

Fault Simulation Study for High Voltage Line Based on ATP-EMTP and MATLAB

Yuanshuo Feng, Jijiang Song

Shandong University of Technology, Zibo
Email: fengyuanshuo36@163.com

Received: Oct. 14th, 2013; revised: Oct. 16th, 2013; accepted: Nov. 18th, 2013

Copyright © 2013 Yuanshuo Feng, Jijiang Song. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2013 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Yuanshuo Feng, Jijiang Song. All Copyright © 2013 are guarded by law and by Hans as a guardian.

Abstract: Along with the increase of energy demand and the progress of power generation technology, topological system of power network is more and more complex; the operation difficulty also increases. The fault is difficult to forecast with the traditional analysis methods, then power system analysis and simulation technology become the indispensable tools and instruments in the power system planning, design, operation, analysis and the process of reforming. In this paper, many kinds of short circuit fault in power system are analyzed. The fault simulation model based on the ATPDraw simulation software is created. Then, this paper analyzes the waveform of different fault simulations, studies the characteristics and the mechanism of the transmission lines of various kinds of failures, and puts forward corresponding prevention measures to enhance the ability of withstanding natural disasters in power grid. The prevention measures are very important to improve the level of safe operation.

Keywords: High-Voltage Line; Fault Simulation; ATP-EMTP; MATLAB

基于 ATP-EMTP 和 MATLAB 的高压线路故障联合仿真研究

冯媛硕, 宋吉江

山东理工大学, 淄博
Email: fengyuanshuo36@163.com

收稿日期: 2013 年 10 月 14 日; 修回日期: 2013 年 10 月 16 日; 录用日期: 2013 年 11 月 18 日

摘要: 随着社会对能源需求的增长和发电技术的进步, 电力网络拓扑系统越来越复杂, 运行难度也随之增加, 而且发生的故障也难以用传统的分析方法进行预测, 从而使得电力系统分析和仿真技术成为电力系统规划、设计、运行、分析及改造等过程中不可缺少的工具和手段。本文对电力系统中发生的几种短路故障进行了分析, 并在此基础上创建了基于 ATP-EMTP 仿真软件的故障仿真模型, 然后分析不同故障下的仿真波形, 从而为进一步分析提供依据。通过研究输电线路各类运行故障的特点和机理, 提出针对性的防治措施, 对于增强电网抵御自然灾害的能力和提提高安全运行水平十分重要。

关键词: 高压线路; 故障仿真; ATP-EMTP; MATLAB

1. 引言

电力系统规模不断扩大, 高压远距离输电线路也

逐渐增多。高压输电线路分布范围广, 穿越地区地形复杂, 气候变化多样, 容易发生故障。国内外都发生

过由于输电线路故障而引起的电力系统大面积停电事故。如果能快速、准确地对其进行故障仿真,并进行相关故障分析,就可从技术上保证电网的安全运行,具有巨大的社会和经济效益。电力系统中使用较多的仿真软件有 MATLAB、ATP-EMTP、PSASP 等,本文利用 ATP 进行高压线路的仿真与分析^[1]。电磁暂态仿真软件(EMTP)是电力系统中常用的仿真商业软件,ATP 是其免费版本,在电力系统继电保护中得到广泛应用^[2]。

本文对电力系统中发生的各种短路故障进行了分析,并在此基础上创建了基于 ATP 的故障仿真模型,然后分析不同故障下的仿真波形。可以通过设置不同的参数,分别对单相接地短路、两相短路进行了仿真,并绘制出各种故障发生时的电压、电流的波形^[3]。最后将 ATP 仿真出的波形导入到 MATLAB 软件中,编程计算各故障分量的波形以及故障分量电流差的波形值,这些分析结果是系统的故障检测的坚实基础。

2. 线路故障理论分析

2.1. 系统总体分析

在电力系统的故障中,仅在一处发生不对称短路或断线的故障称为简单不对称故障。这种故障发生在系统中某一点的一些相之间或相与地之间,其特点是由电力系统网络中的某一点(节点)和公共参考点(地接点)之间构成故障端口^[3]。

本文将对于典型的 500 kV 双端电源系统进行建模仿真(如图 1 所示),并在 MATLAB 中编程计算出故障分量波形,更加有利于线路故障的检测。图中电源为 500 kV 三相交流电源,频率为 50 Hz,两个电源的初始相位依次为 0°、30°,线路长度为 100 km,系统阻抗元件的电感值取 39.8 mH,电阻和电容值均为 0。

