

基于 S 函数的数字式变压器差动保护仿真

韩笑¹, 戈祥麟², 汪经华³

(1. 南京工程学院, 江苏 南京 210013; 2. 昆山市供电公司, 江苏 昆山 215300; 3. 池州供电公司, 安徽 池州 247100)

摘要: 利用 Matlab 中的 Simulink 及 SPS (SimPowerSystem) 工具箱建立变压器仿真模型, 利用 S 函数 (S-Function) 进行差动保护算法编程, 以实现差动保护功能, 建立了双绕组变压器差动保护的仿真模型, 其中包括了比率制动与二次谐波制动等模型。在仿真模型中, 该差动保护功能可以反应变压器差动保护区内的不同类型的故障, 并能正确动作于跳闸; 当空载投入变压器时, 该差动保护又能够根据励磁涌流可靠闭锁。仿真结果表明, S 函数所编写的数字式差动保护的 S 函数仿真程序是正确的。还对部分 S 函数 (S-Function) 编写的差动保护算法语句进行了说明。

关键词: Matlab; 变压器; 差动保护; 仿真

Digital transformer protection simulation based on S-function

HAN Xiao¹, GE Xiang-lin², WANG Jing-hua³

(1. Nanjing Institute of Technology, Nanjing 210013, China; 2. Kunshan Electric Power Company, Kunshan 215300, China
3. Chizhou Electric Power Company, Chizhou 247100, China)

Abstract: Using Simulink and SPS (simpowersystem) toolbox and S-Function in MATLAB software, this paper establishes a three-phase saturable transformer and its differential protection simulation model. Simulink and SPS (simpowersystem) provide a graphical user interface (GUI) for building a transformer models as block diagrams. The transformer differential protection model, which were created using S-Functions, contains a transformer ratio brake and twice harmonic brake differential function. This paper uses the M-file to program the differential protection S-function. The transformer and its differential protection simulation model can operate or brake correctly according to varieties internal faults or external faults such as single faults, two phase faults, three phase faults, two phase grounding faults etc. The differential protection model also can be barked through analyzing the twice harmonic in the inrush current during energization of a three-phase saturable transformer. The simulation results indicate that transformer digital protection S-Function programs are correct. This paper also shows some differential protection S-Function program and explanation.

Key words: Matlab; transformer; differential protection; simulation

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)09-0001-04

0 引言^[1,2]

Matlab 中的 Simulink 及 SPS (SimPowerSystem) 工具箱为用户提供了许多内置的基本库模块, 通过这些模块进行连接可构成电力系统及其保护的模型。然而, 由于保护原理涉及到许多数字信号处理及算法、逻辑等复杂内容, 用户难以利用这些基本模块进行较复杂原理的继电保护的仿真, 从而使利用 Matlab 进行继电保护仿真研究受到一定限制。

Simulink 中的 S 函数 (S-Function) 是一种强大的对模块库进行扩展的新工具。利用 S 函数, 用户可以定制自己的 Simulink 模块, 如变压器差动保护功能模块。具有模块化、可重载、可封装、面向结

构图编程及可视化等特点, 可大大提高系统仿真的效率和可靠性。本文根据这一思路, 利用 Matlab 中的 M 文件 S-Function 编写变压器差动保护的仿真程序 (M 文件), 结合 SimuLink 和 SimPowerSystems 工具箱, 构建出一个具有扩展功能的双绕组变压器差动保护仿真模型。

1 仿真模型的构建

1.1 利用 Matlab 建立变压器差动保护仿真模型^[3]

首先, 利用 Matlab 中的 Simulink 及 SimPowerSystems 模块库, 构建一简单具有双侧电流的双绕组变压器仿真模型, 如图 1 所示。通过该系统模型可

