

基于投切装置的小电流接地故障定位方法研究

尹扬¹, 薛涛²

(1. 中国南方电网有限责任公司深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518000;

2. 南方电网深圳数字电网研究院有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 为了解决消弧线圈的应用和接地故障的选线定位技术之间的矛盾, 以残留增量法作为参考, 采用一种基于投切装置与 FTU 的馈线自动化技术配合作用的故障选线定位方法, 在系统故障发生时, 投切装置所产生的电流首半波叠加于系统故障线路零序残流之上, 通过监测各出线零序电流的变化量, 便可实现故障选线。将投切装置应用于配电网自动化系统中, 使其与馈线自动化技术配合, 通过 MATLAB/Simulink 搭建系统模型, 并仿真验证了此原理方法的可行性。此方法保证了系统的稳定性, 并且不受故障点接地电阻大小的影响。
关键词: 消弧线圈; FTU; 投切装置; 馈线自动化; 配电网

Research on location method of small current grounding fault based on switching device

YIN Yang¹, XUE Tao²

(1. China Southern Power Grid Shenzhen Power Supply Co., Ltd., Shenzhen 518000, China;

2. China Southern Power Grid Shenzhen Digital Grid Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: In order to solve the contradiction between the application of the arc suppression coil and the positioning technology of ground fault line selection, with residual incremental method for reference, a fault line selection, positioning method based device and FTU based feeder automation technology is adopted. When the system failure occurs, the current produced by switching device in the first half wave is superposed on the system fault line zero sequence residues, by monitoring the change of line zero sequence current, the fault line selection is realized. The switching device is applied in the distribution network automation system to make it cooperate with the feeder automation technology. The system model is built through MATLAB /Simulink, and the feasibility of the principle and method is verified by simulation. This method ensures the stability of the system and is not affected by the grounding resistance at the fault point.

Key words: arc suppression coil; FTU; switching device; feeder automation; power distribution network

0 引言

随着城市配电系统的迅速发展, 系统规模不断扩大, 系统线路增多, 从而使得系统发生单相接地故障时电容的电流越来越大, 若不尽快找到并切除故障线路, 那么短路点的故障电流就会很大, 从而使接地点燃起电弧, 并且引起弧光过电

压, 进而使得非故障线路的相电压升高, 使绝缘遭受损坏, 破坏系统的安全运行^[1-2]。为保护系统的安全稳定运行, 对单相接地短路故障能起到选线定位并将故障区域隔离的保护装置研究就显得十分重要。

该保护装置的作用是小电流系统发生单相接地故障时, 能够在不跳闸的情况下显示出故障的线路并能发出信号, 当单相接地危害到对人身和设备的安全时, 可立刻跳闸, 从而对故障进行隔离^[3]。

现有的故障选线定位法总体可分两大类：第一类是对故障特征量检测分析的被动选线定位法；第二类是向故障系统注入信号进行寻迹判断的主动选线定位法。前者又可分为利用故障稳态特征量和暂态特征量的故障分析法。但由于系统结构、消弧线圈等因素，使故障发生达到稳态后，稳态的故障特征不明显，而故障暂态特征虽明显，但其出现作用时间很短，不易提取，以上因素都对系统故障量的检测判别产生严重的影响^[4]。

根据以上研究方法，基于投切装置与 FTU 的馈线自动化技术配合的故障选线定位方法搭建系统模型，仿真验证了此方法的可行性。

1 理论分析

1.1 基于投切装置定位方法

消弧线圈虽可利用自身的作用保护系统故障后维持其稳定性，但同时也削弱了系统的故障特征^[5-6]。为解决这一矛盾，采用一种作用于系统中性点的投切装置来改变消弧线圈补偿度的方法，投切装置为并联于消弧线圈两端的 RL 串联支路，投切装置作用于系统中性点的硬件结构等效图如图 1 所示。