M 点为故障点,单位长度正序、零序电阻为 $R_1 = 0.0174 \Omega/\text{km}$, $R_0 = 0.1847 \Omega/\text{km}$; 单位长度正序、零序电导为 $L_1 = 0.967 \text{ mH}/\text{km}$, $L_0 = 3.601 \text{ mH}/\text{km}$;

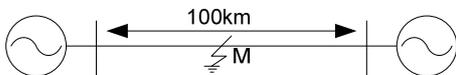


Figure 1. High voltage transmission system with two terminals
图1. 高压双端输电系统简图

单位长度正序、零序电容为 $C_1 = 12.03 \text{ nF}/\text{km}$, $C_0 = 7.52 \text{ nF}/\text{km}$ 。

2.2. A 相接地故障分析

当系统中的 f 点发生单相(A 相)直接短路接地故障时,其短路点的不对称电流和电压可以用图 2 表示。很明显,短路点的故障分量的边界条件为 A 相在短路点 f 的对地电压为零, B 相和 C 相从短路点流出的电流为零,即

$$\Delta \dot{U}_{fa} = 0, \Delta \dot{I}_{fb} = \Delta \dot{I}_{fc} = 0 \quad (1-1)$$

应用对称分量法将式(1-1)转换成各个序分量电流故障分量的关系。对于 $\Delta \dot{U}_{fa} = 0$, 有:

$$\Delta \dot{U}_{fa} = \Delta \dot{U}_{f1} + \Delta \dot{U}_{f2} + \Delta \dot{U}_{f0} = 0$$

对于 $\Delta \dot{I}_{fb} = \Delta \dot{I}_{fc} = 0$ 可以得出:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{I}_{fa1} \\ \Delta \dot{I}_{fa2} \\ \Delta \dot{I}_{fa0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \dot{I}_{fa1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \Delta \dot{I}_{fa1} \\ \Delta \dot{I}_{fa1} \\ \Delta \dot{I}_{fa1} \end{bmatrix}$$

于是,单相短路接地时,用序分量电流故障分量表示的边界条件是:

$$\begin{cases} \Delta \dot{U}_{fa1} + \Delta \dot{U}_{fa2} + \Delta \dot{U}_{fa0} = 0 \\ \Delta \dot{I}_{fa1} = \Delta \dot{I}_{fa2} = \Delta \dot{I}_{fa0} \end{cases} \quad (1-2)$$

下面用复合序网的方法求解短路点电流。复合序网是指在短路端口按照用序分量表示的边界条件,将正序、负序和零序三个序网相互连接而形成的等值网络^[4]。从 A 相短路接地的序分量边界条件式(1-2)可见,它相当于将三序网的端口进行串联。

由复合序网可以表达不对称短路故障的地点和类型。得出短路点各序电流故障分量为:

$$\Delta \dot{I}_{fa1} = \Delta \dot{I}_{fa2} = \Delta \dot{I}_{fa0} = \frac{\dot{U}_{f(0)}}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (1-3)$$

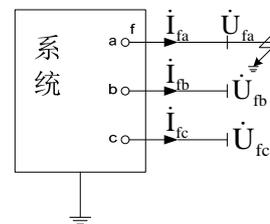


Figure 2. Directly grounded fault for phase A
图 2. A 相短路直接接地故障

然后得出保护安装处的三相电流故障分量为:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{I}_{MA} &= \Delta \dot{I}_{MA1} + \Delta \dot{I}_{MA2} + \Delta \dot{I}_{MA0} \\ &= C_1 \Delta \dot{I}_{fa1} + C_2 \Delta \dot{I}_{fa2} + C_0 \Delta \dot{I}_{fa0} \\ &= (C_1 + C_2 + C_0) \Delta \dot{I}_{fa1} \\ &= \frac{(C_1 + C_2 + C_0) \dot{U}_{f(0)}}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \\ \Delta \dot{I}_{MB} &= \alpha^2 \Delta \dot{I}_{MA1} + \alpha \Delta \dot{I}_{MA2} + \Delta \dot{I}_{MA0} \\ &= \alpha^2 C_1 \Delta \dot{I}_{fa1} + \alpha C_2 \Delta \dot{I}_{fa2} + C_0 \Delta \dot{I}_{fa0} \\ &= (\alpha^2 C_1 + \alpha C_2 + C_0) \Delta \dot{I}_{fa1} \\ \Delta \dot{I}_{MC} &= \alpha \Delta \dot{I}_{MA1} + \alpha^2 \Delta \dot{I}_{MA2} + \Delta \dot{I}_{MA0} \\ &= \alpha^2 C_1 \Delta \dot{I}_{fa1} + \alpha C_2 \Delta \dot{I}_{fa2} + C_0 \Delta \dot{I}_{fa0} \\ &= (\alpha^2 C_1 + \alpha C_2 + C_0) \Delta \dot{I}_{fa1} \end{aligned} \right\}$$

