

数字仿真技术在继电保护教学中的应用

许明, 高厚磊, 侯梅毅, 梁景芳

(山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 以 Matlab 仿真模型为例介绍了数字仿真技术在继电保护教学中的应用方法。利用 Matlab 动态仿真包 Simulink 以及 Matlab 编程环境对继电保护的几个常见关键问题, 包括中性点不接地系统接地故障、系统振荡、距离保护动作特性、变压器励磁涌流等进行了仿真。仿真和分析结果表明, 数字仿真技术能够形象地反映电力系统的各种工况和继电保护的动态行为特性, 完全可以作为继电保护教学的辅助工具, 与实验环节一起加深学生对于继电保护知识的理解和掌握。

关键词: 数字仿真; Matlab; 继电保护教学

Application of digital simulation technology in relay protection teaching

XU Ming, GAO Hou-lei, HOU Mei-yi, LIANG Jing-fang

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

Abstract: Taking Matlab based simulation models as examples, the application of digital simulation technology in relay protection teaching is introduced. With Simulink Toolboxes and programming environment in Matlab, several key contents for relay protection are simulated, such as ground fault in power system with ungrounded neutral, power system oscillation, operating characteristics of distance protection and transformer inrush current, etc. Simulation results show that digital simulation technology can reflect properly different operating conditions of power system and dynamic behaviours of relay protection. Therefore, this technology can serve as one aided teaching tool to enhance student's understanding of relay protection knowledge.

Key words: digital simulation; Matlab; relay protection teaching

中图分类号: TM743 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2010)15-0104-06

0 引言

继电保护是电力系统安全稳定运行必不可少的组成部分,其任务是在电力系统任一点发生故障时,快速、准确地将故障元件隔离,确保电气设备和电力系统的安全可靠运行,最大限度地减少故障造成的危害和损失。掌握好继电保护的原理和技术,是对各级各类电气工程技术人员的基本要求^[1-4]。

“继电保护”是一门融合了电力系统基础、电力系统故障分析、模拟与数字电子技术、计算机技术和通信技术的交叉学科。其特点是概念抽象、理论复杂、实践环节多、课堂讲授难度大、不便于自学。有限的实验课程难以使学员从理论与实践相结合的角度全面理解、掌握所学内容。

随着计算机技术的迅速发展和各种高级应用软件的出现,利用数字仿真手段改善和提高继电保护

的教学水平是很有意义的。本文利用仿真软件 Matlab,以继电保护课程中的小电流接地系统故障、系统振荡、距离保护动作特性、变压器励磁涌流等问题为例,探讨了将数字仿真技术应用于继电保护教学的方法。

1 Matlab 以及 Simulink 仿真软件包简介

Matlab 是功能强大的科学和工程计算软件,它不但具有以矩阵计算为基础的强大数学计算和分析功能,还具有丰富的可视化图形表现功能和方便的程序设计能力。Matlab 现已广泛应用于自动控制、数字信号处理。图形图像分析、数学计算、通讯工程等诸多领域^[5-7]。

Simulink 是 Matlab 提供的实现动态系统建模和仿真的集成环境,利用其图形化的用户界面,可以方便地完成模型的创建、调试和仿真工作。

除了通用的信号显示和分析库之外, Simulink 为电力系统分析建立了专用库集 Simpowersystems,

该库中包含了常用的电源、线路、开关以及 RLC 元件, 用户可以方便地搭建所需的电力系统模型。结合 Matlab 提供的灵活编程环境, 可以实现各类保护算法。

2 在继电保护教学中的应用

2.1 小电流接地系统单相故障分析

小电流接地系统也称为中性点非直接接地系统, 是我国配电网以及低压电网广泛采用的系统运行方式, 包括中性点不接地、中性点经消弧线圈接地、中性点经电阻接地等情况。这类系统在发生单相接地故障时, 电流、电压的变化情况和中性点直接接地系统有着很大的差别, 是学生容易混淆的知识点。

