

行波保护数字仿真中几个问题的讨论

张晓东,张举,丁峰

(华北电力大学电力系,河北 保定 071003)

摘要: 从行波保护的概念出发,讨论了在行波保护数字仿真中的几个常规问题,包括线路模型的选择,数字仿真工具的选择,信号处理工具的选择,以及在行波保护研究中所要考虑的几个影响因素。对于线路模型选择了FD(Frequency-Dependent)线路模型,数字仿真工具选择了ATP与MATLAB,信号处理工具选择了小波分析方法,而行波保护仿真所要考虑的几个影响因素主要讨论了行波信号的不确定因素的影响、阻波器的影响、接地电阻的影响以及线路换位情况的影响。文中对讨论的几个问题所给出的建议性的意见,对行波保护的数字仿真研究具有一定意义。

关键词: 行波保护; ATP; MATLAB; 依频特性; 小波分析

中图分类号: TM773 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-4897(2003)02-0069-05

1 引言

传统的线路保护主要是利用工频电压、电流的稳态参数及其组合而构成的功率方向、阻抗保护等。在220kV及以上的输电线路中,借助高频通道来实现全线速动的保护。随着电力系统的迅速发展,大容量机组及超高压输电线路的出现与增多,对继电保护的動作速度提出了更高的要求,而减小继电保护的動作时间是增大输电线路传输容量和提高系统稳定性的重要措施。行波保护是利用故障时产生的暂态故障分量——行波信号来实现的保护,具有超高速動作的特点。行波保护的研究越来越受到人们的关注。

行波保护的概念早已提出,并在上个世纪70年代末80年代初进入了研究的高潮阶段,这一阶段的理论研究为以后的行波保护研究奠定了理论基础。80年代中期,行波保护的研究又进入了一个新的阶段,先后提出了行波距离保护、利用噪声的行波保护等。同时新的硬件及装置的诞生,新的信号处理方法的提出,以及新的处理信号的软件的支持,使行波保护的研究逐渐向前推进。其中,在行波保护的研究中,数字仿真起着举足轻重的地位^[1,2]。

2 行波保护的基本概念

假设一单相线路发生金属性短路,如图1(a)所示,故障点为F点。当故障发生后,F点的电位为零,根据叠加原理,故障后的状态等效于在故障点叠加了两个大小相等,方向相反的电压源,该电压源的大小为故障前F点的电压(设故障前F点的电压为

U_F),如图1(b)所示。将图1(b)分解便可将其视为图1(c)与(d)的叠加,其中图1(c)为正常运行状态网络,图1(d)为故障附加状态网络。

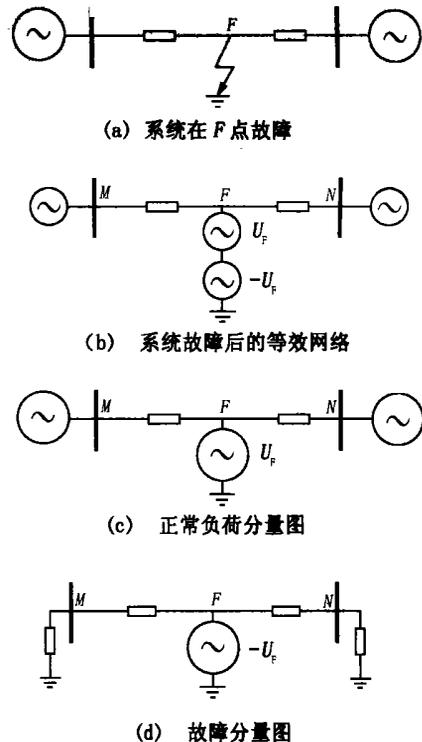


图1 线路 F 点故障时的等效网络

Fig. 1 Equivalent network of the system while lines to ground at location F

由于正常状态网络中没有包含所需要的行波信息,因而在实际的行波保护研究中,包括利用仿真的研究中,对故障后网络的分析便转化为对故障附加网络的分析。当故障发生时,故障附加网络被施加

了一个值为 $-U_F$ 的电压源,在该电压源的作用下,故障点将产生向两侧运行的行波(包括电压行波与电流行波),行波保护研究中所利用的正是由故障点向两侧传播的行波信号,通过对该信号的提取与分析,建立判据来实现输电线路的保护^[1,3]。

3 行波保护线路模型的选择

行波的产生依赖于线路具有分布电感与电容这一条件,如果是集中参数,则不会存在波过程。在具有分布参数的输电线路中,沿线各点故障分量的电压电流满足如下的波动方程:

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = L \frac{\partial i}{\partial t} + Ri \quad (1)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = C \frac{\partial u}{\partial t} + Gu \quad (2)$$

式中: x 为观察点的位置坐标; t 为观察时刻; L 、 C 、 G 、 R 为线路单位长度的参数; u 、 i 为故障分量的电压电流。

同时,行波在传播过程中,将在阻抗的不连续点产生反射与透射现象。

文献[4]应用多 (T) 节链形网络研究行波现象,取得了较好的效果,但是需要通过两种方案互相补充使用。一个是增加 (T) 节数,以使行波波头明显而使行波现象接近实际。另一个则是通过设计性能良好的低通滤波器,把影响行波波头的最高频率滤掉,来加强行波现象。但两个方案一个是增加了振荡频率,一个是减少了振荡频率,相互矛盾,应用时需要根据实际情况将二者综合考虑,这给应用带来繁琐与不便。

在输电线与电缆的电磁暂态仿真中,许多线路模型都可以在文献[5~9]中找到,在输电线路上的最多的就是由 J. Marti 提出的 FD (Frequency-Dependent) 线路模型,该模型包含有线路的依频特性(线路参数随着频率的变化而变化)、分布参数特性,以及利用了一个实常数变换矩阵来解耦线路的传播模型。对于绝大多数的架空线路,FD 线路模型都很可靠准确。但是对于地下电缆,这个模型则不适用。对于电缆则可用文献[10]的 Z-Cable 模型,较准确地描述了电缆的特性。

由于集肤效应的关系,实际的线路产生了损耗与参数随频率变化的现象,即线路参数的依频特性。理论分析与实测结果表明,线路电阻与频率成正比关系增大,而电感与频率的平方根成反比,电容基本上不随频率变化^[11]。因而,在对行波信号的研究中

采用 FD 线路模型,可以得到较准确的仿真结果。

4 行波保护仿真工具的选择

近年来,适合于电力系统暂态分析的软件不断增多,被普遍使用的有 EMTP 及与之同类的 windows 版本软件 ATP,以及 PSCAD-EMTDC 和 MATLAB 等。

EMTP 程序的基本功能是进行电力系统仿真计算,典型应用是预测电力系统在某个扰动(如开关投切或故障)之后变量随时间变化的规律;将 EMTP 的稳态分析和电磁暂态分析相结合,可以作为电力系统谐波分析的有力工具。另外,EMTP 程序也广泛应用于电力电子领域的仿真计算^[12]。

ATP 是与 EMTP 相类似的 windows 版本的分析软件,与 EMTP 相比有了更友好的人机界面,不需要硬件上的看门电路的支持,应用更简单方便。它具有丰富的数学模型,同时支持使用者创建自己的电路和控制元件模型,使其具有很好的可扩展性。与 ATP 相配合的图形输入程序 ATPDraw 使 ATP 如虎添翼,同时也让使用者摆脱了 DOS 版 EMTP 繁琐而复杂的数据卡填充,只需画出电路,设定参数便可,更直观,更简单。

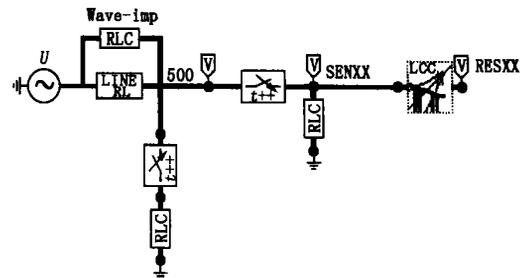


图2 ATPDraw 绘制仿真系统图例

Fig. 2 System drawing example drawn by ATPDraw

如图2所示,根据所要仿真的系统绘制系统模型图,通过双击元件设定元件相应参数,然后再通过一定操作将文件变为 ATP 所要用的文件格式,运行 ATP 就可以进行仿真,得出仿真数据^[13]。

EMTDC 与 PSCAD 是一组相互配合使用的软件包,是一灵活的电力电磁暂态仿真工具。EMTDC 用来执行使用者所定义的电力系统的暂态分析,PSCAD 则是 EMTDC 的图形界面,用来让使用者定义自己所要仿真的系统。EMTDC 的优势在于它方便使用的函数与模型,以及它们与电路和控制系统良好的交互性,便于使用者更直接方便地进行仿真。EMTDC 用在实时仿真上优势比较大^[14]。

MATLAB 是由 Math works 公司开发的一种用于

工程计算的高性能语言,包括核心函数和工具箱两大内容,核心函数是 MATLAB 数学运算的基础,而功能越来越强大的工具箱则是深入应用到各个工程领域的利器,电力系统也不例外^[15]。

