

DOI: 10.7667/PSPC170757

基于 DIgSILENT 的继电保护建模仿真研究

张君宇, 林睿, 陶维青

(合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: DIgSILENT PowerFactory 软件是一款专门用于电力系统分析和控制的仿真软件, 其附带的丰富电气元器件模型为含有分布式电源的电力系统研究和学习带来了极大的便利。介绍了基于该软件进行继电保护仿真的建模原理、一般建模架构及各种功能模块。并以过电流保护和距离保护为例, 展示了利用该软件进行继电保护仿真的过程。通过仿真验证了利用 DIgSILENT 进行继电保护仿真的有效性和正确性, 展示了软件在该应用领域的先进性。

关键词: DIgSILENT; 继电保护; 建模仿真

Study of relay protection modeling and simulation on the basis of DIgSILENT

ZHANG Junyu, LIN Rui, TAO Weiqing

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: DIgSILENT PowerFactory, a simulating software, is exclusively devised for electric power system analysis and control. Equipped with a rich electric component model, it has brought great convenience for research and study on power system with distributed generation. This paper introduces the modeling principle, general framework, and various functional modules in the simulation of relay protection based on DIgSILENT. By illustrating overcurrent protection and distance protection simulation, this paper presents the process of the application of DIgSILENT in relay protection simulation. And the effectiveness and correctness of relay protection simulation by using DIgSILENT is proved, demonstrating the advancement of the software in this field.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0902801).

Key words: DIgSILENT; relay protection; modeling and simulation

0 引言

电力系统的运行方式越来越复杂, 给继电保护的运行分析带来很大困难^[1]。在这种情况下, 利用计算机数字仿真系统对电力系统进行继电保护仿真成为继电保护装置开发和研究的一种重要方法。文献[2]介绍和比较了三种实时仿真技术的理论基础和实现方式, 在实际应用中应有选择地配合使用。文献[3]针对继电保护仿真, 继电模型缺乏的现状, 提出了继电保护模型的建模方法。使用 PSASP 的用户自定义模块建立距离保护模型, 验证了该方法的可行性。文献[4]提出了一种基于虚拟继电器的继电保护通用建模方法, 采用面向对象的 C++ 语言对保护的属性和动作行为进行建模, 建立的模型可用于修改和扩充保护功能。文献[5]利用 PSCAD/EMTDC

建立接口模型, 启动 Matlab 数据引擎调用 M 文件, 实现接口模型的参数设置。使仿真计算不必受软件自带模型的限制, 增强了仿真的灵活性。

DIgSILENT PowerFactory 软件提供了大量不同厂家的电气元件模型及参数, 可在图形环境中简便地使用和修改, 在含有光伏、风机与储能等新能源的电力系统仿真应用中具有良好效果^[6-8]。同时该软件可通过接口与 Matlab 进行联合仿真, 结合了 Matlab 在处理庞大数据和控制系统建模的优势^[9]。

在继电保护方面, 目前国内外广泛使用的电力系统仿真软件大多仅仅是依靠预定时间后开关的开断来实现保护功能。目前对于含 DG 的各种保护改进方案, 由于缺少各类新型继电保护装置及精细化 DG 模型, 一般的系统仿真不能准确模拟系统及继电器的运行状态^[10-12]。

利用 DIgSILENT 软件, 可以对保护装置进行建模, 进行参数的整定, 通过事件的设定来验证运行

过程中的协调性问题, 并有助于运行人员熟悉保护装置的性能与操作。本文通过对该软件继电保护建模原理的介绍和继电保护仿真的实例, 展示了该软件在继电保护仿真领域的强大功能。

1 继电保护仿真一般过程

继电保护仿真的一般过程如图 1 所示。为了进行继电保护仿真, 首先要通过软件构造电力系统网络, 为各个元件及线路设置型号和参数等。在准备完成后, 进行潮流分析。利用该软件的潮流分析功能, 每个元件或线路旁都会显示相应的结果框。用户可以在网络图中通过颜色和结果框直观地看到输出结果, 并可根据需要设置生成相应的结果报告。