图 1 是利用 Simulink 建立的一个 10 kV 中性点不接地系统模型, 利用此模型可以对该系统发生单相接地故障时的电流、电压量进行详尽的仿真和分析。

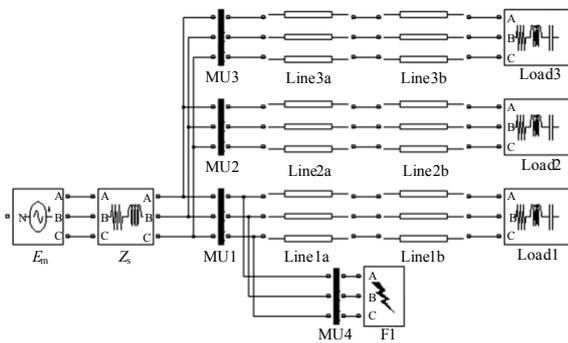


图 1 中性点不接地系统

Fig.1 Power system with ungrounded neutral

仿真时间设为 0.2 s, 在 0.1 s 时线路 1 出口 F1 处发生 A 相金属性接地故障。测量单元 MU4 测得的相电压、线电压、零序电压以及相应的故障后稳态相量图如图 2 所示。故障相 A 相电压为 0, 非故障相相电压变大, 其幅值变为原来的 $\sqrt{3}$ 倍, 与原线电压大小相同; 三个线电压依旧对称; 零序电压幅值与原相电压大小相同。

然后, 观察三条线路零序电流的变化, 电流测量的参考方向均为母线指向线路。测量单元 MU1、MU2、MU3 测得的零序电流 i_{01} 、 i_{02} 、 i_{03} 及其故障后稳态相量图如图 3 所示。非故障线路 (线路 2、3) 的零序电流其数值为本身对地电容电流, 超前于零序电压 90° , 容性无功功率的方向由母线指向线路; 故障线路 (线路 1) 的零序电流, 其数值为系统非故障元件对地电容电流之和, 由相量图可知, 该电流滞后于零序电压 90° , 也可以说其容性无功的方

向是从线路指向母线的。

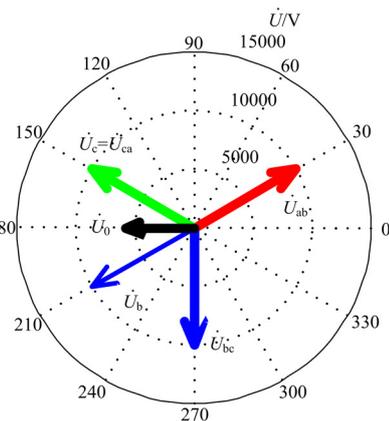
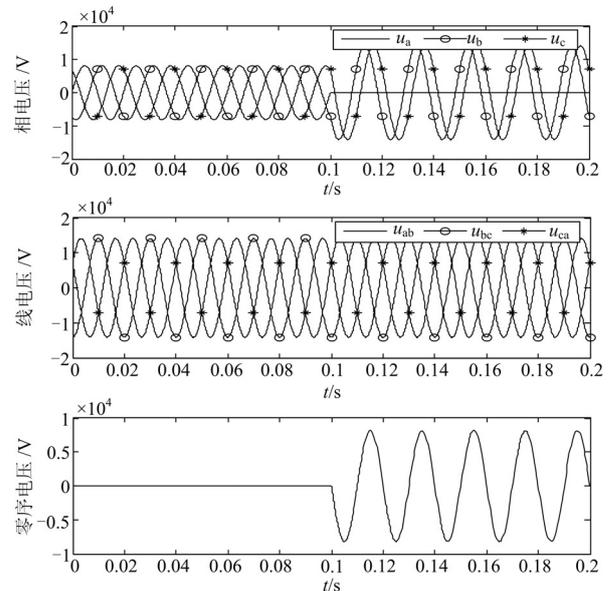
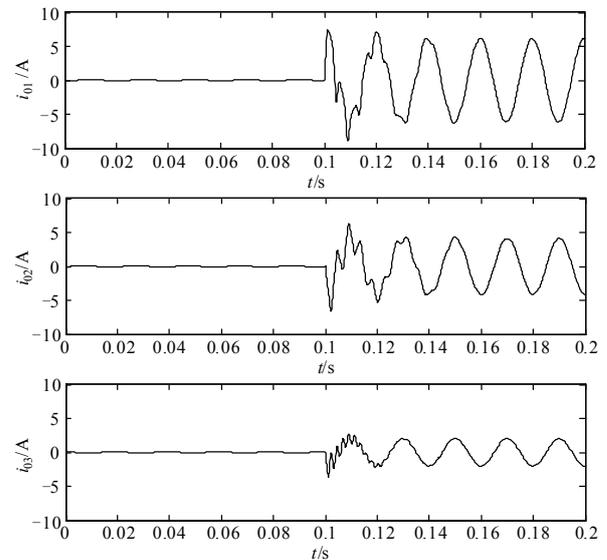