相间差值电流为:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{I}_{MAB} &= [(1-\alpha^2)C_1 + (1-\alpha)C_2] \Delta \dot{I}_{fa1} \\ \Delta \dot{I}_{MBC} &= 0 \\ \Delta \dot{I}_{MCA} &= [(\alpha^2-1)C_1 + (\alpha-1)C_2] \Delta \dot{I}_{fa1} \end{aligned}$$

式中: C_1 、 C_2 、 C_0 分别为正序、负序和零序电流分配系数。

2.3. 两相短路故障分析

当系统中 f 点发生两相(B、C 两相)直接短路时, 短路点处的电流和电压可以用图 3 表示:

可列出短路点电流故障分量的边界条件为:

$$\Delta \dot{I}_{fa} = 0, \Delta \dot{I}_{fb} = -\Delta \dot{I}_{fc}, \Delta \dot{U}_{fb} = \Delta \dot{U}_{fc} \quad (1-4)$$

应用序分量与相分量之间的关系式, 可得出边界条件中序电流故障分量的关系为:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{I}_{fa1} \\ \Delta \dot{I}_{fa2} \\ \Delta \dot{I}_{fa0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta \dot{I}_{fb} \\ -\Delta \dot{I}_{fb} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \Delta \dot{I}_{fb} \\ -\Delta \dot{I}_{fb} \\ 0 \end{bmatrix}$$

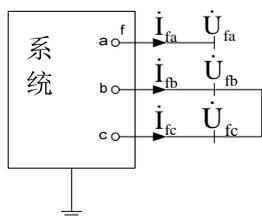


Figure 3. Short circuit fault for phase B and C
图 3. B、C 两相短路故障

并由上式可得出用电流序分量表示的边界条件为:

$$\Delta \dot{I}_{fa0} = 0, \Delta \dot{I}_{fa1} + \Delta \dot{I}_{fa2} = 0 \quad (1-5)$$

对于边界条件中的电压故障分量的关系, 有:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_{fa1} \\ \Delta \dot{U}_{fa2} \\ \Delta \dot{U}_{fa0} \end{bmatrix} &= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{fa} \\ \dot{U}_{fb} \\ \dot{U}_{fb} \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \dot{U}_{fa} + \alpha \dot{U}_{fb} + \alpha^2 \dot{U}_{fb} \\ \dot{U}_{fa} + \alpha^2 \dot{U}_{fb} + \alpha \dot{U}_{fb} \\ \dot{U}_{fa} + \dot{U}_{fb} + \dot{U}_{fb} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

从而得出用序电压故障分量表示的边界条件为:

$$\Delta \dot{U}_{fa1} = \Delta \dot{U}_{fa2} \quad (1-6)$$

由上条件可知复合序网是正序和负序网络在其端口的并联, 而零序网络是开路, 即在短路电流中不含零序分量。由复合序网可以直接解出短路点处的各序电流故障分量为:

$$\Delta \dot{I}_{fa1} = -\Delta \dot{I}_{fa2} = \frac{\dot{U}_{f(0)}}{Z_1 + Z_2}; \Delta \dot{I}_{fa0} = 0 \quad (1-7)$$