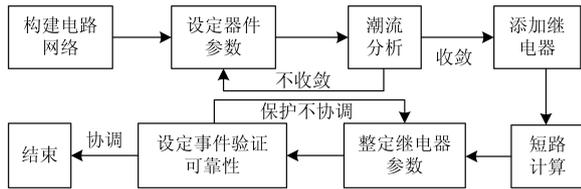


图 1 继电保护仿真一般过程

Fig. 1 General process of relay protection simulation

在继电保护仿真中, 短路计算可用于确定继电保护元件的参数和熔断器容量等, 其结果也可用于协调不同保护设备。在潮流分析得到稳定结果后, 利用该软件短路计算工具, 可直接在单线图的不同位置设置短路点, 选择各种短路类型, 设置不同的短路情况。既可仿真单一故障, 也能够仿真几乎无限复杂的多重故障。并且基于 VDE、IEC、ANSI 等标准, 在短路计算对话框中可选择不同的计算方法以满足不同情况下对于短路计算结果的需要。

得到短路计算结果后, 根据继电保护的需要, 可在网络中相应位置直接添加继电器, 熔断器及 CT、VT 等元件, 用户可以选择系统中已有的各厂家的继电器模型, 也可以通过自己新建, 得到相应的继电器模型。通过继电器基本信息对话框, 用户可简便地修改继电器的整定值, 并通过时间-过电流曲线、R-X 图等观察到继电器之间的相互配合。

最后, 利用系统的 RMS 仿真工具, 通过在不同位置设置不同的事件, 可得到继电器在故障情况下相应的行为, 以验证继电保护的协调性与可靠性。

2 DIgSILENT 继电保护建模原理

2.1 系统仿真参数的获得

在 DIgSILENT 软件中可通过 RMS 与 EMT 两种仿真模式对系统进行分析。对于电流, 在 RMS 仿真中, 电流量测的输出信号 i_r 和 i_i 分别为 A 相电

流有效值相量实部与虚部以 I_{rated} 为基准值的标幺值, 如式(1)。 I_{rated} 在 EMT 仿真中, 电流量测的输出信号 i_r 、 i_i 、 i_0 分别是三相瞬时电流经过 Clarke 变换后的 α 、 β 、 γ 分量以 I_{rated} 为基准值的标幺值, 如式(2)。 I_{rated} 由电流量测编辑界面的“额定电流”选定的不同内容决定。

$$i_r = i_{r_A} \cdot \frac{1 \text{ MVA}}{\sqrt{3} U_n} / I_{rated} \quad (1)$$

$$i_i = i_{i_A} \cdot \frac{1 \text{ MVA}}{\sqrt{3} U_n} / I_{rated}$$

$$i_r = i_\alpha \cdot \frac{1 \text{ MVA}}{\sqrt{3} U_n} / I_{rated}$$

$$i_i = i_\beta \cdot \frac{1 \text{ MVA}}{\sqrt{3} U_n} / I_{rated} \quad (2)$$

$$i_0 = i_\gamma \cdot \frac{1 \text{ MVA}}{\sqrt{3} U_n} / I_{rated}$$

类似地, 对于电压, 在 RMS 仿真中, 电压量测输出信号 u_r 、 u_i 为 A 电压有效值相量实部与虚部以 $U_{rated}/\sqrt{3}$ 为基准值的标幺值。在 EMT 仿真中, u_r 、 u_i 为三相电压瞬时值经 Clarke 变换后的 α 、 β 分量值以 $U_{rated} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$ 为基准值的标幺值。 U_{rated} 由电压量测编辑界面的“额定电压”选定的不同内容决定。

2.2 继电保护建模架构

DIgSILENT 对于继电器的建模通过继电器架构、继电器类型和继电器元件等三个层次来完成。图 2 图形化显示了三个层次之间的关系。

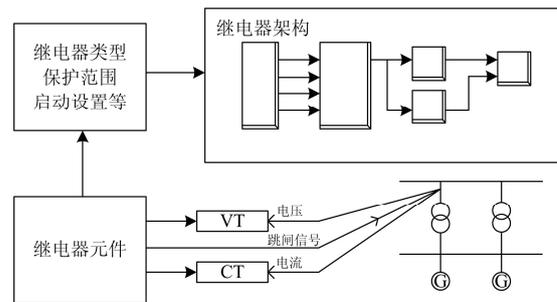


图 2 保护设备的建模仿真架构

Fig. 2 Modelling simulation structure for protection devices

继电器架构利用方框图来规定通用的继电器功能。图 3 显示了继电器架构的一般建模结构, 图中被称为插槽的方框代表着各种不同的功能块, 不同的插槽间用带箭头的线来表示信号连接关系。这些插槽可以被定义为测量功能块、保护比较功能块、逻辑功能块和定时器等, 它定义了继电器保护的段数和不同段之间的相互关系。某一继电器的建模一