图 2 线路 1 A 相接地短路时的电压变化

Fig.2 Voltage changes for A-G fault on line 1



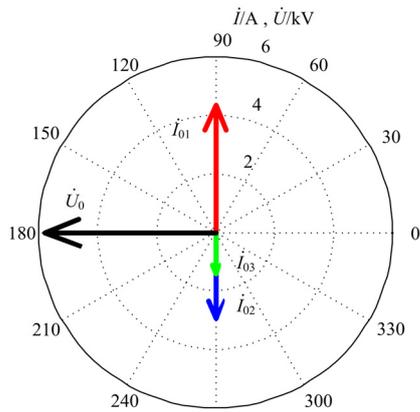


图 3 各线路的零序电流

Fig.3 Zero-sequence currents of different lines

2.2 振荡情况下电气量分析

电力系统静稳、动稳遭到破坏时或者非同期重合闸都会造成电力系统不同程度的振荡。振荡对继电保护装置的正确动作有较大影响，是继电保护教学中的重点也是难点。

教材中对于系统振荡时电流、电压有效值的变化规律进行了详细的理论分析，但并未列出振荡时电流、电压的瞬时变化波形。为此，利用 Simulink 建立了 220 kV 中性点直接接地系统双电源单回线模型，利用该模型可以对中性点直接接地系统的振荡以及各种故障情况进行仿真和分析，如图 4 所示。

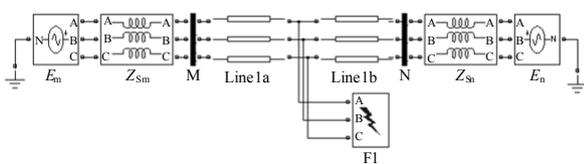


图 4 双侧电源供电系统振荡仿真模型

Fig.4 Oscillation model based on two-supply system

设置电源 E_m 频率为 52 Hz，电源 E_n 频率恒为 50 Hz，即可对电力系统的振荡情况进行仿真。此时，M 侧母线测得的电压、电流以及零序电流如图 5 所示。由图 5 可知，系统振荡时，电流、电压在包络线的范围内变化，包络线的频率即是两侧电源的频率差；振荡情况下三相电压和电流的幅值及相位都在发生变化，电压最大值时刻对应电流最小值时刻，反之亦然；振荡无故障时，无零序电流出现。这些物理现象可以有效地帮助学生理解振荡的概念及电气量的变化特征。

对故障设置元件 F1 进行设定，即可对振荡中发生故障的情况进行仿真。设置系统在 0.1 s 时，距离 M 母线 40 km 处发生 A 相金属性接地故障，M

侧母线测得的电压、电流以及零序电流如图 6 所示。由图 6 可知，故障相的电气量由振荡分量和故障分量叠加而成，电压幅值减小，电流幅值增大；非故障相电气量则持续振荡；系统中出现零序电流。因为故障前后系统始终处于振荡状态，因此，故障相电压与电流的故障分量也具有明显的振荡特征，这点可以由零序电流的波形看出。

