

短路电磁暂态过程对距离保护影响的仿真分析

张丽丽, 王新超

(山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 以消除短路电压、电流中的非工频分量对距离保护的影响为目的, 利用 Matlab/Simulink 搭建了输电线路接地距离保护的仿真模型, 针对短路后电磁暂态过程对距离保护的影响进行了仿真。仿真结果表明, 短路的电磁暂态过程影响距离保护元件的动作行为, 导致错误的比相结果, 造成距离保护元件的不正确工作。另外, 故障类型、故障角、故障位置的不同对距离保护元件的影响程度也不同。滤除短路电压、电流中的非工频分量可有效地减小电磁暂态过程对基于工频量的距离保护的影响, 采用 FIR 数字滤波器进行滤波, 基本达到了满意的效果。

关键词: 电磁暂态过程; 距离保护; Matlab/Simulink; 短路故障; 数字滤波

Simulation analysis of the impact on distance protection caused by short-circuit electromagnetic transient process

ZHANG Li-li, WANG Xin-chao

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: In order to eliminate the impact on distance protection caused by the non-frequency component of short-circuit voltage and current, the ground distance protection simulation model of transmission line is built using Matlab/Simulink, and the simulation of the impact on distance protection caused by electromagnetic transient of short-circuit is conducted. Results show that electromagnetic transient of short-circuit affects the operation behavior of distance protection components, which may lead to erroneous results and may cause distance protection components work incorrectly. In addition, the influence on distance protection components caused by different fault types, fault angles and fault locations are also different. Filtering the non-frequency component of short-circuit voltage and current can effectively reduce the impact on the distance protection caused by electromagnetic transient process. In this paper, FIR digital filter is used and the result is satisfactory.

Key words: electromagnetic transient process; distance protection; Matlab/Simulink; short-circuit fault; digital filter

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)02-0035-05

0 引言

距离保护的原理是以工频正弦量为基础设计的, 即假定保护测量得到电流和电压都是工频正弦量。而实际故障时还会含有大量的非工频暂态分量, 包括直流分量、谐波分量、非周期高频分量^[1], 很多情况下会因这些非周期暂态分量而导致误判。本文设计了一种 FIR 数字滤波器可以大大降低误判的几率。

1 仿真系统模型的建立

1.1 输电线路故障模型的建立

双侧电源的系统中发生短路故障时的模型^[2-3]如图 1 所示。

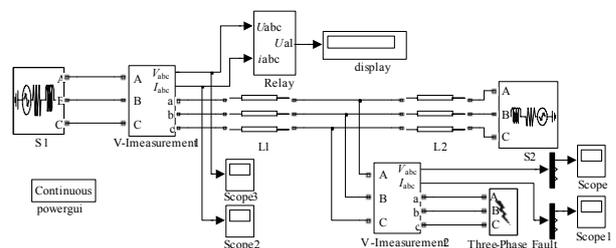


图 1 双侧电源系统的输电线路故障模型

Fig.1 Transmission line fault model of bilateral power supply system

此双侧电源系统的输电线路故障模型包括两个电压源, 两条输电线路, 两个三相电压电流测量元件, 四个示波器, 一个故障发生器, 一个继电器 (Relay) 的封装, 一个显示器。其中, 输电线路模

块采用分布参数模型；三相电压—电流测量模块充当了从 Power Systems 系统到 Simulink 系统的接口，将测量到的电压、电流信号转变成 Simulink 信号，相当于电压、电流互感器的作用；示波器模块用来显示电压电流信号的波形；故障发生器模块用来模拟各种故障，设置故障发生时间和过渡电阻等；继电器模块为已封装的子系统，内含正序极化电压构成的阻抗继电器模块，对应于继电器的动作方程；相位显示器模块用于实时观察比相相位。