般由其中的部分功能块组成。

继电器架构内不同插槽的功能块的选择决定了继电器的类型,在 DIgSILENT 系统全局库中包含了已有的一些厂家的继电器模型,用户可以直接调用,也可以将模型复制到项目库中对其进行修改,或另建模型。此外,继电器类型也规定了继电器参数设置的范围。

继电器元件用来模拟网络中实际的继电器,它

由继电器类型与参数的设置共同决定。通过安装在测量点的 CT/VT 得到电网的运行情况,在需要动作时,通过输出跳闸信号给断路器来控制线路的开断。

2.3 几种常用继电器功能模块

图 3 为 DIgSILENT 软件中继电器的基本建模结构,所有的继电器架构都是由各种功能模块组成的,不同种类的保护功能块用以模仿不同的继电器功能。其中,常用的功能模块有以下几种。

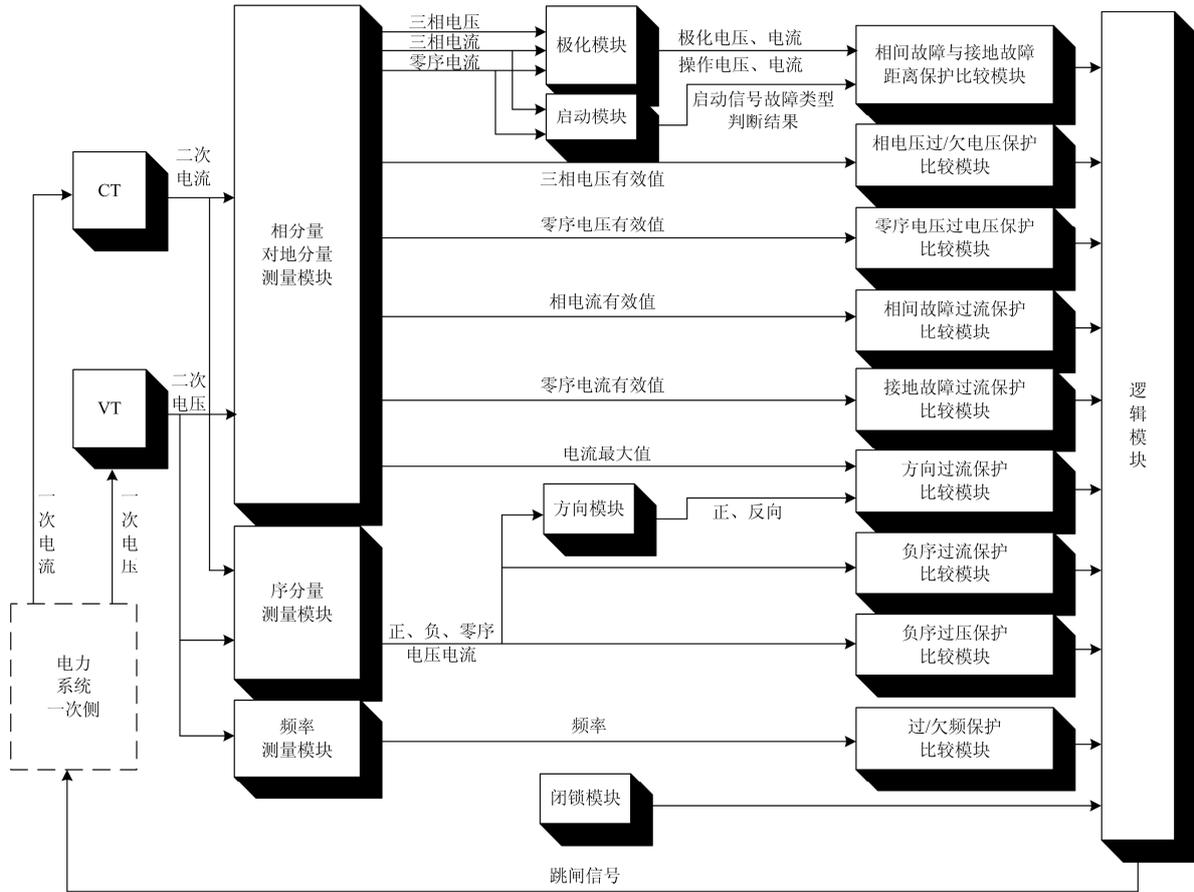


图 3 DIgSILENT 继电保护仿真建模架构

Fig. 3 General modelling simulation structure of relay protection in DIgSILENT

测量功能块用来模拟将 CT 和 VT 测得的二次电压和电流的实部和虚部分量处理后其他保护功能块使用的量,包括各相电流与电压的 RMS 值及电压与电流的正、负序分量等。