然后可得出保护安装处各相电流故障分量为:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{I}_{MA} &= \Delta \dot{I}_{MA1} + \Delta \dot{I}_{MA2} + \Delta \dot{I}_{MA0} \\ &= C_1 \Delta \dot{I}_{fa1} + C_2 \Delta \dot{I}_{fa2} + C_0 \Delta \dot{I}_{fa0} = 0 \\ \Delta \dot{I}_{MB} &= \alpha^2 \Delta \dot{I}_{MA1} + \alpha \Delta \dot{I}_{MA2} + \Delta \dot{I}_{MA0} \\ &= \alpha^2 C_1 \Delta \dot{I}_{fa1} + \alpha C_2 \Delta \dot{I}_{fa2} + C_0 \Delta \dot{I}_{fa0} \\ &= C_1 \Delta \dot{I}_{fb} \\ \Delta \dot{I}_{MC} &= \alpha \Delta \dot{I}_{MA1} + \alpha^2 \Delta \dot{I}_{MA2} + \Delta \dot{I}_{MA0} \\ &= \alpha^2 C_1 \Delta \dot{I}_{fa1} + \alpha C_2 \Delta \dot{I}_{fa2} + C_0 \Delta \dot{I}_{fa0} \\ &= -C_1 \Delta \dot{I}_{fb} \end{aligned} \right\}$$

相间差值电流为:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{I}_{MAB} &= -C_1 \Delta \dot{I}_{fb} \\ \Delta \dot{I}_{MBC} &= 2C_1 \Delta \dot{I}_{fb} \\ \Delta \dot{I}_{MCA} &= -C_1 \Delta \dot{I}_{fb} \end{aligned}$$

2.4. 故障分量特征分析

故障分量只在故障情况下出现。故障分量独立于非故障状态, 即故障分量电流独立于负荷电流但仍与系统运行方式有关。故障点处故障分量电压最大, 系

统中性点处为零。故障分量更适合用来检测故障，因而可用来构成不同的继电保护原理^[5,6]。由叠加原理知，故障分量电压和电流等于故障后实测的电压和电流减去故障前对应的电压和电流^[7]。

利用对称分量法在不同故障类型下对各相电流差幅值进行计算，可得出故障分量幅值变化特征：单相接地时，两非故障相电流差等于零，故障相与非故障相电流差不为零。而两相短路时，两故障相电流差最大。

2.5. 联合运用 ATP 与 MATLAB 仿真分析

电力系统发生故障后，会有复杂的电磁暂态过程，为了能够验证各种保护原理和保护算法，必须搭建能够模拟真实系统的仿真模型，并通过对仿真模型系统结构和参数的修改来达到模拟实际系统故障的真实情况。而 ATP-EMTP 在电力系统故障暂态仿真上应用广泛，但是搭建的系统模型会生成大量的故障数据，并且实现较为复杂的数学运算方面仍显不足。而 MATLAB 在数值运算、图形处理上却有着先天的优势。MATLAB 语言以矩阵为基本的数据单位，它提供了强大的矩阵运算功能，矩阵和向量等常用的较为复杂的数学和逻辑运算，只要简单的几句甚至是一句命令就可简单完成。因此将 ATP-EMTP 的建模仿真和 MATLAB 的编程运算能力充分地结合起来，能够实现高效、灵活地电力系统故障的仿真与运算^[8,9]。

本文仿真步骤为：首先根据实际系统，使用 ATP 建立仿真模型，本文只对于单相接地与两相短路故障

进行了仿真。对于仿真后的数据处理，即故障分量的求取使用 MATLAB 编程来计算，然后输出相应波形。

3. 建模与仿真计算

3.1. A 相直接接地故障

由 ATPDraw 建立的系统故障仿真模型电路如图 4 所示：

开关设置参数：K: T-cl = 0.08 s、T-op = 0.3 s。设置故障距离为 50 km。然后运行这个模型文件，最后查看 PlotXY 窗口输出的波形。仿真波形如图 5、6 和 7 所示。

当发生 A 相直接接地故障时，由上图 5 和 7 可以看出，故障点 M 的 A 相电压为零，非故障相 B、C 故障电压稍有增大。由于 A 相存在故障电流，导致 A 相电流幅值增大，这与理论分析是相符合的。