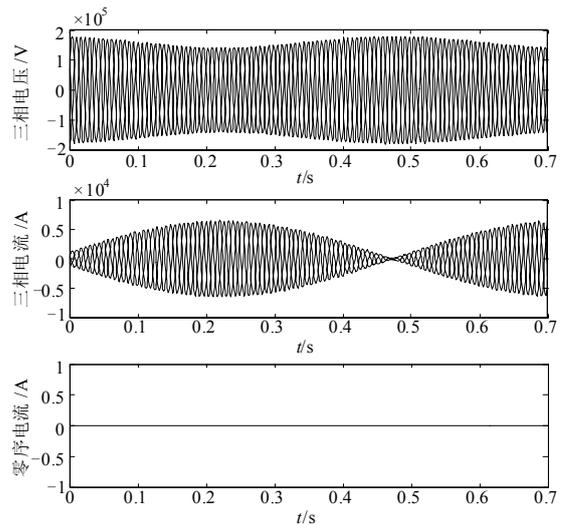


图 5 系统振荡时的电压电流波形

Fig.5 Voltage and current waveforms during oscillation

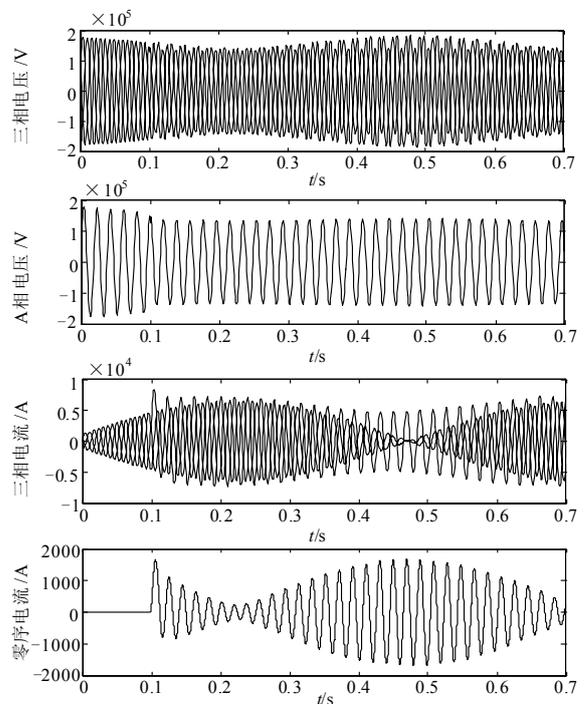


图 6 振荡中发生故障时的电流及电压波形

Fig.6 Voltage and current waveforms during oscillation with fault

以上对振荡和振荡伴随短路情况的仿真, 既与理论分析吻合, 又具有直观的感性认识作用, 因此可以有效地帮助学生正确理解振荡的概念及电气量的变化特征, 从而有利于分析和掌握振荡对保护动作行为的影响。

2.3 距离保护动作行为分析

距离保护通过计算电压与电流的比值, 反映故障点到保护安装处的距离而工作。距离保护不受系统运行方式的影响, 具有很好的灵敏性和快速性, 因此成为高压、超高压线路的主要保护方式之一。

各高校为了使学生更好地掌握这部分内容, 往往安排保护实验课程。但是, 通过做实验只能观察到保护最终的动作情况, 至于保护装置内部的动作过程则无法进行观测和研究, 在特定情况下出现的保护故障, 也不能进行原理上的分析。数字仿真技术刚好可以弥补这一不足。

从图4的双电源单回线系统M母线采集电压和电流信息(不考虑互感器的传变特性), 利用Matlab语言编程可以建立接地距离和相间距离保护模型, 以A相接地距离和AB相相间距离保护为例, 其构成框图如图7和图8所示。其中, k 为零序电流补偿系数, Z_{set} 为整定阻抗。

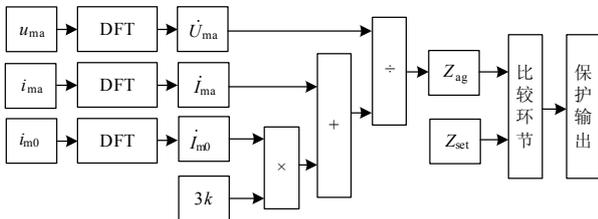


图7 接地距离保护建模框图

Fig.7 Modeling block diagram of distance protection for ground faults

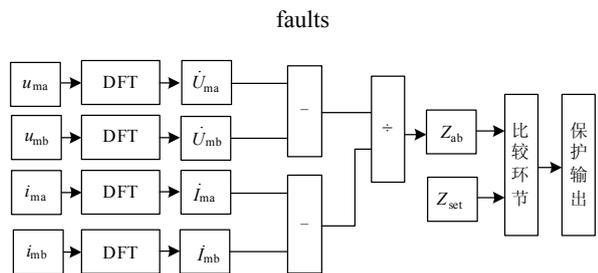


图8 相间距离保护建模框图

Fig.8 Modeling block diagram of distance protection for phase to phase faults

利用图4所示的双电源单回线模型和本节介绍的距离保护模型, 可以对系统发生各类故障(包括振荡)情况下距离保护的動作行为进行仿真。线路总长设为100 km, 距离保护的保護范围整定为线路全长的80%。

设置距离M母线40 km处, 0.02 s发生A相接地故障, 接地电阻为1 Ω。M侧母线测得的电压、电流、零序电流、距离保护的判断结果以及测量阻抗轨迹, 如图9所示。这是典型的区内故障, 距离保护在发生故障后10 ms正确动作。

