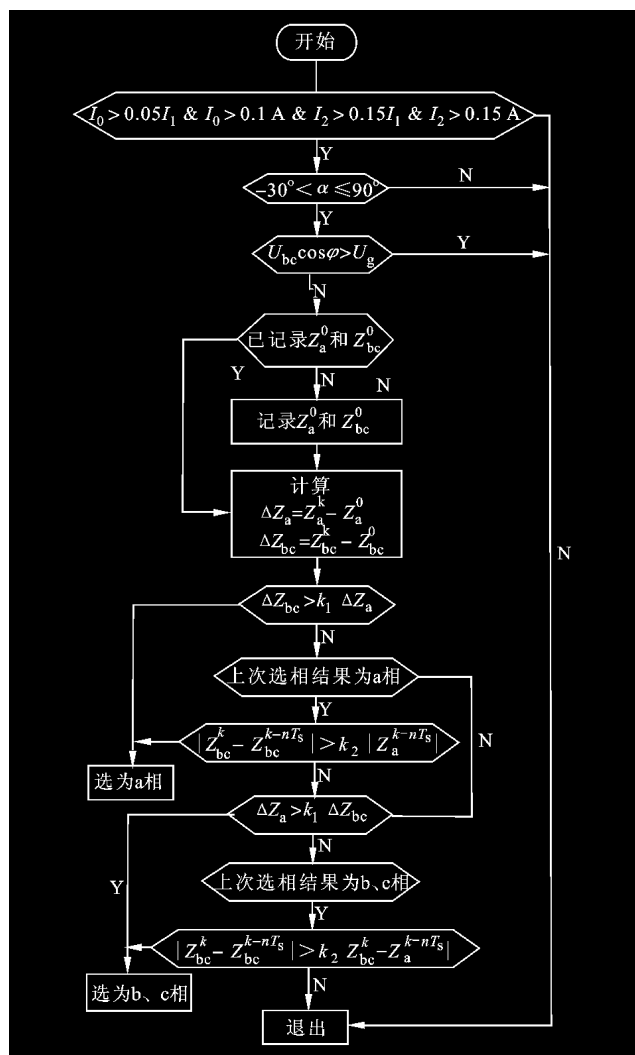


图2 基于阻抗相对变化的选相元件的流程图

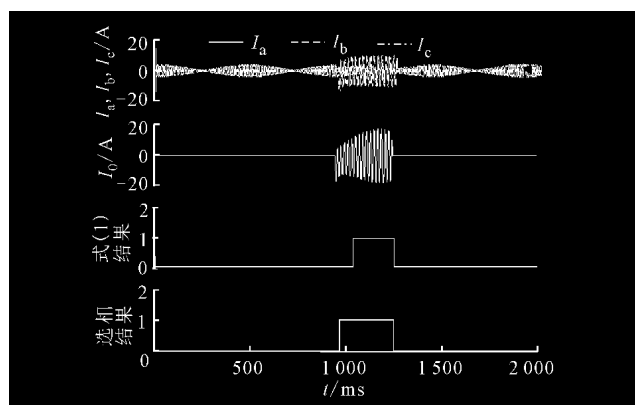


图3 M侧出口 b、c 两相接地时的仿真结果

足. 基于阻抗相对变化的选相元件的选相结果, 1 表示该选相元件选出了故障相, 0 表示没有.