1.2 比相式阻抗继电器模型的建立

根据式 (1) 建立阻抗继电器的模型^[4]如图 2 所示。

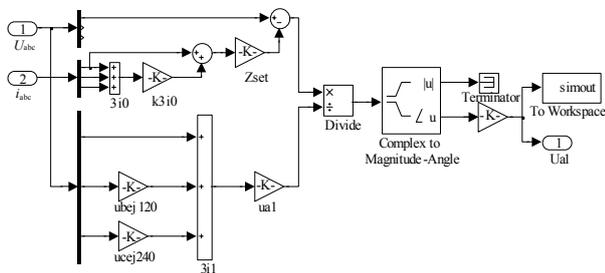


图 2 比相式阻抗继电器模型

Fig.2 The phase ratio impedance relay model

比相式继电器由四个模块组成，分别为工作电压模块、参考电压模块、相位比较模块以及与工作空间的接口模块。

工作电压模块：首先将三相电压、电流分离为 A、B、C 三相，取出零序电流，再乘上零序补偿系数，然后与 A 相电流相加得到测量电流，用 A 相电压减去测量电流与整定阻抗的乘积即得工作电压。

其中，零序补偿系数^[5-6] $k = \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1}$ ，整定阻抗

$Z_{set} \approx L_{set} z_1$ ，代入数据可以得到 $k = 0.526e^{-j8^\circ}$ ，假定保护范围为线路总长度的 80%，则 $Z_{set} \approx 68e^{j85.8^\circ}$ 。

参考电压模块：根据参考电压的公式，利用比例、加法等模块得到参考电压。

相位比较模块：比相模块是用一个除法模块、一个求取复数信号幅值和相角的模块和一个角度参数转换模块（比例）组成。

与工作空间的接口模块：为了使比相的相位送到工作空间保存以备分析，需用 To workspace 模块将角度数据送至工作空间指定的位置。

1.3 距离元件的动作特性

1) 正向故障时的动作特性

正序电压极化的测量元件在正向故障时的动作特性如图 3 所示，在正向故障的情况下，以正序电

压为参考电压的测量元件的动作特性为一个包括坐标原点的偏移圆。正向短路时，测量阻抗落在动作区内，能够可靠动作。

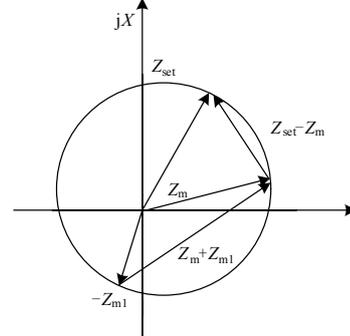


图 3 正序电压极化的测量元件在正向故障时的动作特性
Fig.3 Characteristics of forward fault for positive-sequence voltage polarization of the measuring element

2) 反向故障时的动作特性

正序电压极化的测量元件在反向故障时的动作特性如图 4 所示，在反向出口短路时，测量阻抗在原点附近，远离动作区，使得测量元件可靠不动作。

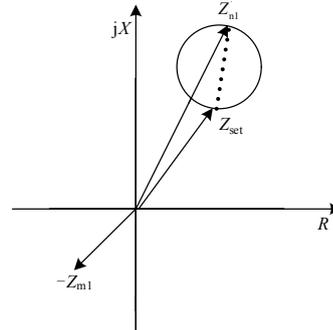


图 4 正序电压极化的测量元件在反向故障时的动作特性
Fig.4 Characteristics of reverse fault for positive-sequence voltage polarization of the measuring element

2 短路电磁暂态过程对距离保护的影响的仿真

2.1 正方向 100 km 处单相短路接地故障（接地相电压最大值时）

仿真参数的设置：仿真开始时间为 0 s，结束时间为 0.1 s，故障开始时间为 0.025 s，结束时间为 0.1 s，仿真算法选取可变速步长类算法中的 ode15 s 算法。

首先，为了验证比相式阻抗继电器的合理性和有效性，在系统无故障和 A 相金属性短路接地情况下分别观察导入工作空间的相角，无故障时相角都在 0° 左右，波动范围为 $-67^\circ \sim 67^\circ$ ；而 A 相金属性短路接地情况下相角范围为 $-179^\circ \sim 179^\circ$ ，根据所