方便地进行变压器双侧区内(套管及引出线)或区外故障的模拟,改变变压器模型还可进行变压器内部绕组故障的模拟(后述)。用户可根据需要灵活设置故障点及故障类型,图1中只画出了两处。需要指出,仿真起止时间为0~0.2s,采样频率为2kHz,采用变步长、ode15算法进行仿真。所有模块的频率设置为50Hz;图1中的等效三相系统1、2采用三相电源模块,三相断路器的初始信号为合闸,并选中“由外部信号控制断路器的合、分时间”选项;此时图1中的三相断路器将会新出现一“com”端,用于将差动保护子系统(后述)的动作输出信号接至该端;测量元件1、2采用三相电压-电流测量器模块,通过该模块可获得变压器两侧的三相电流共六路模拟量;图1中双绕组变压器采用三相双绕组变压器模块,采用Y,d11型接线,Y侧(“等效三相系统2”侧)为高压侧。通过使用标签或直接引出的方法可以很方便地将两侧电流引出至差动保护子系统及Matlab的工作空间中。

差动保护保护子系统的内部构成如图2所示,测量元件1、2所测得的变压器高低压侧电流(共6路量)分别经过一放大器(“Gain”)模块,在此模块中可调整比例系数,实现了数字式保护中的变换器功能。基波傅立叶模块及二次谐波傅立叶模块同属于Simulink中傅立叶模块,其作用是输出各相电流的基波(二次谐波)的幅值 I 和相角 φ 。注意在S-Function模块中使运算中通过公式 $A + jB = I \times \cos \varphi + jI \times \sin \varphi$ 可以把电流变换成复数形式进行运算。

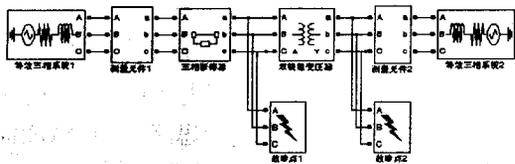


图1 简单双电源系统双绕组变压器仿真模型

Fig.1 Simple simulation model of two-winding transformer

傅立叶变换输出量根据需要进入四个S函数模块,模块中分别封装有具有不同函数功能的M文件程序,分别实现的功能为:比率制动、二次谐波制动、二次断线闭锁、差流速断。S函数模块输出的数字信号进入动作逻辑模块(较简单,不再详述),决定差动保护子系统是否动作于跳闸或是否发出电流互感器(CT)断线信号。

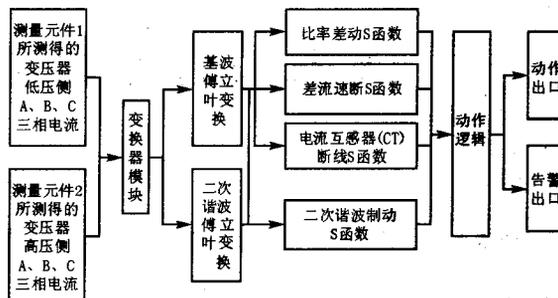


图2 差动保护子系统

Fig.2 Differential protection subsystem

1.2 差动保护子系统所用S函数的写法

S函数(S-Function)是一个动态系统的计算机语言描述,提供了扩展Simulink模块库的有力工具,它采用一种特定的调用语法,使函数和Simulink解法器进行交互。本仿真模型中选择用M文件编写S函数,用于定制变压器差动保护专用的Simulink模块。正确使用S函数的关键是初始化模块特性包括输入输出信号的宽度,离散连续状态的初始条件和采样时间。为了让Simulink识别出一个M文件S函数,用户必须在S-函数里提供有关S-函数的说明信息,包括采样时间、连续或者离散状态个数等初始条件。这一部分主要是在mdlInitializeSizes子函数里完成。以比率制动S函数为例,说明本仿真中所用S函数的写法。比率制动分相差动的作用是利用分相比率制动判据实现差动保护跳闸。差动元件的动作特性较多采用具有二段折线型的动作特性曲线,其动作判据^[4]为:

拐点前(含拐点):

$$I_{op} \geq I_{op-min} \quad I_{res} \leq I_{res-min} \quad (1)$$

拐点后:

$$I_{op} > I_{op-min} + K(I_{res} - I_{res-min}) \quad (2)$$

$$I_{res} > I_{res-min}$$

式中: I_{op} 为差动电流的幅值; I_{res} 为制动电流幅值; I_{op-min} 为差动保护最小动作电流; $I_{res-min}$ 为差动保护最小制动电流。

考虑该差动保护需进行相位补偿,在程序中对低压侧电流进行了“转角”:以A相为例

$$I'_a = (I_a - I_c) / \sqrt{3} \quad (3)$$

以A相为例,其差动电流及制动电流为:

$$I_{op} = |I_A - I'_a| \quad (4)$$

$$I_{res} = (|I_A| + |I'_a|) / 2 \quad (5)$$

式中: I_a' 为低压侧 A 相进行相位补偿后电流; I_a 、 I_c 为 A、C 相低压侧电流相量; I_A 为 A 相高压侧电流相量。

比率制动 S 函数的 M 文件程序为 (“%” 后为程序注释):

```
function[sys, x0, str, ts]=
BLCD(t, x, u, flag, Iopmin, Kres, Iresmin) %BLCD——函数名
Iopmin=2;%给出差动保护最小动作电流整定值
Kres=0.5;%给出比率制动系数
Iresmin=5;%给出差动保护最小制动电流整定值
switchflag
case 0
[sys, x0, str, ts]=mdlInitializeSizes(Iopmin, Kres, Iresmin);%初始化
case 2,
sys=mdlUpdate(t, x, u); %更新离散状态、采样时间和主时间同步的要求。
case 3
sys=mdlOutputs(t, x, u, Iopmin, Kres, Iresmin);% 计算 s-function 的输出
case 9,
sys = []; % do nothing
otherwise
error([' Unhandled flag = ', num2str(flag)]); %报错
end
function[sys, x0, str, ts]=
mdlInitializeSizes(Iopmin, Kres, Iresmin)
%模块初始化,
.....
%该段定义 s-function 模块的基本特性, 包括采样时间、连续或者离散状态的初始条件和 sizes 数组。注意离散状态的个数 (sizes.NumDiscState) 即状态向量离散部分的宽度设置为 6; 此程序输入变量为 6 路电流的幅值与相角共 12 个变量; 因此输入变量的个数 (sizes.NumInputs) 即输入向量的宽度设置为 12。其余采用默认值, 该段程序被略去。
.....
function sys=mdlUpdate(t, x, u);%u 为输入量, 共有 12 个输入量, 分别为: u1、u5、u9 为 A、B、C 相低压侧电流幅值; u2、u6、u10 为 A、B、C 三相低压侧电流相位; u3、u7、u11 为 A、B、C 相高压侧电流幅值; u4、u8、u12 为 A、B、C 相高压侧电流相位。
x 为中间离散变量, 共有 6 个, x1、x3、x5(即程序中 sys(1)、sys(3)、sys(5)) 为 A、B、C 三相差动电流; x2、x4、x6(即程序中 sys(2)、sys(4)、sys(6)) 为 A、B、C 三相
```

相制动电流。

```
sys(1)=abs((u(1)*cos(u(2))+u(1)*i*sin(u(2))-u(9)*cos(u(10))-u(9)*i*sin(u(10)))/sqrt(3)-u(3)*cos(u(4))+u(3)*i*sin(u(4))); %求 A 相差动电流, 见式 (2)、(3)。
sys(2)=abs((u(1)*cos(u(2))+u(1)*i*sin(u(2))-u(9)*cos(u(10))-u(9)*i*sin(u(10)))/sqrt(3)+u(3)*cos(u(4))+u(3)*i*sin(u(4)))/2 %求 A 相制动电流见式 (2)、(4)。
%..... 下略去 B、C 相差动电流及制动电流的求法.....%
function
sys=mdlOutputs(t, x, u, Iopmin, Kres, Iresmin)
%利用差动保护的判别进行判别得到是否动作
if
(x(1)>Iopmin&(x(1)-Iopmin)>Kres*(x(2)-Iresmin))|((x(3)>Iopmin&(x(3)-Iopmin)>Kres*(x(4)-Iresmin))| (x(5)>Iopmin&(x(5)-Iopmin)>Kres*(x(6)-Iresmin))) %按式 (1) 对三三相的动作电流及制动电流进行判断。
sys=1;
else
sys=0; % sys=1 代表保护动作, 该 S 函数模块输出为 1, 否则输出为 0。
end% 程序结束
```