下面计算电流故障分量。首先将 ATP 模型文件及

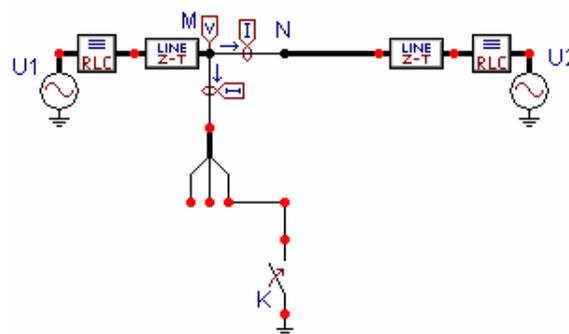


Figure 4. Model of directly grounded fault line for phase A
图 4. A 相直接接地故障线路模型

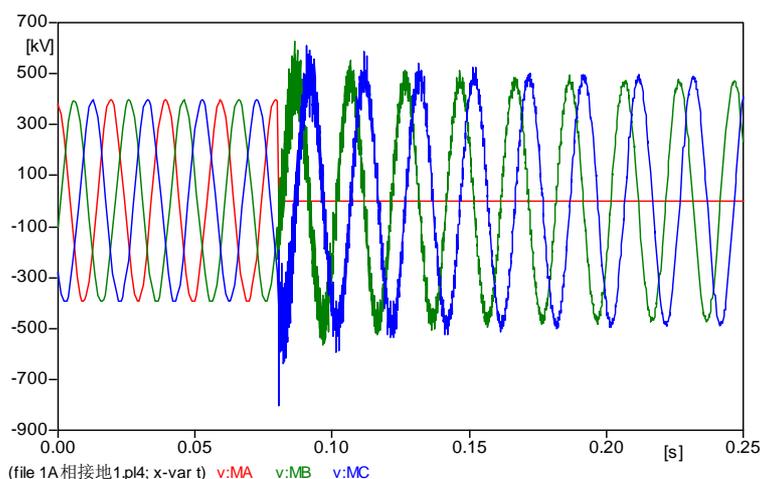


Figure 5. Phase voltage waveforms of fault point in phase A directly grounded
图 5. A 相直接接地故障点 M 的相电压波形

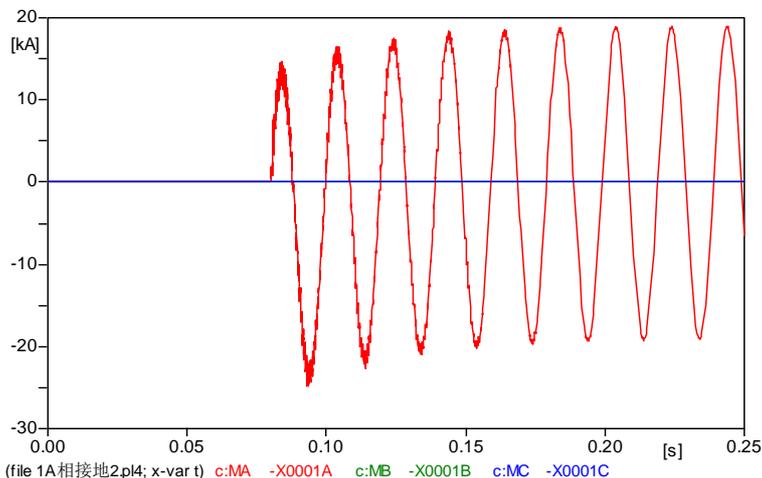


Figure 6. Phase voltage waveforms of short-circuit point in phase A directly grounded
图 6. A 相直接接地故障短路点相电流波形

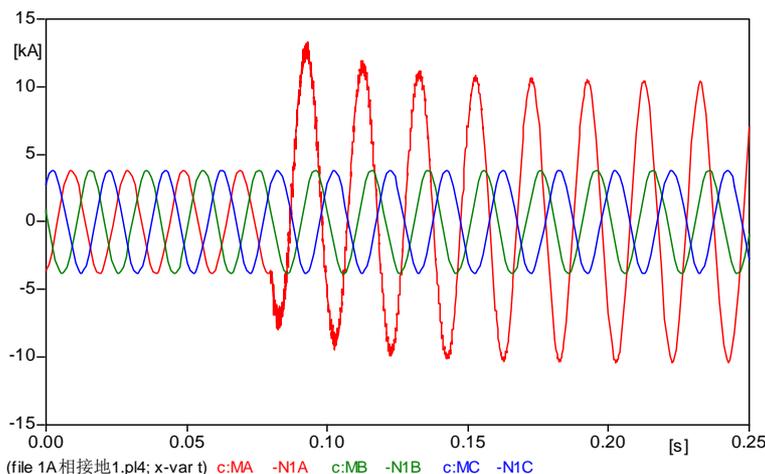


Figure 7. Phase current waveforms of fault point in phase A directly grounded
图 7. A 相直接接地故障点 M 的相电流波形