搭建的继电器的动作特性, 非动作区为 $-90^{\circ} \sim 90^{\circ}$, 动作区为 $90^{\circ} \sim 270^{\circ}$, 可见所搭建模型符合理论实际。

为了单独研究短路后电磁暂态过程对距离保护动作行为的影响, 这里暂不考虑过渡电阻及串联补偿电容等因素对距离保护的影响, 因此设置故障为金属性接地短路, 接地电阻为 0.001Ω , 不串联补偿电容。

非工频暂态分量的大小与短路发生的瞬间密切相关, 为了得到比较大的非工频暂态分量, 设置 A 相电压达最大值时在距线路首端 100 km 处发生 A 相短路接地故障。运行, 得到保护安装处三相电压如图 5 (a) 所示。

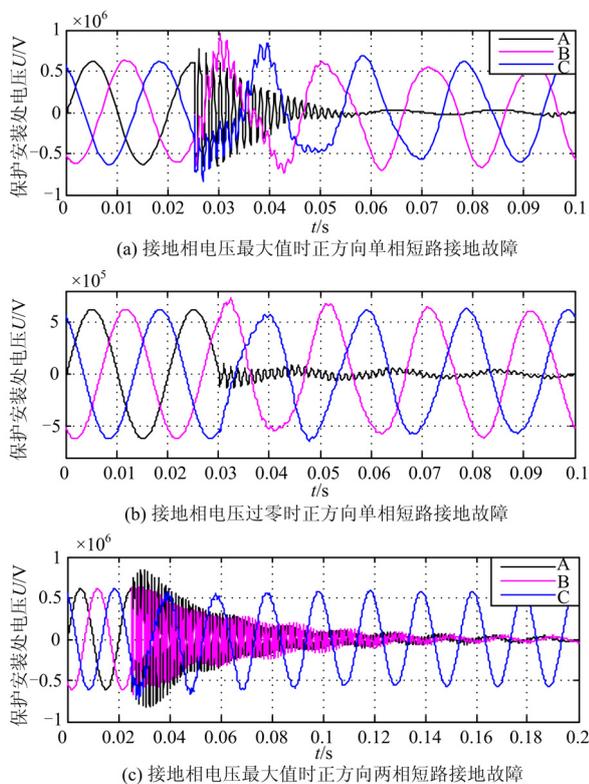


图 5 保护安装处三相电压波形

Fig.5 The three-phase voltage wave

从电压波形可以看出故障恰好发生在 A 相电压达到最大值的瞬间, 短路后电磁暂态过程从 0.025 s 持续到 0.045 s 甚至更长时间。为了分析这个过渡过程对继电器比相结果的影响, 调出继电器导入的工作空间的比相数据并转换成 $-90^{\circ} \sim 270^{\circ}$ 之间的数值。数据分为三部分: 故障前的比相数据、故障后电磁暂态过程的比相数据、故障后电磁暂态过程结束后的比相数据。

分析比相数据可知, 故障前的相角差全在非动

作区内; 短路后一个周期的过渡过程中, 40 个比相数据中有 26 个不在动作区, 而处于动作区的数据也处于非灵敏区, 拒动的几率为 65%。

为了更直接的观察结果, 把工作电压与参考电压比值的部分数据导入工作空间, 利用 Matlab 的图形绘制功能绘制成图 6 (a), 图中绕圆一圈的数据表示相位大小, 从 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$, 而沿半径方向的数据表示幅值。这里暂不考虑数据的幅值, 仅观察相位情况, 我们可以看出过渡过程中大部分比相相位在非动作区, 显然与上述分析结果相符。