2 变压器保护动作行为仿真

本次研究重点在于利用 S 函数实现变压器保护仿真功能, 因此在图 1 所示仿真模型基础上先后构造了变压器油箱内部故障、油箱外部故障 (包括差动保护区内、外故障)、变压器励磁涌流等仿真模型。

2.1 变压器励磁涌流及保护动作行为

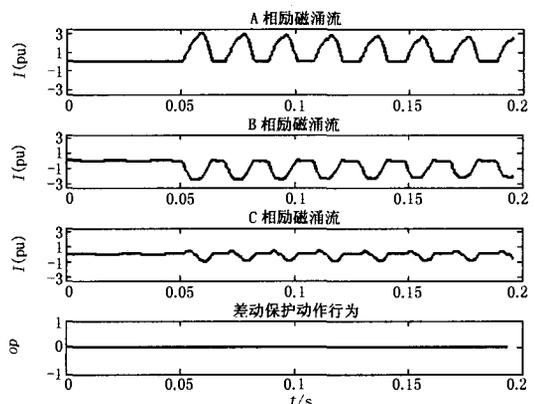


图 3 励磁涌流仿真波形

Fig.3 Simulative waveform of inrush current

要仿真变压器的励磁涌流, 可先将图 1 中变压器某一侧设置为空载, 并将变压器的属性 “saturable core” 单选框选中。在变压器属性页

中对其励磁特性参数进行相应设置即可改变励磁涌流的幅值及持续时间。利用 S 函数实现二次谐波闭锁功能即可保证变压器差动保护不动作,图 3 中 A、B、C 三相的电流以标么值“ I (pu)”显示,差动保护动作行为用“ op ”表示(下同)。在仿真开始后 0.05 s 后出现励磁涌流,仿真时间长度为 0.2 s。由图 3 可知,保护未动作。

2.2 变压器油箱内部故障及保护动作行为

进行变压器内部故障行为的仿真,可将图 1 中的三相变压器模型改变为三个单相线性变压器(Linear Transformer),在线性变压器属性框中选中“三绕组变压器”(Three windings Transformer),从而构造出一个初级绕组,两个次级绕组的单相变压器(两个次级绕组首尾相连,当作一个次级用)。初级和次级可按三相变压器的接线组别进行联接,次级绕组的额定电压可灵活调整以便进行变压器内部故障的仿真,故障点可设置于两个次级绕组的连接线上,也可设置于绕组首端。依次进行变压器高压侧内部整个绕组的 50% 处的 A 相接地、BC 两相短路、BC 两相接地短路、三相短路等故障的仿真。统一设置故障时刻为仿真开始后 0.02 s,对于以上四种故障类型,仿真的变压器保护都于 0.037 s 发出跳闸命令(图中的“ op ”信号为由 0 变为 1)。断路器的“ com ”端接受该信号后,实现跳闸,切除故障,电流消失。图 4 只示出了仿真开始至 0.06 s 的电流及动作行为波形。