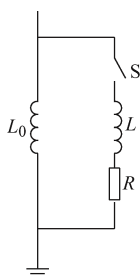


图 1 中性点硬件结构等效图

Fig. 1 Equivalence diagram of neutral hardware structure

图 1 中， L_0 表示消弧线圈； R 、 L 分别为投切装置的电阻及电感； S 为装置开关。

作用原理：系统发生单相接地短路故障后，消弧线圈产生的电流补偿系统故障线路电流，此时投切装置投入运行，装置开关导通时间内所产生的电流波形与系统故障线路补偿后的零序残流叠加，使其幅值发生改变，而这种变化量仅出现在中性点至故障点所构成的回路上的

零序电流，以此达到故障支路与非故障支路区分的目的。

1.2 基于 FTU 故障定位的矩阵算法

基于 FTU 馈线自动化技术故障定位的矩阵算法是指将所要采集的故障信息上传至主站系统，由主站系统对其进行分析处理的过程^[7]。首先对配电网的结构得到一个网络描述矩阵 D ，当系统故障发生时，根据装置于馈线各监测点 FTU 所上传的故障信息生成相应的故障信息矩阵 G ，通过故障判断矩阵 P 的描述便可知故障点出现在故障馈线上的哪两个监测点之间。

方法如下，首先对图 2 的馈线网络进行网络矩阵描述。

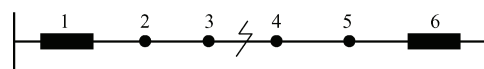


图 2 简单的馈线网络

Fig. 2 Simple feeder network

将馈线网络上的断路器以及各 FTU 视为节点进行编号，图 2 中的馈线网络共 6 个节点，对此可形成一个 6×6 方阵。若节点 i 与节点 j 之间存在馈线连接，则位于第 i 行第 j 列的元素和位于第 j 行第 i 列的元素均置为 1，称这两个节点为相邻节点；反之将不存在馈线的节点所对应的元素置为 0。这样便构成了反映馈线网络拓扑结构的网络描述矩阵 D 。

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

同样，故障信息方阵 G 也是一个 6×6 方阵。传统故障信息检测方法是各监测点的 FTU 设置一个故障电流整定值，当某个节点 i 上的 FTU 检测到流过该节点的电流值大于整定值时，则将故障信息矩阵的第 i 行和第 i 列的元素置 0，否则第 i 行和第 i 列的元素置 1。根据上述馈线网络的故障发生位置可得相应的故障信息矩

阵为

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

根据投切装置配合 FTU 检测的方法, 所检测的数据不再是故障电流值的大小与整定值的比较。当故障发生时, 各监测点 FTU 记录此时流过各节点故障电流值的量, 在投切装置运行后, 可依据当前故障电流值与之前的量进行比较, 运用比较前后的变化量来代替传统方法对故障电流值与整定值大小的比较。

最后, 将网络描述矩阵和故障信息矩阵两者相乘, 再将其进行规格化, 经过规格化处理后的矩阵就是故障判断矩阵 $\mathbf{P}$ 。

$$\mathbf{P} = \mathbf{g}(\mathbf{D} \times \mathbf{G}) \quad (3)$$

具体格式化方法为: 对于矩阵 $\mathbf{D}$ 中的元素 $d_{mj}, d_{nj}, \dots, d_{kj} = 1$, 同时矩阵 $\mathbf{G}$ 中的元素 g_{ji} 也为 1 时, 且 $g_{mm}, g_{nn}, \dots, g_{kk}$ 元素中至少两个为 0, 则将 $\mathbf{D} \times \mathbf{G}$ 阵中的第 j 行和第 j 列元素进行规格化处理, 即第 j 行和第 j 列元素全部为 0, 不满足上述两个条件元素值不变的要求。根据上图馈线网络的故障区段情况, 可得出如下故障判断矩阵 $\mathbf{P}$

$$\mathbf{P} = \mathbf{g}(\mathbf{D} \times \mathbf{G}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

故障区段的判定可由故障判断矩阵得出, $\mathbf{P}$ 中元素 $p_{ij} \text{ XOR } p_{ji} = 1$, 则节点 i 与节点 j 之间为故障区段, 故障隔离时应断开第 i 节点和第 j 节点, XOR 表示异或。通过 $\mathbf{P}$ 矩阵判断 $p_{34} \text{ XOR } p_{43} = 1$, 可知验证上图馈线网络的故障区段位于节点 3 与