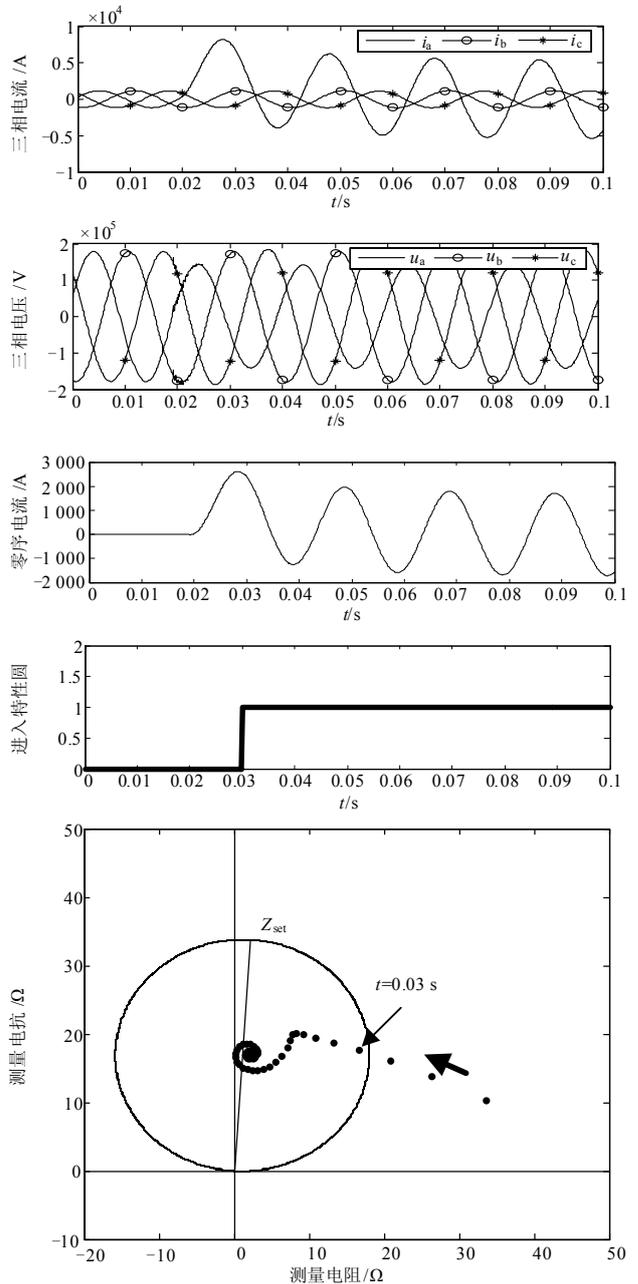


图9 区内A-G故障时距离保护的动态响应过程

Fig.9 Dynamic response process of distance protection to internal A-G fault

设置系统发生振荡, 振荡中心在线路内部, 振荡周期为0.5 s。其对应的电压、电流以及测量阻抗轨迹, 如图10所示。由图可见, 系统振荡情况下, 当两侧摆角在0°~360°变化时, 测量阻抗轨迹将会由