一方面, MATLAB 可以进行编程计算,相对于其他的编程语言(如 C、FORTRAN、BASIC 语言),它具有编程简单,易于编译,语言要求不太严格的特点,给使用者带来很多的方便。特别是它的独特的矩阵运算优势,使编程变得相当简单。但是 MATLAB 的运算速度相对于其他语言来讲比较缓慢。另一方面, MATLAB 的工具箱使其功能得以延伸,包含有许多领域,例如神经网络工具箱(Neural Network Toolbox)、小波工具箱(Wavelet Tool box)和电力系统模块(Power System Blockset)等等。可以直接利用其中已经存在的现有工具模块为人所用,同时支持使用者根据自己的需要创建自己的工具模块。

再者, MATLAB 的 Simulink 是一个很有特色的应用部分,与工具箱配合使用,可以搭建出自己所研究领域的仿真模型来进行仿真,简单直观。同时, MATLAB 具有很强交互性,可以调用 FORTRAN、C 语言子程序进行混合编程。特别是它提供了许多与其他工具直接的或者间接的接口。例如, EMDC/PSCAD 可以通过 GUI(graphical user interface)与 MATLAB 建立联系,而对于 ATP, MATLAB 可以通过“PL42MAT”将 ATP 的输出文件转化为 MATLAB 可以用的文件格式,以进行画图处理和信号分析等处理^[11]。

综上所述,利用 ATP 与 MATLAB 相互协作进行行波保护的研究是一种不错的选择。利用 ATP 强大的功能,可以得到仿真数据,包括画图应用的数据文件以及进行后处理的数据文件。通过绘制的图形文件(可以用 ATP 中的自带的绘图程序绘制,也可以把数据文件引入到 MATLAB 中进行绘制),可以直观地查看故障后的电压、电流波形。而从 ATP 中得到的故障数据文件还可以在 MATLAB 中进一步分析,如可以将这些数据利用小波分析对其进行信号处理,以得到所要的结果,发挥 MATLAB 编程简单、效率高、功能强大的特点。

5 行波保护仿真中信号处理工具的选择

行波信号是一种具有突变性的、非平稳性的高频暂态信号,怎样从故障的电流电压信号中提取出有效的故障特征是构造行波保护的前提与关键所在,而现有的常规保护中常采用傅立叶变换来对故

障信号进行分析,但是,傅立叶变换只能得到故障信号在频域的一些信息。用傅立叶变换来对行波信号进行描述达不到所要的有用的故障信息,因此,需要新的数学工具来刻画故障信号。

小波变换是傅立叶分析的重大发展,它的出现给应用科学领域带来了新的机遇,特别是信号处理、图像边缘检测以及模式识别等领域。它的加窗思想,使信号在时域与频域内同时具有良好的局部化性质,但与加窗傅立叶变换相比,它不只是把某一频率的信号加窗而使该频率的信号信息更加清晰化,而且把每个频率的信号信息清晰化了,具有随频率不同自动调整窗宽高的自适应性。而小波分析良好的数据压缩功能无疑使大量的行波数据信号的分析变得容易。而小波的多分辨率分析,对原始数据进行了逐步分层分解,对保护而言则可以提高可靠性^[16,17]。

综上所述,小波分析方法应用于行波保护仿真研究中很可取。

6 行波保护仿真研究中所要考虑的几个影响因素

首先是对行波信号的不确定因素的考虑。由于行波信号在阻抗不连续的点发生折射与反射现象,反射程度与折射程度依赖于不连续点两侧的波阻抗大小,其折射程度与反射程度用折射系数与反射系数来衡量,两个系数分别表示为:

$$\text{折射系数, } K_T = \frac{2 Z_{2C}}{Z_{2C} + Z_{1C}} \quad (3)$$

$$\text{反射系数, } K_R = \frac{Z_{2C} - Z_{1C}}{Z_{2C} + Z_{1C}} \quad (4)$$

Z_{1C} 、 Z_{2C} 分别为两段线路的波阻抗。如图 3 所示。

当故障线路相连母线的母线结构为一进一出两回进出线时(如图 3 所示 A 点母线处),行波将不会有明显的反射现象(假设两侧的波阻抗相同 $Z_{1C} =$

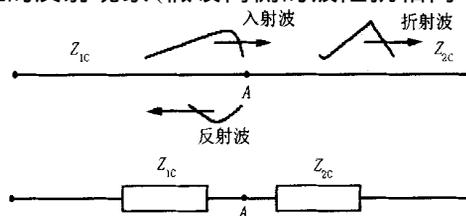


图 3 行波在阻抗不连续点处发生折射与反射现象
Fig. 3 The reflection and refraction phenomenon of the line traveling wave at the location of discontinuous impedance