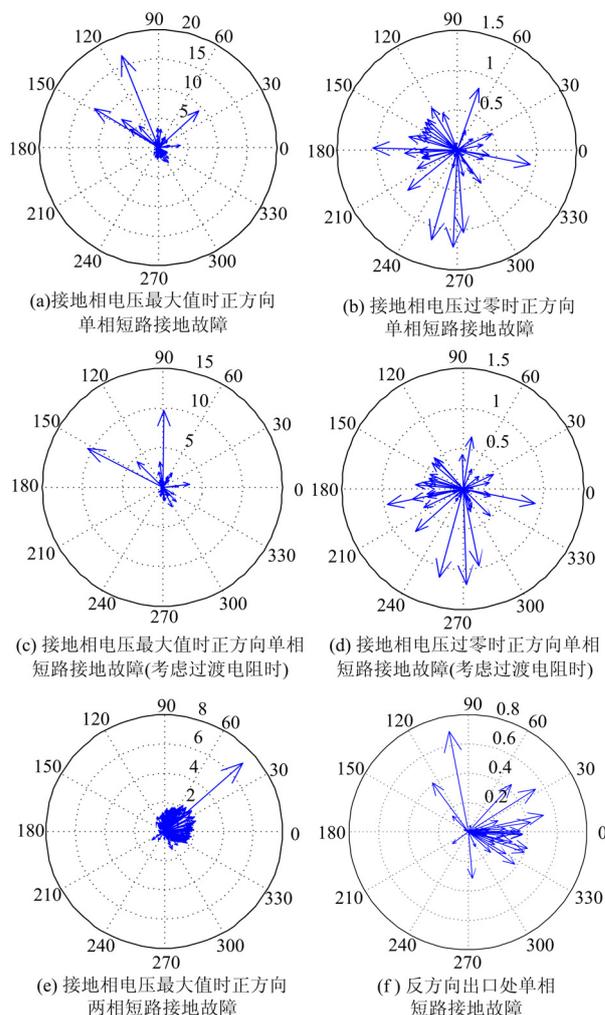


图 6 故障后过渡过程中比相的射线图

Fig.6 The diagram of phase comparison in transition process after fault

2.2 正方向 100 km 处单相短路接地故障 (接地相电压过零时)

仿真参数的设置: 仿真开始时间为 0 s, 结束时间为 0.1 s, 故障开始时间为 0.03 s, 结束时间为 0.1 s。这里仍不考虑过渡电阻及串联补偿电容等因素对

距离保护的影响。设置 A 相电压过零时在距线路首端 100 km 处发生 A 相短路接地故障。运行此仿真系统，得到保护安装处三相电压如图 5 (b) 所示。

从电压波形可以看出故障恰好发生在 A 相电压过零的瞬间，短路后电磁暂态过程从 0.03 s 持续到 0.05 s 甚至更长时间。分析过渡过程的比相数据可知，40 个比相数据中有 15 不在动作区，拒动的几率为 37.5%。

图 6 (b) 为 A 相电压过零时发生单相短路接地后测得的比相数据射线图。从射线图中我们可以看出过渡过程中处于非动作区的数据较图 6 (a) 少，说明在故障角不同的情况下，短路后电磁暂态过程中电压含有的非工频暂态分量不同，在电压过零点短路比在电压达最大值时短路产生的非工频暂态分量少，导致继电器拒动的几率小。

2.3 正方向 100 km 处单相短路接地故障 (考虑过渡电阻)

1) 设置 A 相电压达最大值时在距线路首端 100 km 处发生 A 相短路接地故障，并设过渡短路为 5 Ω。运行得，40 个比相数据中有 21 不在动作区，拒动的几率为 52.5%。此时的比相数据射线图如图 6(c)。与 2.1 节中没有过渡电阻时 A 相短路接地相比，拒动的几率变小，这说明过渡电阻的存在造成测量阻抗变大，减弱了非工频暂态分量导致的距离保护元件的拒动。

2) 设置 A 相电压过零时在距线路首端 100 km 处发生 A 相短路接地故障，并设过渡短路为 5Ω。运行得，40 个比相数据中有 17 不在动作区，拒动的几率为 42.5%。此时的比相数据射线图如图 6(d)。与 2.2 节中没有过渡电阻时 A 相短路接地相比，拒动的几率变大，这说明过渡电阻的存在造成测量阻抗变小，加剧了距离保护的拒动。