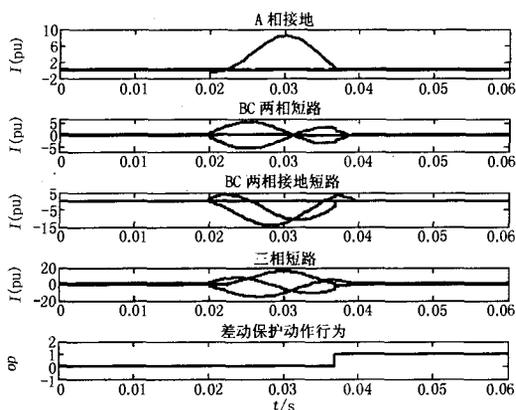


图 4 油箱内部故障仿真波形

Fig.4 Simulative waveform of internal faults

2.3 变压器油箱外故障及保护动作行为

油箱外故障可采用三相单相变压器构成的仿真模型,也可采用图 1 所示仿真模型进行仿真。图 5 所示电流波形反映的变压器高压侧套管处发生各种故障时的标么值,与图 4 相比两者波形相似,但电流标么值较大。经仿真差动保护能正确动作,动作

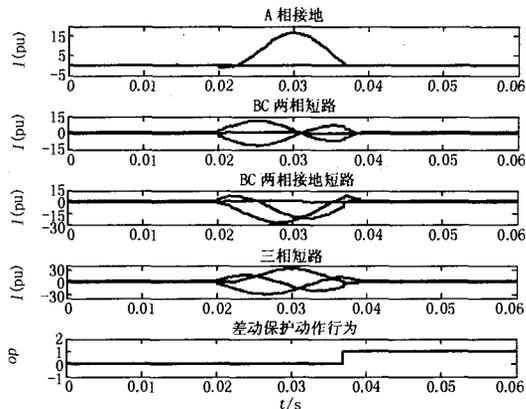


图 5 油箱外部故障仿真波形

Fig.5 Simulative waveform of external faults

时间与油箱内部故障一致。图 4 只示出了仿真开始至 0.06 s 的电流及动作行为波形。

可见将自编的 S 函数应用于仿真变压器的各种故障时保护的动作为,其仿真结果是正确的。

3 结语

利用 M 文件 S 函数编写的差动保护程序,建立了变压器差动保护的仿真模型,实现了借助于 Matlab 的数字式差动保护仿真的程序化仿真,并能配合断路器实现有选择性的动作。从而对于新开发的变压器新型保护原理提供了新的验证理念及软件仿真的可能性,显然,利用 S 函数也可以对其它保护原理进行仿真研究。其仿真原理是相通的。

参考文献

- [1] 薛定宇,陈阳泉.基于 Matlab/Simulink 的系统仿真技术与应用[M].北京:清华大学出版社,2002.
XUE Ding-yu, CHEN Yang-quan. Systematic Simulation Technology and Application Based on Matlab/Simulink[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [2] 张颖,金维香.基于 MATLAB 的电力系统暂态稳定仿真研究[J].大电机技术,2004,(1): 46-48.
ZHANG Ying, JIN Wei-xiang. Power System Transient Stability Simulation Based on MATLAB[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2004, (1): 46-48.
- [3] 韩笑,徐曦,陈卓平.基于 MATLAB 与 VB 数据交换的继电保护仿真[J].电力自动化设备,2006,26(5): 92-95.
HAN Xiao, XU Xi, CHEN Zhuo-ping. Protection Simulation Based on Data Exchange between Matlab and VB[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(5): 92-95.

(下转第 21 页 continued on page 21)