节点 4 之间。

2 系统参数对投切装置的影响

2.1 导通角对投切装置的影响

投切装置作用于系统中性点的零序等效电路, 如图 3 所示。 U_0 为系统故障后的零序电压; R_0 为系统等效全损电阻; C_0 为系统三相对地电容。当开关 S 闭合时, 投切装置连接到系统中投入运行装置电路在正弦励磁 $u_0(t)$ 作用下发生零状态响应

$$u_0(t) = U \sin(\omega t + \psi) \quad (5)$$

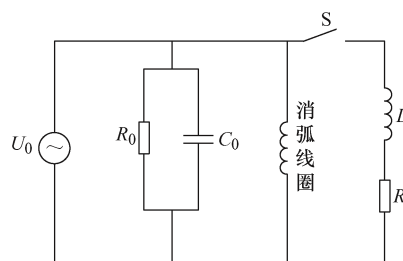


图 3 投切装置与消弧线圈并联零序等效回路

Fig. 3 Zero-sequence equivalent circuit of switching device and arc suppression coil in parallel

其中导通角 ψ 的大小取决于开关 S 的闭合时刻, 当开关 S 闭合后, 装置串联支路阻抗为

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \angle \arctan\left(\frac{\omega L}{R}\right) = |Z| \angle \varphi \quad (6)$$

流过装置串联支路的电流为

$$i = \frac{U}{|Z|} \sin(\omega t + \psi - \varphi) - \frac{U}{|Z|} \sin(\psi - \varphi) e^{-\frac{t}{\tau}} = i' + A e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (7)$$

式中, i' 为稳态分量; $A e^{-\frac{t}{\tau}}$ 为暂态分量, τ 为时间常数, $\tau = L/R$ 。暂态分量的初值 A 与开关 S 的闭合时刻相关。

当开关 S 闭合, 导通角 ψ 与投切装置阻抗角 φ 相同, 即 $\psi = \varphi$ 时, 则

$$A = -\frac{U}{|Z|} \sin(\psi - \varphi) = 0 \quad (8)$$

此时流过投切装置的电流没有过渡过程, 直接进入稳态, 即

$$i = i' = \frac{U}{|Z|} \sin \omega t \quad (9)$$

当开关 S 闭合, 导通角 ψ 与投切装置阻抗角相差 90° 时, 即 $\psi - \varphi = \pm 90^\circ$, 则

$$A = \mp \frac{U}{|Z|} \quad (10)$$

此时流过投切装置的电流暂态过渡过程最大, 即

$$i = \frac{U}{|Z|} \sin(\omega t \pm 90^\circ) \mp \frac{U}{|Z|} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (11)$$

考虑到投切装置中串联阻值大小也将影响装置产生的电流波形, 故假设 $R \rightarrow 0$ 时, $\tau \rightarrow \infty$, 阻抗角 $\varphi \rightarrow 90^\circ$, 则

$$A = \frac{U}{|Z|} \cos \psi \quad (12)$$

当 $\psi = \pm \pi$ 时, A 最大, 流经投切装置的电流是以 $i = \pm A$ 为纵轴对称的正弦信号; 当 $\psi = \pm k\pi + \pi/2$ 时, A 最小, 电流是 $i = 0$ 为纵轴对称的正弦信号。随着导通角 ψ 的不同, 流经投切装置的电流波形上移或下移。若取开关导通后电流信号第一次过零点的信号为首半波信号, 则首半波的峰值大小为

$$I = \frac{U}{|Z|} (1 + \cos \psi) \quad (13)$$

所以, 随着导通角 ψ 的不同, 改变了流经投切装置的正弦电流信号的纵对称轴, 即与之叠加的直流信号。当导通角 ψ 为 0° 时, 其对称轴为正弦信号的峰值, ψ 为 90° 时为零, ψ 为 180° 时为负的峰值。

对同一参数的投切支路, 导通角的选择不同, 改变的仅是暂态直流信号, 稳态正弦信号无改变, 所以投切装置产生的首半波信号如图 4 所示, 首半波信号的开始和结束时间不同, 但波峰都发生在同一时刻。