以上两个仿真案例说明，双侧电源系统中，过渡电阻的存在可能引起保护误动，也可能引起保护拒动。

2.4 正方向 100 km 处两相短路接地故障

两相短路接地故障是较单相接地故障更为严重的故障类型，它的暂态过程更长，为了全面的观察它的暂态过程，需设置更长的仿真时间。

仿真参数的设置：仿真开始时间为 0 s，结束时间为 0.2 s，故障开始时间为 0.025 s，结束时间为 0.2 s，设置 A 相电压达最大值时在距线路首端 100 km 处发生 A、B 两相短路接地故障，运行得到保护安装处三相电压如图 5 (c) 所示。

从电压波形可以看出短路后电磁暂态过程持续时间比单相短路接地更长。分析比相数据可知，短

路后的过渡过程中，40 个比相数据中有 37 个不在动作区，拒动的几率为 92.5%。

图 6 (e) 为 A、B 两相短路接地故障的比相数据射线图。比较图 6 (e) 与图 6 (a) 我们可以看出两相短路接地比单相短路接地更容易造成继电器拒动。

2.5 反方向出口处单相短路接地故障

反方向出口处单相短路接地故障时，保护安装处实际电流的方向与规定正方向相反。图 6 (f) 为反向出口处 A 相短路接地故障的比相数据射线图，这里我们只观察幅值情况，显然测量阻抗聚集在零点附近，幅值都在 0.6 以内，不能进入图 4 所示的动作区。

3 数字滤波的仿真^[7]

为了对短路电压、电流进行数字滤波，首先要对模拟信号进行采样，把模拟信号转换为数字信号。采样保持电路的作用是在一个极短的时间内测量模拟输入量在该时刻的瞬时值，并在模拟数字转换器进行转换的器件保持器输出不变。采样频率的选择是微机保护设计中的一个关键问题，采样频率必须满足采样定理才能保证不出现频率混叠现象。FIR 滤波器的设计方法是灵活多样的，主要的设计方法有窗函数设计法、频率取样设计法等，这里采样窗函数设计法，综合分析各个窗函数的特点，由于凯泽窗具有最灵活的参数控制手段，可通过调节窗函数的参数在各指标之间进行折衷，因此利用凯泽窗设计 FIR 滤波器。加入滤波器后的比相继电器模型如图 7 所示。

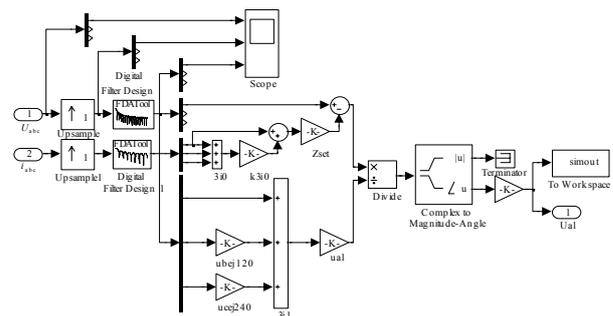


图 7 加入滤波器后比相式阻抗继电器模型

Fig.7 The phase ratio impedance relay model after adding filters

3.1 正方向 100 km 处单相短路接地故障的滤波

滤波后过渡过程的比相结果如图 8 (a) 所示，与图 6 (a) 比较可以看出，大部分数据都落在动作区，拒动的几率明显减小，但仍然有拒动的可能。对从 0.025~0.045 s 的 A 相电压信号进行 FFT 分析可以看出，滤波前谐波畸变率达 1598%，滤波后谐