Z_{2c}), 即 K_R 为零。所以, 在研究基于行波反射原理的保护(距离保护和噪声保护)时候, 就得想法避开或者弥补这一因素的影响。而这一因素对于双端电气量的保护影响小一些^[1,2]。还有一个不确定因素就是故障时刻初始电压的不确定。故障是随机的, 当电压初相角为零时候将没有行波信号产生, 行波保护将失效。文献^[2,18]中指出故障电压初始角接近于零的概率是很小的, 但是还存在一定可能性, 因此需要一定的对策。

其次, 在输电线路上一一般都装设载波设备, 例如阻波器^[18], 阻波器的调谐频率为 50 ~ 400 kHz 之间, 而行波波头中包含有丰富的高频成分, 因此阻波器会对流入母线的电流行波产生影响, 在行波保护数字仿真研究中同样需要考虑。

再者是故障点过渡电阻的影响。当故障点存在过渡电阻时, 行波在故障点将不再发生全反射, 与金属性故障相比, 行波过程将不会被故障点隔离而仅局限在各自的故障点与母线之间, 将会产生行波的透射现象, 并在对侧母线处反射返回, 行波过程将变得复杂, 行波波头也将产生变化, 这使得对行波保护的研究受到影响。

最后, 线路的换位与不换位对线路的参数将产生影响。主要影响线路的阻抗与导纳。以不换位线路来讲, 如果线路不换位, 线路的阻抗与导纳矩阵将不再是对称矩阵, 电压与电流的模式变换矩阵 $[S]$ 与 $[Q]$ 也不再相等, 矩阵元素是复数, 且随着频率变化。即使线路完全换位, 换位距离与高频分量的波长相比, 仍然不可忽略线路结构不对称造成的影响。在具体的仿真中, 需要根据具体情况进行分析判断, 讨论其影响程度。

7 小结

针对行波信号的特殊性, 为了在仿真中得到较好的效果, 文中讨论了在仿真中所要考虑的几个问题, 并给出建议性的意见。对于线路模型选择 FD (Frequency-Dependent) 线路模型, 仿真工具选择了 ATP 与 MATLAB 的组合, 而仿真的信号处理工具选择了方兴未艾的小波分析, 最后讨论了行波保护研究的几个影响因素。

参考文献:

- [1] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理及技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.
- [2] 董新洲, 葛耀中, 贺家李, 等. 输电线路行波保护的现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(10): 56 - 60.

- [3] 董新洲. 小波理论应用于输电线路故障测距研究[D]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.
- [4] 唐勇, 陈珩, 戴方涛, 等. 行波保护研究中行路模型的选择[J]. 中国电机工程学报, 1997, 4(17): 269-273.
- [5] Mart í J R. Accurate Modeling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations[J]. IEEE Trans on Power App And Syst, 1982, PAS - 101(1): 147 - 155.
- [6] Semlyen A, Dabuleanu A. Fast and Accurate Switching transient Calculations on Transmission Lines with Ground Return Using Recursive Convolutions[J]. IEEE trans On Power App And Syst. 1975, PAS-94, (2): 561 - 571.
- [7] Ametani A. A High Efficient Method for Calculating Transmission Line Transients[J]. IEEE Trans. on Power App. And Syst., 1976, PAS-95: 1545 - 1549.
- [8] Mart í L. Simulation of Transients in Underground Cables with Frequency Dependent Modal Transformation Matrix[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1988, 3(3).
- [9] Gustavsen B, Semlyen A. Simulation 1099-1110 of Transmission Line Transients Using Vector Fitting and Modal Decomposition[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1998, 13(2): 605-614.
- [10] Yu T C. zCable Model for Frequency Dependent Modelling of Cable Transmission Systems. IPST '01, pp. 1034 - 1040, Rio de Janeiro, Brazil, 2001.
- [11] UI Department of Electrical Engineering. EE 529: Utility Applications of Power Electronics Session 6. Fall 2001.
- [12] 徐政. 免费使用的电磁暂态分析程序 ATP-EMTP 程序介绍[J]. 电网技术, 1999, 23(7): 64 - 69.
- [13] ATPDRAW version 3, User Manual[Z], TR A4389, EFI, Norway, 1996.
- [14] Gole AM, Daneshpooy A. Towards Open Systems: A PSCAD/EMTDC to MATLAB Interface[C]. International Conference on Power System Transients, IPST '97, Seattle, June 22-26, 1997, Proceedings: 145 - 149.
- [15] 王学辉. Matlab 6.1 最新应用详解[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 2002.
- [16] 刘贵忠, 邱双亮. 小波分析及其应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1992.
- [17] 秦前清, 杨宗凯. 实用小波分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1994.
- [18] 徐丙垠. 利用暂态行波的输电线路故障测距技术[D]. 西安: 西安交通大学电气工程系, 1991.