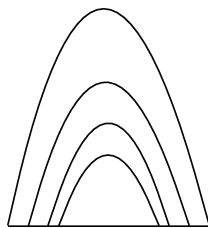


图 4 不同 ψ 值时投切装置产生的首半波

Fig. 4 The first half wave generated by the switching device at different ψ values

2.2 接地电阻对投切装置的影响

实际上接地电阻对于接地点一般都是存在的, 但大小是不确定的。当小电流系统发生非金属性单相接地短路故障时, 系统中性点电压为

$$U_0 = -\frac{j\omega C_0(E_a + E_b + E_c) + E_a/R_f}{j3\omega C_0 + 1/R_f} = -\frac{1}{1 + j3\omega C_0 R_f} E_a \quad (14)$$

由于投切装置是连接在中性点和地之间, 则首半波的大小为

$$i = \frac{U}{|Z|} \cos \psi - \frac{U}{|Z|} \cos(\omega t + \psi) \quad (15)$$

随着接地电阻的增大, 投切装置两端的电压减小, 在同一导通角 ψ 下产生的首半波的峰值也减小。当接地电阻大到一定值时, 首半波信号很小, 检测系统无法检测时, 装置便失效。

为了实现装置对任意接地电阻都能有效的工作, 需要对投切装置选择合适的电感。若在某一电压等级的小电流系统发生单相接地短路故障时的接地电阻可能的最大值为 $R_{f\max}$, 线路电流互感器可分辨的信号幅值为 A , 则中性点的电压为

$$U_0 = -\frac{j\omega C_0(E_a + E_b + E_c) + E_a/R_{f\max}}{j3\omega C_0 + 1/R_{f\max}} \quad (16)$$

此时接地电阻为最大值, 信号强度最小, 选择最大的首半波信号, 令 $\psi = 0^\circ$ 时, 则 $A = 2U/\omega L$, 电感值为 $L = 2U/\omega A$ 。

不管接地电阻的大小如何引起中性点电压信号相角的改变, 装置均不受影响。但随着投切装置接入系统, 投切装置产生的首半波信号因流过接地电阻, 而使接地电阻的压降变大, 系统中性点的电压减小, 进而影响整个系统的零序电流变化。

2.3 投切装置切入时刻与运行时间的确定

在应用中, 首先检测中性点的电压峰值, 根据需要可算出对任意接地电阻的单相接地短路故障的导通角为

$$\psi = \arccos\left(A \frac{\omega L}{U} - 1\right) \quad (17)$$

导通时间为

$$t = \frac{\psi}{\omega} + kT \quad (18)$$

式中, T 为电源信号的周期; k 表示装置在故障发生后的 k 个周期后工作。

装置退出网络时间需满足条件

$$i = \frac{U}{|Z|} \cos \psi - \frac{U}{|Z|} \cos(\omega t + \psi) = 0 \quad (19)$$

故投切装置切入系统的时间为

$$t = \frac{180^\circ - 2\psi}{\omega} \quad (20)$$

装置的退出时间为

$$t = \frac{\psi}{\omega} + \frac{180^\circ - 2\psi}{\omega} \quad (21)$$

2.4 切装置作用于系统的仿真实验

为验证投切装置在小电流系统发生单相接地短路故障后能起到区分故障支路与非故障的作用效果, 以下利用 MATLAB/Simulink 对作用于小电流系统中的投切装置进行建模仿真, 系统模型如图 5 所示。

图 5 中, L_2 为投切装置, 其串联电阻值为 1Ω , 电感值为 10 H , 并联于消弧线圈。系统电压等级 10 kV , 消弧线圈 L_1 为过补偿, 其等效电阻值为 30Ω , 电感值为 1.5 H 。故障点发生单相接地故障时间为 $1/60 \text{ s}$, 接地电阻大小为 10Ω 。