图3为在M侧出口发生 b、c 两相接地故障时的情况, 振荡周期为 450 ms. 图4为在线路中点发生 b 相接地故障时的情况, 振荡周期为 478 ms. 可

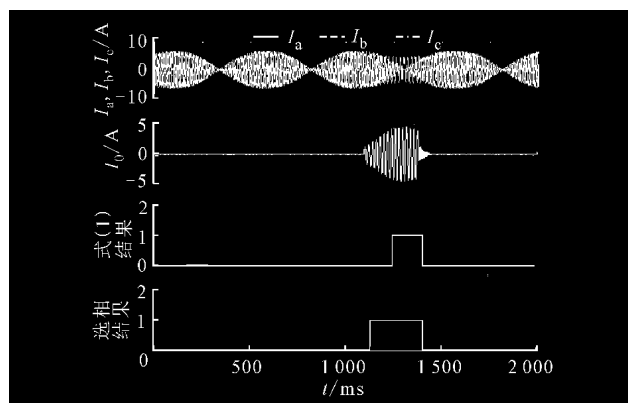


图4 线路中点 b 相接地时的仿真结果

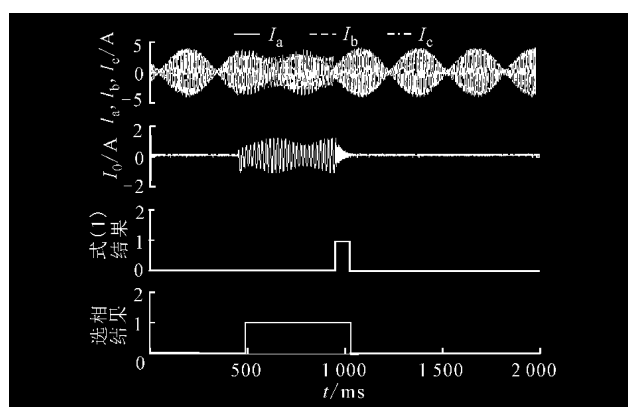


图5 N侧出口 b、c 两相接地时的仿真结果

以看出, 基于阻抗相对变化的选相元件可以在故障后的几十毫秒内就判断出故障相别, 而式(1)则要在两侧电源电势角小的时候才能开放保护.

图5为在N侧出口发生 b、c 两相接地故障时的情况, 振荡周期为 300 ms. 使用基于阻抗相对变化的选相元件, 可以在几十毫秒内选出故障相别. 式(1)在第1个 \$\delta\$ 过零点的时刻并没有满足, 这是因为振荡周期短, 且式(1)的输出经过了 25 ms 的延时. 到了第2个电源电势角很小的时刻, 式(1)才满足.

从上面仿真结果来看, 使用基于阻抗相对变化的选相元件, 基本上可以在故障后几十毫秒内选出故障相别. 对于远方故障, 式(1)要在电源电势角很小的时刻才能开放保护, 且如果振荡周期很短, 式(1)的延时较长, 保护可能一直不会开放.

4 结 论

振荡中线路发生故障时, 根据故障环上的测量阻抗为一恒定数值, 而非故障环上的测量阻抗仍随振荡而变化的特征, 提出了基于阻抗相对变化的选相元件. 与目前采用的振荡期间选相元件相比, 该选相元件有如下优势.

(1)选相速度快.本选相元件利用振荡时故障相测量阻抗保持恒定,健全相阻抗仍在变化的特征,采用比较其相对变化量的方法,可以很快地选出故障相别.

(2)选相速度与振荡周期自适应.振荡周期长时,健全相测量阻抗变化慢,选相所需时间稍长,当振荡周期短时,健全相测量阻抗变化快,选相速度会较快,选相速度与振荡周期自适应.

(3)可解决振荡中单相故障误跳三相的问题.振荡中线路发生单相故障时,因为两侧开关不可能同时跳开,在某些情况下,保护会误跳三相.基于阻抗相对变化的选相元件反映阻抗的相对变化,不受对侧开关跳开的影响,不会将单相故障误选为三相,较好地解决了这个问题.

参考文献:

- [1] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 3版. 北京:中国电力出版社,2005.
- [2] 陈朝晖,黄少锋,陶惠良,等. 新型阻抗选相方法[J]. 电力系统自动化,2005,29(3):51-56.
Chen Zhaohui, Huang Shaofeng, Tao Huiliang, et al. Research on the new phase selector based on impedance measurement[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(3):51-56.
- [3] 许庆强,索南加乐,杨立璠,等. 基于故障边界条件的高压输电线路故障选相元件[J]. 西安交通大学学报,2006,40(12):1446-1449.
Xu Qingqiang, Suonan Jiale, Yang Lifan, et al. A novel fault phase selector for HV transmission line protective relaying based on the boundary condition of three sequence voltages[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2006,40(12):1446-1449.
- [4] 索南加乐,许庆强,宋国兵,等. 电力系统振荡过程中序分量选相元件动作行为分析[J]. 电力系统自动化,2003,27(7):50-54.
Suonan Jiale, Xu Qingqiang, Song Guobing, et al. Analysis on the operating characteristic of the sequence-component fault phase selector during power swings[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(7):50-54.
- [5] 许庆强,索南加乐,柳焕章,等. 基于相间故障弧光电压特征的高压线路选相元件[J]. 电力系统自动化,2006,30(4):65-70.
Xu Qingqiang, Suonan Jiale, Liu Huanzhang, et al. Fault phase selector for HV transmission line protective relaying based on the characteristic of the arc voltage between two faulted phases[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(4):65-70.
- [6] 许庆强. 高压输电线路方向比较式纵联保护新原理与新技术的研究[D]. 西安:西安交通大学电气工程学院,2005.
- [7] 毛鹏,杨立璠,杜肖功,等. 基于RTDS的超高压线路保护装置的试验研究[J]. 继电器,2004,32(3):55-59.
Mao Peng, Yang Lifan, Du Xiaogong, et al. Research on extra high voltage line protection based on RTDS[J]. Relay,2004,32(3):55-59.

(编辑 杜秀杰)