远及近穿过保护区；当保护的延时小于测量阻抗穿越保护区的时间时，就会出现误动现象。因此必须采取措施对距离保护加以闭锁，防止其误动。

除此之外，距离保护还会受到过渡电阻、算法、故障起始时刻等诸多因素的影响，均可利用数字仿真进行分析^[8]。

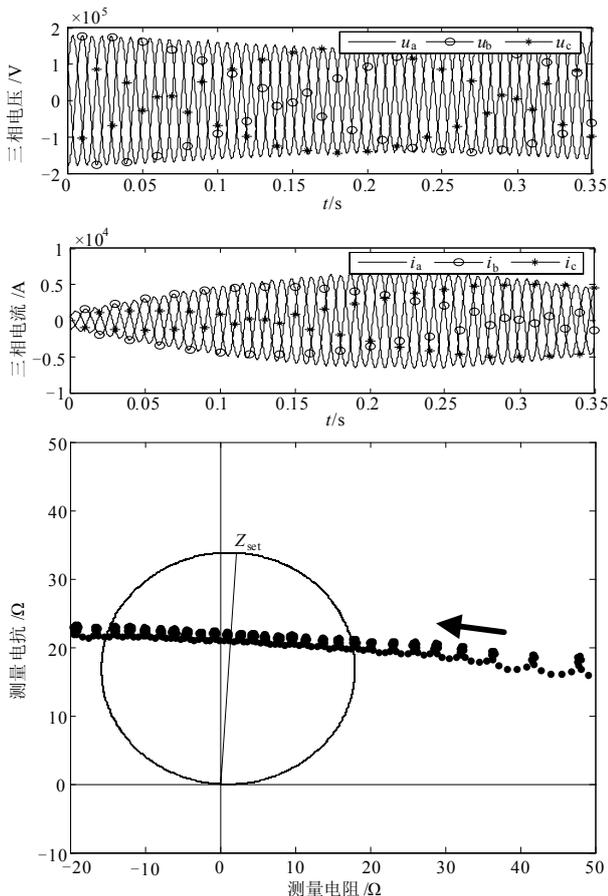


图 10 振荡时距离保护的动态响应过程

Fig.10 Dynamic result of distance protection responding to oscillation

2.4 变压器励磁涌流仿真

变压器通常采用瓦斯保护和电流纵差保护作为主保护，其中纵差保护是继电保护教学中的重点内容之一，而在纵差保护中，教学的难点正是励磁涌流问题。

变压器的励磁电流只流过变压器的某一侧，在其正常运行时，该电流很小，一般不超过额定电流的 2%~10%；在外部故障时，电压很低，励磁电流更小。因此，在这两种情况下，励磁电流对变压器纵差保护的影响很小。

但是，当变压器空载投入或者外部故障切除后电压恢复时，铁心易发生饱和，此时绕组中会出现

数值很大的励磁电流，这种励磁电流称为励磁涌流。

为了配合教学，利用 Simulink 建立了励磁涌流仿真模型^[9]，如图 11 所示。利用该模型可以对不同电压相角情况的空载投入进行仿真。另外，故障设置元件 F1 可用于仿真外部故障切除，电压恢复时励磁涌流的情况。

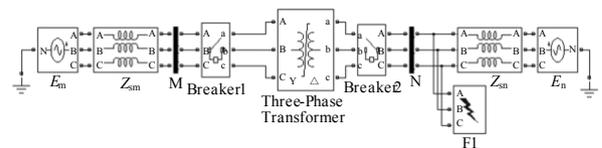


图 11 变压器励磁涌流仿真模型

Fig.11 Simulation model of transformer inrush current

以电压相角 0°时空载投入为例来说明仿真过程。初始时刻，开关 breaker1 和 breaker2 打开，在 0.1 s 时将开关 breaker1 闭合，即可仿真变压器空载投入时励磁涌流的情况。M 处测得的 A 相电流以及 A 相电流中的二次谐波分量的幅值变化如图 12 所示。

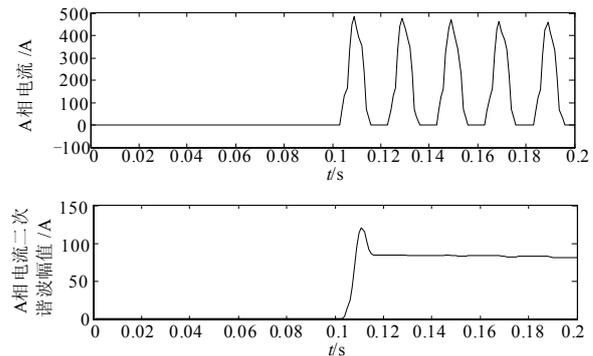


图 12 励磁涌流波形及其二次谐波幅值

Fig.12 Waveforms of inrush current and its secondary harmonic

由图可见，励磁涌流中含有大量的非周期分量，使涌流波形偏向时间轴的一侧并出现间断角；同时励磁涌流中含有大量的二次谐波分量。仿真结果与理论分析结果相一致。变压器励磁涌流的仿真，可以帮助学生理解和掌握涌流产生的原因、特征及影响其大小的因素，为下一步学习励磁涌流的识别方法打下基础。

3 结论

本文应用 Matlab 仿真软件讨论了数字仿真技术在继电保护教学中的应用。利用 Matlab 动态仿真包 Simulink 以及 Matlab 编程环境对继电保护的几个关键问题，包括中性点不接地系统接地故障、系统振荡、距离保护动作特性、变压器励磁涌流等进行了仿真。仿真和分析过程表明，数字仿真技术能够