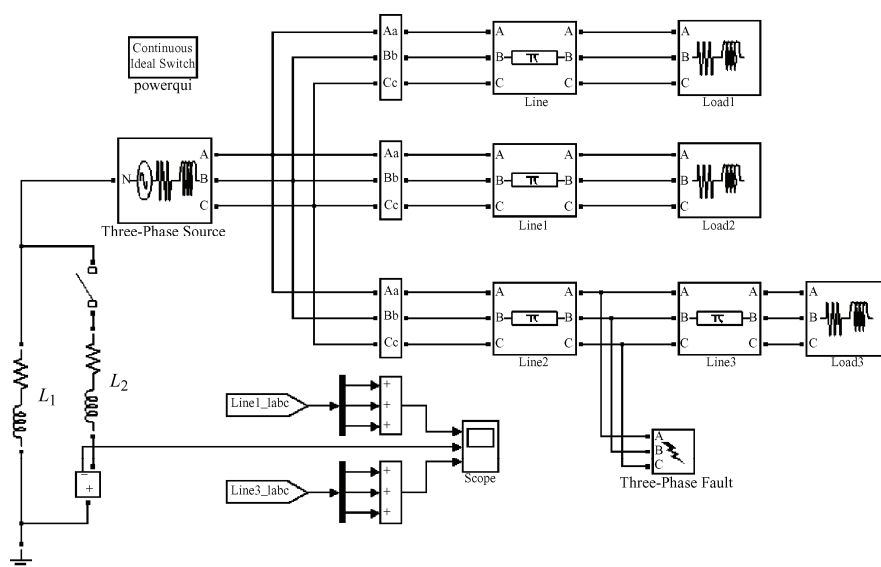


图 5 投切装置在系统中作用的仿真模型

Fig. 5 Simulation model of switching device's role in the system

仿真系统运行时间为 0.4 s , 开关闭合时刻为 0.195 s , 作用时间为 0.005 s 。当系统 Line3 支路发生单相接地短路故障时, 非故障支路与故障支路零序电流波形以及投切装置作用时间内, 串联支路产生的电流首半波形图如图 6 所示。

图 6 中, 横坐标为时间, 单位 s ; 纵坐标为零序电流, 单位 A 。自上至下的波形图依次为非故障支路零序电流波形、投切装置所产生的首半波形图和故障支路零序电流波形图。已知系统 Line3 支路发生单相接地端故障, 且投切装置投入运行时间为 0.195 s 。当系统运行时间 0.2 s 附近时, 在投切装置作用下, 只有 Line3 支路零序电流值发生明显变化, 原因是投切装置所产生的电流波形与原系统零序电流重叠

加, 因此可证明投切装置在小电流系统发生单相接地短路故障时, 对于区分故障支路与非故障支路的作用有效。

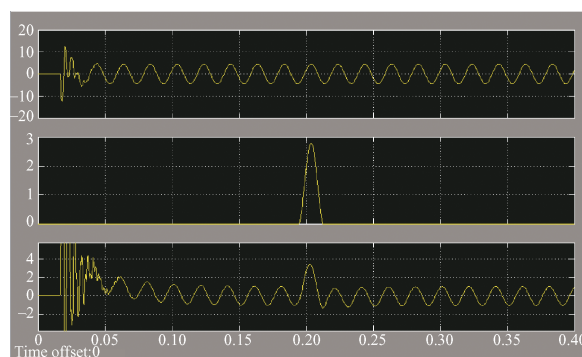


图 6 系统故障后三条支路的零序电流波形图

Fig. 6 Zero-sequence current waveform of three branches after system failure

3 配电自动化系统在单相故障定位中的应用

3.1 仿真验证

为验证投切装置与 FTU 配合进行故障选线定位的方法,利用 MATLAB 仿真软件搭建了中性点谐振接地系统模型,如图 7 所示。

3.2 仿真模型系统参数

一般配电网络的电压等级在 35 kV 以下,本

文采用电压等级为 10 kV。在通常的电力网络中,为避免主变压器低压配电侧的 3 次谐波回流至高压侧的输电系统,影响供电质量,所以主变压器均采用 Y/Δ 接线,即配电网侧变压器采用三角接线,无中性点,因此需要一个接地变压器引出中性点。