极化功能块的作用是为距离保护模块提供极化电流和电压信号。输入、输出分量信号的计算取决于功能模块的配置以及选择的极化方法。

启动功能块作为检测故障状况的手段专用于距离继电器。在监测到故障发生时,通过发送启动信号给距离功能块,开始相应功能块的比较功能。

瞬时过流功能块在测量的电流超过设定的启动

电流大小时发出信号。同时,该单元也支持延时和定向功能。时间过电流功能块在测量电流超过特性曲线确定的启动电流大小时进行保护,可以通过改变启动电流或延时的大小,改变继电器特性曲线。

距离导纳功能块使用导纳特性是基于阻抗保护的傳統方法。多边形距离功能块用来模拟多数现代数字距离保护继电器支持的多边形特性,以防止电阻故障。定时功能块可使距离模块的跳闸信号延时发往逻辑功能块。

逻辑功能块结合其他功能块的内部跳闸信号,将其他功能块的信号进行逻辑组合生成总的输出信

号, 决定断路器是否跳闸。

3 继电保护仿真实例

3.1 过流保护仿真

如图 4 所示, 过流保护仿真网络采用 6 kV 配电网, 节点间线路长度分别为 5 km、1.5 km、1.5 km。经容量为 10 MVA 的变压器, 连接到 0.4 kV 的低压配电网。在如图所示的三个位置添加继电器。通过反时限过继电器的通用数学模型, 确定特性方程为

$$t = \frac{0.14K}{M^{0.02} - 1} \quad (3)$$

式中: K 为时间整定系数; $M=I/I_{op}$, I_{op} 为启动电流, I 为流过继电器的短路电流^[13]。

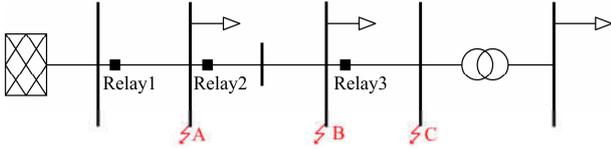


图 4 过流保护仿真网络结构

Fig. 4 Simulation network of overcurrent protection

该例中选用的继电器模型, 其继电器建模架构如图 5 所示, 继电器功能插槽由瞬时过流功能块与时间过电流功能块组成。CT 测得电流瞬时值, 转换成三相电流与零序电流的实部与虚部后传输给测量模块, 测量模块得到三相电流与零序电流的 RMS 值分别提供给相应继电功能模块。上方四个分别为三段反时限过流功能块与一个定时限功能块, 下方的三个为接地故障的两段反时限过流功能块和一个定时限过流功能块。各功能块对信号进行比较后将跳闸信号发往逻辑模块, 最后由逻辑模块确定断路器的开断。

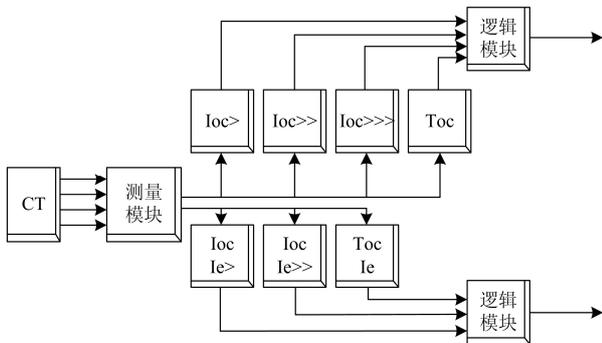


图 5 过流继电器建模架构

Fig. 5 Modelling structure of overcurrent relays

各保护继电器的启动电流均按照躲开被保护元件上最大的负荷电流来整定, 为满足保护的选择性要求, 只有依靠各保护装置带有的不同时限来满足, 其动作时限应该逐级配合整定。