收稿日期: 2002-08-10; 修回日期: 2002-10-22

作者简介:

张晓东(1975 -)男, 硕士研究生, 从事电力系统微机继电保护的研究工作;

张 举(1946 -)男,教授,从事电力系统微机继电保护的研究工作;

丁 峰(1978 -)男,硕士研究生,从事电力系统安全稳定控制的研究工作。

Discussion on several questions of the digital simulation of the traveling wave protection

ZHANG Xiaodong , ZHANG Ju , DING Feng

(The North China Electric Power University , Baoding 071003 , China)

Abstract: With the rapid development of power system , the action speed of relay protection is required more highly. The traveling wave protection has the virtue of hyper action speed. So it is paid more and more attention. Simulation is a custom and effective method in the research of traveling wave protection. The paper discusses several custom questions of the digital simulation of the traveling wave protection , including the selection of transmission lines model , the selection of digital simulation tools , the selection of signal processing tools and several influencing factors in the research of traveling wave protection digital simulation. Against upper questions , FrequencyDependent line model , ATP along with MATLAB and wavelets analysis are respectively selected. With regard to the influencing factors in the research of traveling wave protection digital simulation , signal 's indeterminacy factors , line traps ' influence , ground resistance ' influence and transposed situation 's influence are discussed. Some prepositional advices are provided against every question and they are valuable in the research of traveling wave protection.

Key words: traveling wave protection ; ATP ; MATLAB ; frequency-dependent character ; wavelets analysis

(上接第 60 页)

(3) 高频保护反方向故障可靠不动作检查;

(4) 将收发讯机置“本机—负载”位置,收发讯机将收不到对侧信号,利用微机保护校验仪模拟在高频通道阻断情况下的故障状态,WXH-11 保护动作行为与故障时动作行为一致。

5 检查结论及应采取的措施

5.1 检查结论

(1) 丹 56 保护误动的原因是丹 56B 相结合滤波器损坏,造成高频通道阻断,故障时保护收不到对侧送来的闭锁信号。

(2) 乔 05 保护误动的原因是丹 56B 相开关在故障发生 70 ms 跳闸时,乔 05 WXH-11 型高闭零序保护早已在故障发生 60 ms 时转入振荡闭锁程序(ZDBS),此时高闭零序并不退出运行,由于躲不开线路非全相运行造成的零序电流,保护在判定为正方向后延时 60 ms 出口,同时发三跳令,乔 05 三相开关跳闸。

综上所述两条原因,第一个原因其实是造成丹乔线两侧保护误动的根本原因,乔 05 保护误动是丹

56 保护误动后的必然结果。

5.2 采取的措施

(1) 应加强对高频加工设备的管理,高频加工设备是高频保护设备的重要组成部分。保护人员应提高对此类设备进行维护的重要性的认识。在对高频加工设备进行测试后,应把本次测试数据与上一次测试数据进行比较,若相差较大,应及时查明原因,必要时对高频加工设备坚决予以更换。

(2) 高频保护在正常运行时无高频信号传输,为了发现高频通道的问题,有关规程规定运行人员应每天交换一次高频信号以检查高频通道传输质量的好坏。在雷雨、冰雪等可能影响高频信号传输质量的季节,应当适当增加现场运行人员每日进行高频通道检查的次数(例如每天 2~3 次);在天气发生变化时,运行人员也应进行一次高频通道检查,以便及时发现高频通道中出现的故障,并采取相应的对策。

收稿日期: 2001-10-18; 修回日期: 2002-08-17

作者简介:

肖 刚(1974 -)男,本科,工程师,从事继电保护及自动化的生产运行和技术管理工作。

Maloperation analysis of WXH11CX high-frequency protection based on microcomputer in 220 kV Danqiao line

XIAO Gang

(Xiangfan Power Supply Bureau , Xiangfan 441002 , China)

Abstract: In 220 kV electric power system , application of highfrequency protection based on microcomputer is very extensive , and whether its action is right or not directly relate to electric power network 's safe operation. By analyzing a maloperation event of highfrequency protection , it is discovered that coupling-filter damaged is main reason in this fault. For avoiding similar fault in the future , it is suggested that operators enhance management on carrier frequency channel , and exchange highfrequency signal once everyday to check the transmission quality of the channel.

Key words: high-frequency protection ; carrier frequency channel break ; minimum action voltage ; action analysis