图 7 中,三相电压等级 10 kV,频率 50 Hz,电源内等效电阻 $0.8929\ \Omega$,等效电感 16.58 mH 。

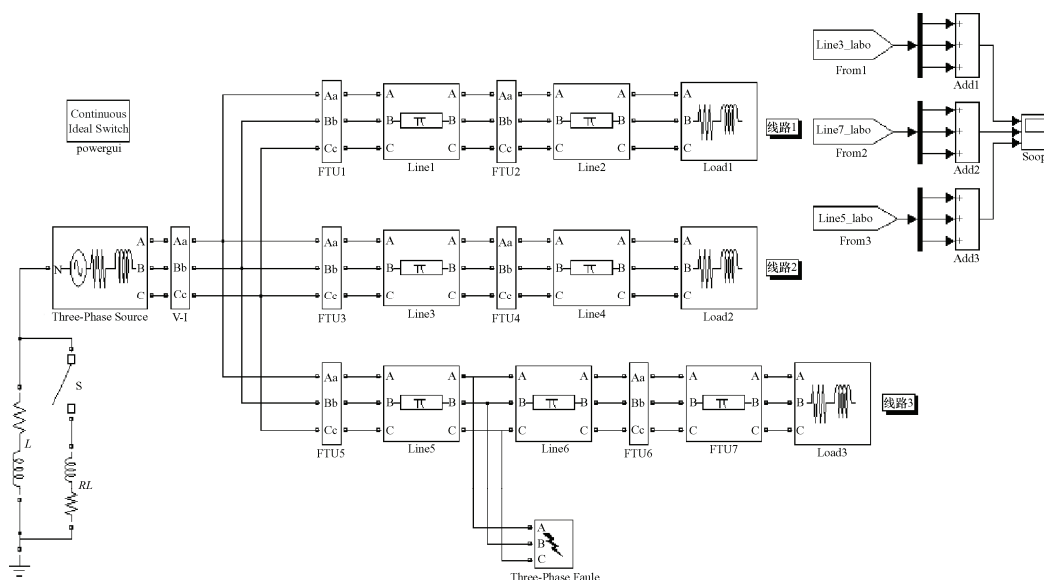


图 7 小电流接地系统模型

Fig. 7 Model of low current grounding system

模型中共 7 条 10 kV 输电线路,均采用 π 形等效电路,其等效电量和零序电量分别为 $R_1=0.01273\ \Omega/\text{km}$ 、 $R_0=0.3864\ \Omega/\text{km}$; $L_1=0.9337\text{ mH}/\text{km}$ 、 $L_0=4.1264\text{ mH}/\text{km}$; $C_1=12.74\ \mu\text{F}/\text{km}$ 、 $C_0=7.751\ \mu\text{F}/\text{km}$ 。消弧线圈的电阻 $R=30\ \Omega$ 、电感 $L=1.5\text{ H}$ 。投切装置等效电阻 $R=1\ \Omega$ 、电感 $L=10\text{ H}$ 。线路负荷均采用三相串联 RLC 负载。有功负荷均为 10 MW。

3.3 仿真结果分析

仿真系统运行时间 0.4 s,故障时刻(1/60)s,投切装置投入运行时刻 0.195 s,运行时间 0.005 s。系统模型中,将三相电压电流测量模块作为 FTU,当系统 Line3 的 C 相发生金属性接地短路故障时,系统非故障线路与故障线路零序电流值如图 8 所示。

第一个波形图为非故障线路上的 FTU3 所检测到的零序电流波形,中间的波形图为故障线路上故障点之后的 FTU6 所检测到的零序电流波形,最下面的为故障线路上故障点之前 FTU5 所检测到的零序电流波形。

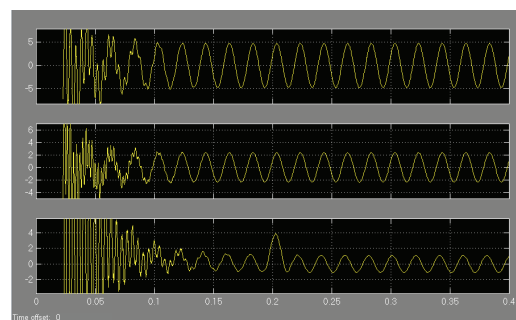


图 8 系统发生金属性单相接地短路故障零序电流波形图
Fig. 8 Zero-sequence current waveform of the system with metallic single-phase grounding short circuit fault