首先从距离电源最远的保护开始, 其启动电流按式(4)整定为 $I_{op,1}$, 其动作时间为 t_1 。

$$I_{op} = \frac{K_{rel} K_{ss}}{K_{re}} I_{L,max} \quad (4)$$

式中: K_{rel} 为可靠系数, 一般采用 1.15~1.25; K_{ss} 为自启动系数, 数值大于 1, 应由网络具体接线和负荷性质确定; K_{re} 为电流继电器的返回系数, 一般采用 0.85~0.95; $I_{L,max}$ 为最大负荷电流。

随后, 按照距离电源的远近依次整定后续继电器的启动电流, 后续继电器的动作时限需比上一继电器动作特性高出一个时间阶梯 Δt , 即 $t_2 = t_1 + \Delta t$ 。

整定后的特性曲线如图 6 所示, 以 C 点发生单相短路为例, 短路电流为 3.509 kA, 整定后三个继电器的动作时限分别为 0.235 s、0.456 s 和 0.968 s。因此, Relay3 首先动作, Relay1 与 Relay2 不动作。

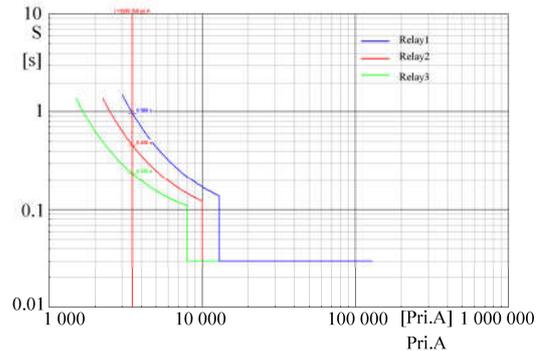


图 6 过流继电器动作特性曲线

Fig. 6 Characteristic curve of overcurrent relays action

利用 RMS 仿真功能, 可直接在网络图中的不同位置定义不同事件。在图 4 仿真网络的 C、B、A 点分别在 0.5 s、1 s 和 1.5 s 设置了单相短路事件, 进行 2 s 的仿真, 仿真结果如图 7 所示。在故障发

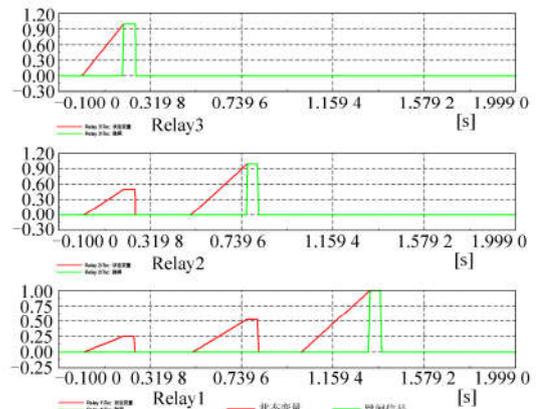


图 7 仿真中的继电器状态变量及跳闸信号

Fig. 7 State variable and trip signal of relay when simulating

生时, 继电器状态变量根据设定的不同时限逐渐升高, 相关继电器在输出信号跳闸后, 前端继电器状态变量清零。根据事件框输出, Relay3、Relay2、Relay1 所对应的断路器分别在 0.70 s、1.27 s、1.83 s 断开。与依照标准反时限特性计算得到的 0.20 s、0.27 s、0.33 s 跳闸时间一致, 符合保护的要求^[14]。

3.2 距离保护仿真

图 8 为距离保护仿真的网络^[15], 在图中所示的位置, 分别安装欧姆继电器 Relay1、Relay2。该继电器建模架构如图 9 所示, 由 CT/VT 测得三相电压电流瞬时值, 经测量模块转换后将数据分别传输给极化模块与启动模块。启动模块检测到故障发生后, 发送信号开始进行距离功能模块的比较工作。上下三块分别为相间故障和接地故障的三段距离功能模块, 二段与三段保护检测到故障后分别经设定的定时器延时后传送信号给逻辑单元。最后, 由逻辑单元控制断路器的开断。

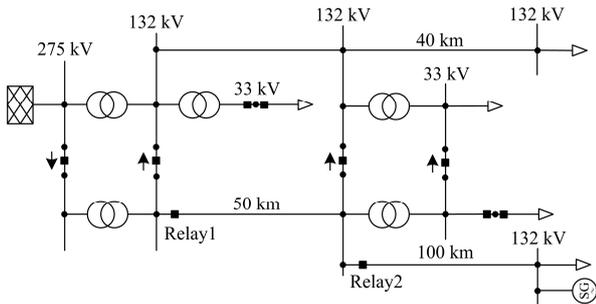


图 8 距离保护仿真网络结构

Fig. 8 Simulation network structure of distance protection

Relay1 极化模块残余补偿系数 k_0 可由软件自动计算并显示为 0.48。启动模块通过完整法计算线路末端三相和接地故障电流分别为 600 A 和 410 A。因而过流设定值 $I >>$ 定为 1 sec.A, 接地故障检测电流设定值 $3 \times I_0$ 定为 0.6 sec.A。