求。因此,本文成功地提取了用于暂态稳定分类的有效特征。

参考文献

- [1] 于之虹,郭志忠.遗传算法在暂态稳定评估输入特征选取中的应用[J].继电器,2004,32(1):16-20.
YU Zhi-hong, GUO Zhi-zhong. Feature Selection Based on Genetic Algorithm for Transient Stability Assessment[J]. Relay, 2004, 32(1):16-20.
- [2] 顾雪平,张文朝.基于Tabu搜索技术的暂态稳定分类神经网络的输入特征选择[J].中国电机工程学报,2002.
GU Xue-ping, ZHANG Wen-chao. Feature Selection by Tabu Search for Neural-network Based Transient Stability Classification[J]. Proceeding of the CSEE, 2002.
- [3] 管霖,曹绍杰.基于人工智能的大系统分层在线暂态稳定评估[J].电力系统自动化,2000,24(1):22-26.
GUAN Lin, Tso S K. Combination of Heuristic Reasoning and ANN to Realize On-line Transient Stability Assessment in Large Scale Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(1):22-26.
- [4] 刘玉田,林飞.基于相量测量技术和模糊径向基网络的暂态稳定性预测[J].中国电机工程学报,2000,24(2):19-23.
LIU Yu-tian, LIN Fei. Application of PMU and Fuzzy Radial Basis Function Network to Power System Transient Stability Prediction[J]. Proceeding of the CSEE, 2000, 24(2):19-23.
- [5] 顾雪平,曹绍杰.人工神经网络和短时仿真结合的暂态安全评估事故筛选方法[J].电力系统自动化,1999,23(4):16-20.
GU Xue-ping, Tso S K. Integration of ANNs and Short-duration Numerical Simulation for Contingency Screening of Transient Security Assessment[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(4):16-26.
- [6] 张琦,韩祯祥,等.用于暂态稳定评估的人工神经网络输入空间压缩方法[J].电力系统自动化,2001,25(5):32-36.
ZHANG Qi, HAN Zhen-xiang, et al. Input Dimension Reduction in Neural Network Training for Transient Stability Assessment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(2):32-35.
- [7] 卢纹岱,等.SPSS for Windows统计分析[M].北京:电子工业出版社,2002.311-316.
LU Wen-dai, et al. SPSS for Windows Statistical Analyse[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 311-316.
- [8] 刘海燕,等.概率论与数理统计(下)[M].北京:国防工业出版社,2001.53-161.
LIU Hai-yan, et al. The Theory of Probability and Statistics[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2001. 153-161.
- [9] 陈正昌,等.多变量分析方法统计软件应用[M].北京:中国税务出版社,2005.
CHEN Zheng-chang, et al. Multivariable Analysis Method, Statistical Software Application[M]. Beijing: Chinese Tax Affairs Publishing House, 2005.
- [10] 薛薇.SPSS统计分析方法及应用[M].北京:电子工业出版社,2004.
XUE Wei. SPSS Statistical Analyse Method and Application[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.
- [11] 王晓红,王晓茹,李群湛.二分类数据的分类结果可视化算法[J].西南交通大学学报,2006,41(3):329-334.
WANG Xiao-hong, WANG Xiao-ru, LI Qun-zhan. Algorithm for Visualization of Classification Results of Two-category Data[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2006, 41(3):329-334.

收稿日期:2006-11-27; 修回日期:2007-01-15

作者简介:

向丽萍(1981-),女,硕士研究生,研究方向为数据挖掘与电力系统紧急控制;E-mail:lpxiang@mars.swjtu.edu.cn

王晓红(1977-),女,讲师,博士研究生,研究方向为数据挖掘与电力系统紧急控制;

王建(1982-),男,博士研究生,研究方向为分布式电力系统计算。

(上接第4页 continued from page 4)

- [4] 许正亚.变压器及中低压网络数字式保护[M].北京:中国水利水电出版社,2004.
XU Zheng-ya. Digital Protection for Power Transformer and Medial-low Voltage Electric Power Net[M]. Beijing: China Water Power Press, 2004.

作者简介:

韩笑(1969-),男,硕士,副教授,主要从事电力系统继电保护,电力系统优化,电力系统仿真的研究与教学工作;E-mail:hxlqc@sina.com

戈祥麟(1964-),男,大专,技师,从事电力系统继电保护施工、维护、调试工作;

汪经华(1967-),男,学士,工程师,主要从事电力系统继电保护工程施工及管理工作。

收稿日期:2006-09-14

修回日期:2007-03-07