形象地反映电力系统的各种工况和继电保护的动态行为特性,完全可以作为继电保护课程的辅助教学工具,加深学生对于继电保护知识的理解和掌握。然而,继电保护是一门涉及多个领域的交叉学科,其包含内容多而复杂,仅仅运用仿真软件(如 Matlab、EMTP、EMTDC等)提供的既有模型往往不能满足要求,需要在理论研究的基础上,开发出更多更适用于继电保护研究和学习的仿真模型。

参考文献

- [1] 贺家李,宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 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.
- [3] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- [4] 许正亚. 输电线路新型距离保护[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
- [5] 李海涛,邓樱. Matlab 程序设计教程[M]. 北京: 高等教育出版社.
- [6] Matlab 6.1, reference manual[S]. Math Works, Inc. 2001.
- [7] Simulink 4.1, reference manual[S]. Math Works, Inc. 2001.

- [8] XU Ming, GAO Hou-lei, YAN Chao. Matlab/simulink based dynamic simulation system for distance protection[J]. Transactions of Tianjin University, 2008, 14 (2): 112-117.
- [9] 刘强,蔡泽祥. 基于MATLAB的变压器差动保护闭环仿真研究[J]. 电力自动化设备, 2007, 27 (9): 31-34. LIU Qiang, CAI Ze-xiang. Study on closed-loop simulation of transformer differential protection based on MATLAB[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27 (9): 31-34.

收稿日期: 2009-09-03; 修回日期: 2009-11-05

作者简介:

许明(1980-),男,博士研究生,主要从事继电保护数字仿真方面的学习和研究; E-mail:xuming@mail.sdu.edu.cn

高厚磊(1963-),男,教授,博士生导师,主要从事继电保护和广域同步测量方面的教学和研究工作; E-mail:houleig@sdu.edu.cn

侯梅毅(1963-),男,博士研究生,副教授,主要从事继电保护方面的教学和研究工作;

(上接第 80 页 continued from page 80)

- [15] Perez-Guerrero R E, Cedeno-Maldonado J R. Differential evolution based economic environmental power dispatch[C]. //Power Symposium, Proceedings of the 37th Annual. North American: 2005:191-197.
- [16] 梁才浩,段献忠,钟志勇,等. 基于差异进化和 PC 集群的并行无功优化[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (1): 29-34. LIANG Cai-hao, DUAN Xian-zhong, Chung C Y, et al. Parallel reactive power optimization based on differential evolution and PC-cluster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (1): 29-34.
- [17] 郑智,周双喜,徐飞,等. 基于多场景和模糊技术的综合无功规划[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (4): 41-45. ZHENG Zhi, ZHOU Shuang-xi, XU Fei, et al. Comprehensive reactive power planning based on multi-scenario and fuzzy technique[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (4): 41-45.
- [18] 鞠平,李靖霞. 配电网模糊优化规划(1)——模型与方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (14): 45-48. JU Ping, LI Jing-xia. Optimized fuzzy planning of distribution power networks: part one——model and methodology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (14): 45-48.
- [19] 曹炳元. 应用模糊数学与系统[M]. 北京: 科学出版社,

2005.

CAO Bing-yuan. Application of fuzzy mathematical and systems[M]. Beijing: Science Press, 2005.

- [20] LIU Bao-ding, LIU Yian-kui. Expected value of fuzzy variable and fuzzy expected value models[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2002, 10 (4): 445-450.
- [21] 牛卫平,刘自发,张建华,等. 基于GIS和微分进化算法的变电站选址及定容[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (18): 86-90. NIU Wei-ping, LIU Zi-fa, ZHANG Jian-hua, et al. Substation locating and sizing in power system based on GIS and differential evolution algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (18): 86-90.
- [22] ZHENG Yong-ling, MA Long-hua, ZHANG Li-yan, et al. Empirical study of particle swarm optimizer with an increasing inertia weight[C].//The 2003 Congress on Evolutionary Computation, CEC. Canberra(Australia): 2003:221-226.

收稿日期: 2009-04-27; 修回日期: 2009-10-30

作者简介:

高付良(1979-),男,助理工程师,长期从事电力生产工作;

张鹏(1979-),男,助理工程师,长期从事继电保护工作; E-mail: zhp531@163.com

赛雪(1979-),女,助理工程师,长期从事电力生产工作。