对于距离继电器的三段式保护, 一段保护要求覆盖线路全长的 80%, 二段保护要求覆盖线路全长的 120%或覆盖相邻线路的 50%。三段保护范围要求覆盖继电器安装线路与相邻最大线路阻抗的 120%, 考虑到平行线路故障的助增效应, 因此设定的阻抗参数为两倍。

如图 9 所示的几段线路长度分别为 50 km、40 km、100 km。线路每千米单位阻抗为 10.981 sec. Ω 。计算得 Relay1 三段相间距离保护参数分别为 8.78 sec. Ω , 15.37 sec. Ω , 65.89 sec. Ω 。二段与三段保护的延时 Δt 取 0.3 s, 两定时器分别设置为 0.3 s 和 0.6 s。接地故障范围整定可由残余补偿系数 k_0 来调整相间故障范围整定值获得, 并且可以运用到

所有段中, 在仿真中设定与相间故障保护定值相同。

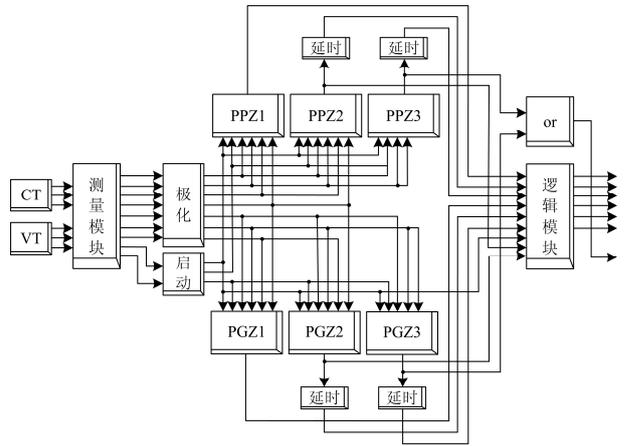


图 9 距离继电器建模架构

Fig. 9 Modelling structure of distance relays

相似的设置 Relay2 的参数, 最终得到两继电器的阻抗特性如图 10 所示。通过 RMS 仿真事件的设定, 结果显示继电器在故障发生时可相互配合^[15]。

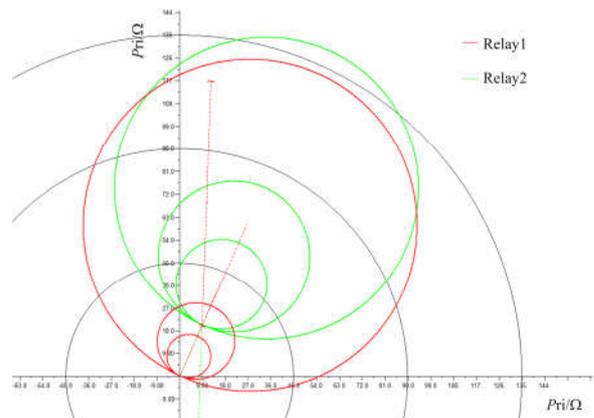


图 10 距离继电器阻抗特性图

Fig. 10 Impedance characteristic diagram of distance relays

4 结论

DigSILENT PowerFactory 软件图模一体化的特点、虚拟仪表的大量应用以及丰富的电气元器件模型为电力系统的研究和学习带来了极大的便利, 然而目前利用该软件的研究仅集中在风机、太阳能和储能等新能源领域。本文介绍了利用该软件进行继电保护仿真的一般步骤及建模原理, 并以过流和距离保护为例介绍了继电器的设置及参数整定等, 展示了其在继电保护领域的先进性。其具备的精细化模型可更好地模拟实际故障状况下的电力系统运行状态, 给继电保护仿真提供更多、更接近实际情况的数据。目前利用该软件可进行过流保护、距离保护与差动保护等继电保护的研究, 电动机保护等尚