波畸变率为 139%。

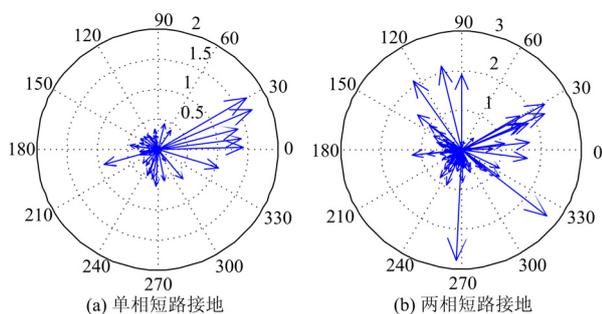


图 8 滤波后过渡过程的射线图

Fig.8 The data of electromagnetic transient process after filtering

3.2 正方向 100 km 处两相短路接地故障的滤波

滤波后过渡过程的比相结果如图 8 (b) 所示, 与图 6 (e) 比较可以看出, 大部分数据都落在动作区, 拒动的几率明显减小, 但仍然有拒动的可能。对从 0.025 s~0.045 s 的 A 相电压信号进行 FFT 分析可以看出, 滤波前谐波畸变率达 2 473%, 滤波后谐波畸变率为 152%。这是因为滤波器的性能问题所致, 要想更好的消除非工频分量对距离保护的影响就要设计更适用于电力信号的数字滤波器进行滤波。

4 结论

本文利用 Matlab/Simulink 搭建了输电线路接地距离保护的仿真模型, 利用基于比较工作相位法实现故障判断、以正序电压为参考电压的继电器测得比相结果。仿真结果表明, 短路的电磁暂态过程的非工频分量影响距离保护元件的动作行为, 导致错误的比相结果, 造成距离保护元件拒动。采用 FIR 数字滤波器对输入信号进行滤波, 滤除短路电压、电流中的非工频分量后, 使距离保护元件拒动的几率明显减小, 但仍有拒动的可能。设计更适用于电力信号的的数字滤波器进行滤波是下一步要做的工作。

参考文献

- [1] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
ZHANG Bao-hui, YIN Xiang-gen. Power system protective relaying[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.
- [2] 王晶, 翁国庆, 张有兵. 电力系统的 Matlab/Simulink

仿真与应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008.

- WANG Jing, WENG Guo-qing, ZHANG You-bing. Power system MATLAB / SIMULINK simulation and application[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2008.
- [3] 许明, 高厚磊, 侯梅毅, 等. 数字仿真技术在继电保护教学中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 104-109.
- XU Ming, GAO Hou-lei, HOU Mei-yi, et al. Application of digital simulation technology in relay protection teaching[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 104-109.
- [4] 杨兰, 杨廷芳, 陈众, 等. Matlab/Simulink在继电保护设计中的应用[J]. 电气传动自动化, 2006, 28(1): 53-55.
- YANG Lan, YANG Ting-fang, CHEN Zhong, et al. The application of Matlab/Simulink in the projects of relay protection[J]. Electric Drive Automation, 2006, 28(1): 53-55.
- [5] 孟恒信, 阴崇智. 接地阻抗继电器零序电流补偿系数的特点及模拟试验方法研究[J]. 继电器, 2005, 36(8): 83-86.
- MENG Heng-xin, YIN Chong-zhi. Research of earth-fault impedance relay's zero-sequence compensation factor and commissioning tests method[J]. Relay, 2005, 36(8): 83-86.
- [6] 陈祥文, 柳焕章. 超高压线路简化整定计算的原则和方法[J]. 继电器, 2007, 35(2): 12-16.
- CHEN Xiang-wen, LIU Huan-zhang. Rules and methods for simplifying setting calculation of protections of extra-high voltage transmission line[J]. Relay, 2007, 35(2): 12-16.
- [7] Schilling R J, Harris S L. 数字信号处理基础-MATLAB 实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2005.
- Schilling R J, Harris S L. Fundamentals of digital signal processing using Matlab[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2005.

收稿日期: 2010-01-14; 修回日期: 2010-05-05

作者简介:

张丽丽 (1985-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护;

王新超 (1962-), 男, 副教授、硕士生导师, 研究领域为电力系统微机保护, 电力系统继电保护及其全运行装置, 人工智能. E-mail:wangxinchao@sdu.edu.cn