数据导入到 MATLAB 中，方法是：单击 ATP-EMTP 菜单栏中的[ATP]-[Pl42mat]，将仿真生成的 PL4 格式文件转换成 MAT 格式。然后运行 MATLAB 软件，打开刚才的 MAT 文件，然后输入相应程序计算出故障分量波形如下所示。

从图 8 看出 A 相故障分量比其他两相大。然后在 MATLAB 中编写程序计算故障分量的幅值，计算出每两相电流波形的差值如图 9 所示。

由上图可以看出，当发生 A 相直接接地故障时，BC 相差值为 0，符合前面理论分析的结论。

3.2. 两相直接短路故障

ATPDraw 建立的两相短路故障仿真模型电路如

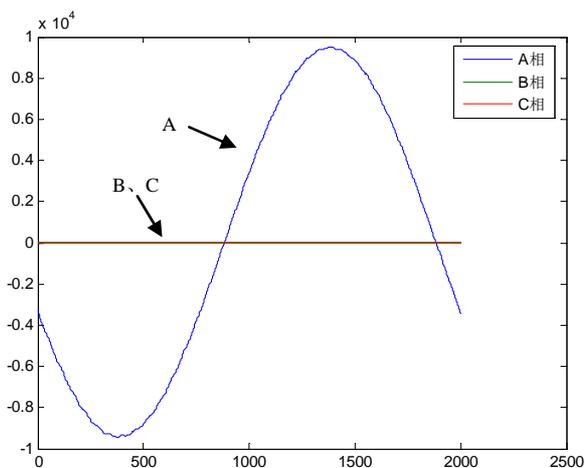


Figure 8. The waveforms of current fault component in phase A directly grounded
图 8. A 相直接接地电流故障分量波形图

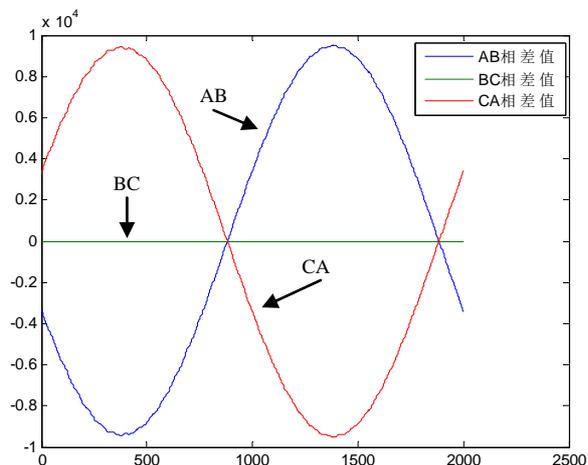


Figure 9. The difference between current fault component in phase A directly grounded
图 9. A 相接地时故障分量电流差

图 10 所示。

分析 B、C 两相相间短路故障。设置开关参数为：
K: $T\text{-cl} = 0.08\text{ s}$, $T\text{-op} = 0.3\text{ s}$ 。故障距离：50 km。对模型进行仿真计算，输出波形如图 11、12 和 13 所示。

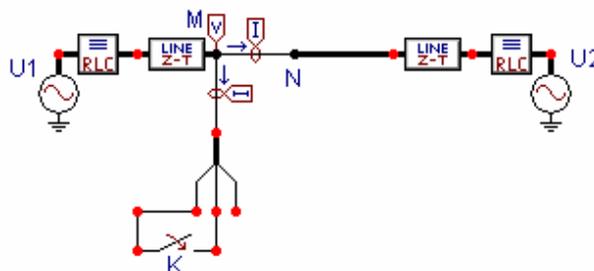


Figure 10. The line model of two phase short circuit fault directly
图 10. 两相短路故障线路模型

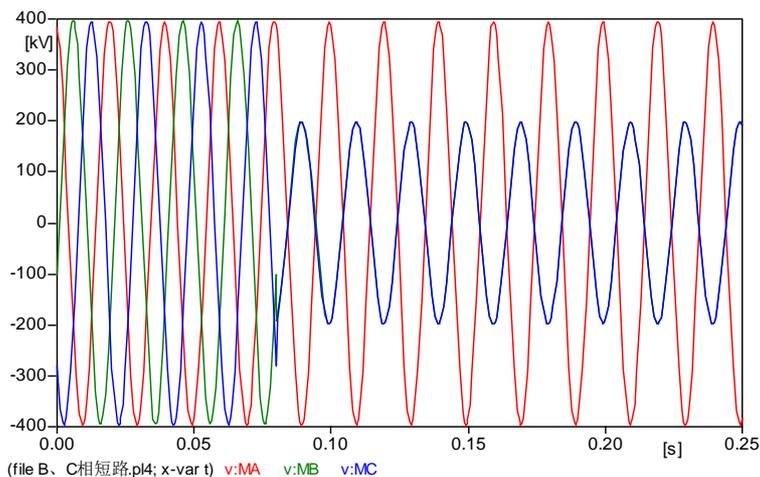


Figure 11. Phase voltage waveforms of fault point in two phase short circuit fault directly
图 11. B、C 两相直接短路故障点 M 的相电压波形