不支持,用户可通过自定义保护模块的方法去探索。学习和借鉴 DIgSILENT 中的模型与优点,对于促进电力系统研究和运行规划具有重要意义。

参考文献

- [1] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 121-127. DOI: 10.1186/s41601-016-0025-x.
- [2] 罗建民, 戚光宇, 何正文, 等. 电力系统实时仿真技术研究综述[J]. 继电器, 2006, 34(18): 79-86.
LUO Jianmin, QI Guangyu, HE Zhengwen, et al. Research on power system real-time simulation[J]. Relay, 2006, 34(18): 79-86.
- [3] 孙元章, 杨军, 张晓东, 等. 电力系统动态仿真中的继电保护模型[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(20): 47-51.
SUN Yuanzhuang, YANG Jun, ZHANG Xiaodong, et al. Protection model for dynamic simulation of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(20): 47-51.
- [4] 吴国暘, 宋新立, 汤涌, 等. 电力系统动态仿真中的继电保护建模[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(23): 64-70.
WU Guoyang, SONG Xinli, TANG Yong, et al. Protection relay modeling for dynamic simulation of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(23): 64-70.
- [5] 袁欣. PSCAD/EMTDC 与 Matlab 接口技术在继电保护仿真中的运用[J]. 电力学报, 2010, 25(3): 214-217.
YUAN Xin. Application of the interface technique between PSCAD/EMTDC and Matlab in power system simulation[J]. Journal of Electric Power, 2010, 25(3): 214-217.
- [6] 吕涛, 韩祯祥. 电力系统仿真软件 DIgSILENT 介绍[J]. 华东电力, 2004, 32(12): 37-41.
LÜ Tao, HAN Zhenxiang. Introduction of power system simulation software DIgSILENT[J]. East China Electric Power, 2004, 32(12): 37-41.
- [7] 张晓平, 郑文杰, 陈辉, 等. 基于 DIgSILENT 的风电储能系统建模与仿真[J]. 可再生能源, 2015, 33(1): 63-67.
ZHANG Xiaoping, ZHENG Wenjie, CHEN Hui, et al. Simulation and modeling of wind power storage system based on DIgSILENT[J]. Renewable Energy Resources, 2015, 33(1): 63-67.
- [8] 王以笑, 张新昌, 路进升, 等. 基于 DIgSILENT 的并网光伏发电系统的建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 49-55.
WANG Yixiao, ZHANG Xinchang, LU Jinsheng, et al. Modeling and simulation of grid connected photovoltaic power generation system based on DIgSILENT[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 49-55.
- [9] 袁天清, 武小梅, 刘国祥, 等. DIgSILENT 与 MATLAB 接口的仿真建模[J]. 广东电力, 2014, 27(3): 49-52.
YUAN Tianqing, WU Xiaomei, LIU Guoxiang, et al. Simulation modeling for interface between DIgSILENT and MATLAB[J]. Guangdong Electric Power, 2014, 27(3): 49-52.
- [10] 郭煜华, 范春菊. 含大规模电动汽车的配电网保护技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 14-20.
GUO Yuhua, FAN Chunju. Research on relaying technologies of distribution network including mass electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 14-20.
- [11] 黄大为, 潘波. 考虑 DG 接入位置和容量的配电网保护综合改进方案[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 64-70.
HUANG Dawei, PAN Bo. Improved methods of distribution network protection scheme considering connection locations and capacity of DG[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 64-70.
- [12] 周宁, 雷响, 荆晓睿, 等. 一种含高渗透率分布式电源配电网自适应过电流保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 24-31.
ZHOU Ning, LEI Xiang, JING Xiaorui, et al. Adaptive over-current protection scheme for distribution network with high penetration rate of DG[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 24-31.
- [13] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [14] 英国 AREVA 公司. 电网继电保护及自动化应用指南[M]. 林湘宁, 单业才, 薄志谦, 等译. 北京: 科学出版社, 2008.
- [15] DIgSILENT power factory application guide distance protection tutorial DIgSILENT technical documentation[M]. Gomarigen, Germany: DIgSILENT GmbH, 2013.

收稿日期: 2017-05-20; 修回日期: 2017-10-31

作者简介:

张君宇(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为含分布式电源的配电网保护; E-mail: zjunyu3@163.com
林睿(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为含分布式电源的配电网故障特性分析; E-mail: 327621760@qq.com
陶维青(1964—), 男, 硕士, 副教授, 研究方向为电力系统及其自动化。E-mail: twq@csg.com.cn

(编辑 葛艳娜)