在投切装置投入运行 0.195~0.2 s 时间内,故障点前的零序电流幅值有明显变化,而非故障线路与故障线路故障点之后的零序电流幅值几乎不变。为证明此方法不受接地电阻大小的影响,分别将接地电阻值设为 10 Ω 和 1 k Ω 对系统模型进行仿真,仿真波形图如图 9、图 10 所示。

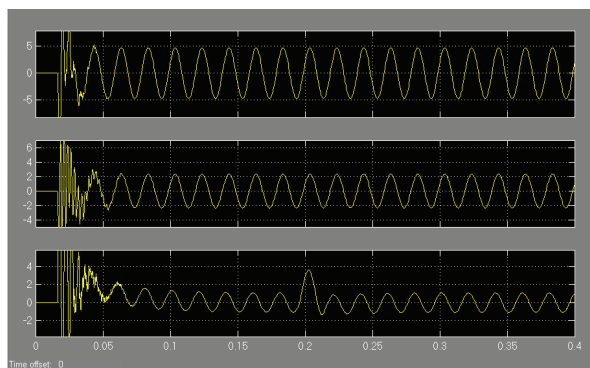


图 9 接地电阻为 10 Ω 时的系统零序电流波形图

Fig. 9 Zero-sequence current waveform of the system with a grounding resistance of 10 Ω

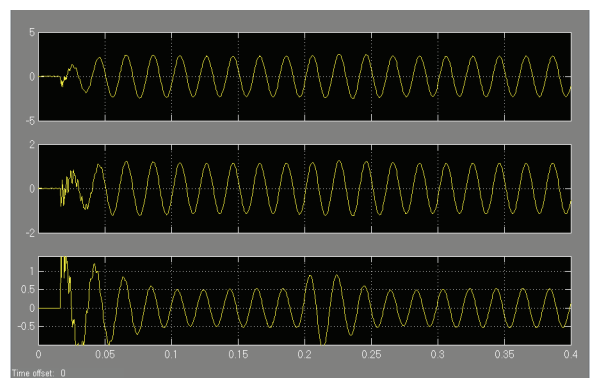


图 10 接地电阻为 1 k Ω 时的系统零序电流波形图

Fig. 10 Zero-sequence current waveform of the system with a grounding resistance of 1 k Ω

图 9、图 10 中,即使在接地电阻较大时,仍可以保证在故障线路上故障点之前的零序电流幅值较其他线路有明显变化,故此方法在不同的阻值接地情况下仍然有效。

4 结束语

通过对基于投切装置的小电流接地故障定位方法进行研究,可得出以下结论:

1) 投切装置的加入可以很好地解决系统中

消弧线圈的保护作用与故障选线定位技术间的矛盾。

2) 此方法仅是短时性改变了系统消弧线圈的补偿程度,对系统造成冲击较小,且不受故障点接地电阻大小影响,适用于多种复杂的情况。

3) 利用投切装置与 FTU 馈线自动化技术配合,可很好地实现小电流系统单相接地短路故障的选线与定位。EA

参考文献

- [1] 徐丙垠,薛永端,冯远光,等.配电网接地故障保护若干问题的探讨[J].电力系统自动化,2019,43(20):1-7.
- [2] 王鹏,冯光,韦延方,等.10 kV 配电网的接地故障测试述评及真型实验场设计[J].电力系统保护与控制,2020,48(11):178-187.
- [3] 赵海龙,陈钦柱,梁亚峰,等.一种小电流接地系统故障行波精确定位方法[J].电力系统保护与控制,2019,47(19):85-93.
- [4] 薛永端,李娟,徐丙垠.中性点经消弧线圈接地系统小电流接地故障暂态等值电路及暂态分析[J].中国电机工程学报,2015,35(22):5703-5714.
- [5] 王洪,邢静原,张广辉,等.小接地电流系统单相接地消弧、过压、感电、保护技术研究与应用[J].华北电力技术,2013(10):1-6.
- [6] 李润先.中压电网系统接地实用技术[M].北京:中国电力出版社,2002.
- [7] 林璿.配电网单相接地故障定位技术的研究[D].武汉:华中科技大学,2013.

作者简介:



尹 扬

尹扬(1994—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统安全控制与保护。

(收稿日期:2021-02-08)