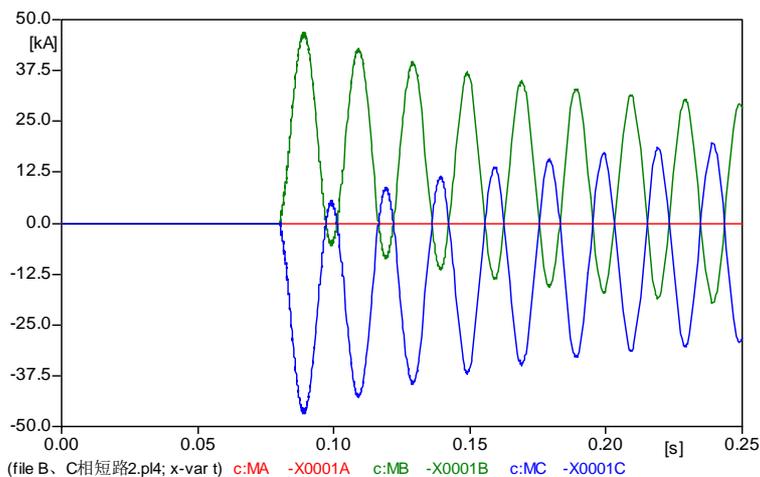


Figure 12. Phase voltage waveforms of short-circuit point in two phase short circuit fault directly
图 12. 两相直接短路故障短路点相电流波形

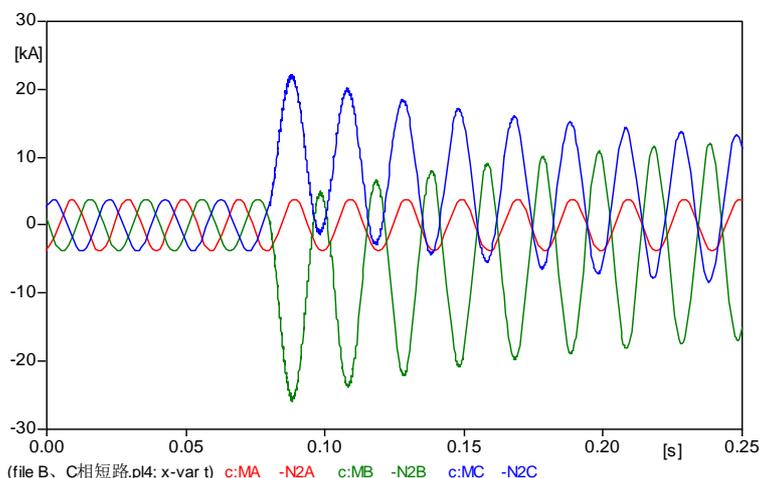


Figure 13. Phase current waveforms of fault point in two phase short circuit fault directly
图 13. 两相直接短路故障点 M 的相电流波形

当发生 B、C 两相直接短路时，由上图 11 和 13 可知，故障点 M 的故障相 B、C 相电压相等，且 B、C 相电流大小相等，相位相反，非故障相电流不变，这与理论分析相符。

使用同样方法计算故障分量，在 MATLAB 中编写相应程序计算则可得出两相短路时电流故障分量波形如图 14 所示。

然后在 Matlab 中编程计算每两相电流波形的差值，得出波形图如图 15 所示。

由图 15 可以看出，当发生 B、C 两相短路故障时，在三个波形中，BC 相差值的幅值最大，其次是 AB 相和 CA 相差值，这与理论分析是相符的。

4. 结论

本文将 ATP 和 MATLAB 结合起来，利用 ATP 的图形输入功能实现故障仿真，同时，利用 MATLAB 强大的计算功能和编程技术，使之构成一个完整系统。该系统开放性好，集成度高，并具有可视化功能，有利于暂态故障分析。非常方便地建立电力系统各种模型，并且可以将这些模型保存起来，建立复杂的系统仿真模型，以提高仿真计算的灵活性和效率，为电力系统仿真和故障分析提供了一种新的手段^[9]。一般来讲，三相短路对系统的影响最大，两相短路的电流是三相短路电流的 $\sqrt{3}/2$ 倍，与之相比其它故障时电流的大小还取决于各序阻抗的关系。所有这些结论都将为继电保护参数的设置提供了依据，根据不同故障波形的特点也可以确定故障的类型。

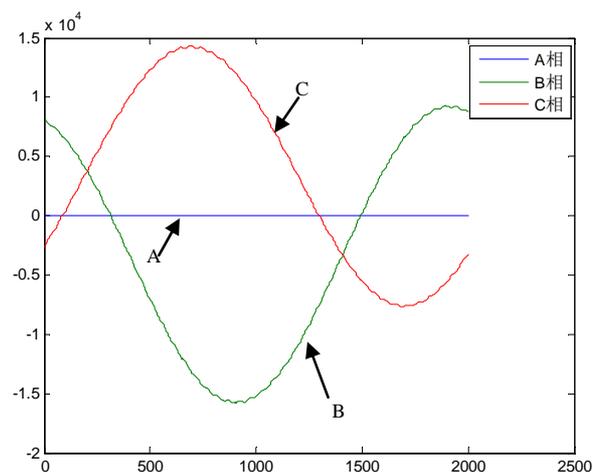


Figure 14. The waveforms of current fault component in two phase short circuit fault directly
图 14. B、C 相短路电流故障分量波形图

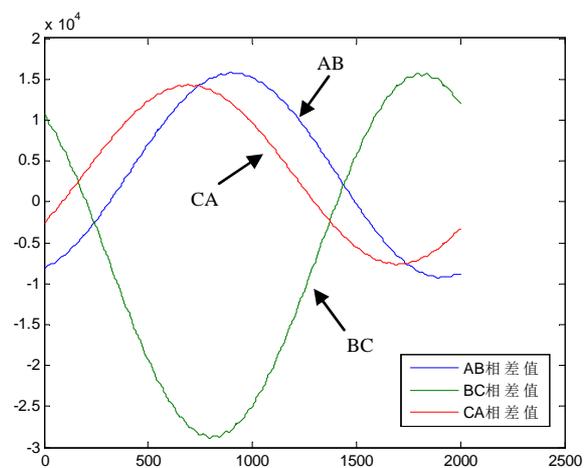


Figure 15. The difference between current fault component in two phase short circuit fault directly
图 15. B、C 相短路时故障分量电流差

在仿真过程中存在的问题有：个别故障的仿真不够准确；本次仿真只是对静态系统的仿真，实时性差。

故障分量在继电保护中也获得广泛应用。通过理论分析和仿真验证，结果和仿真假设条件一致。故障分量只在故障情况下出现，故障分量独立于非故障状态，故障点处故障分量电压最大，系统中性点处故障分量电压为零，不受系统电势和短路点过渡电阻的影响，故障分量的保护在中低压中性点不接地系统中获得了广泛的应用。但是故障分量的准确提取仍存在问题，还需要更深入的研究。

参考文献 (References)

- [1] 靳希, 安平, 张承学 (2004) 电力系统电磁暂态仿真软件. 上海电力学院学报, 3, 42-46
- [2] 韩丽娜, 杨志坚, 李虎 (2005) ATP-EMTP 在 500 kV 配电系统的应用. 电测与仪表, 12, 14-16
- [3] 陈平 (2005) 微机保护实验手册.
- [4] 夏道止 (2004) 电力系统分析. 中国电力出版社, 北京.
- [5] 孙亮 (2006) MATLAB 语言与控制系统仿真. 国防工业出版社, 北京.
- [6] 汤涌 (2002) 电力系统数字仿真技术的现状与发展. 电力系统自动化, 17, 66-70.
- [7] Box, G.E.P. and Jenkins, R. (1994) Time series analysis, for casting and control. Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- [8] 艾琳, 陈为化 (2004) 高压直流输电线路保护的探讨. 继电器, 4, 61-63.
- [9] 尚德基 (2010) 混合运用 MATLAB 和 ATP 的电力系统故障仿真. 大众科技, 5, 103-104.