

基于 MATLAB 的超高压直流输电系统仿真研究

于飞¹, 钟秋海¹, 张望², 刘喜梅³, 张家奇³

(1. 北京理工大学二系, 北京 100081; 2. 许昌继电器研究所, 河南 许昌 461000; 3. 青岛科技大学, 山东 青岛 266042)

摘要: 利用 MATLAB 软件包下的 Simulink 对某高压直流输电系统进行建模, 并在此模型基础上进行了动态仿真, 分析了系统的稳态特性和动态特性, 同时对系统中的几种常见故障进行了仿真。仿真结果与实际现象相同, 为今后对 HVDC 系统进行辨识、控制和故障诊断提供了支持。

关键词: 超高压直流输电系统; MATLAB 软件包; Simulink; 电气系统模块库; 仿真

中图分类号: TM743 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)13-0031-04

0 引言

自从 1954 年世界上第一条工业性的高压直流输电线路投运以来, 随着电力电子技术、计算机技术和控制理论的发展^[1,2], 超高压直流输电系统 (HVDC) 日趋完善。我国的葛洲坝—上海直流输电工程于 1989 年投入运行, 此后又相继投运了天生桥—广州等 HVDC 工程。随着三峡工程的建设, 国家在“十五”期间要建设并投运的 HVDC 工程有 6 项, “十五”后还将建设超过 10 条的超高压直流输电线路。在此背景下, 研究 HVDC 结构、运行原理及控制方法, 正确进行 HVDC 仿真, 进行交、直流潮流计算, 分析系统的稳态、动态特性等, 已显得非常重要。

1 Simulink 仿真环境

MATLAB 软件包下的 Simulink 可以仿真线性或者非线性系统, 并能够构造连续时间或离散时间的系统。它具有良好的用户界面, 只需要从模块库中调用相应的模块进行搭建, 然后修改其参数就可以完成系统的建模。

Simulink 库浏览器中包括^[3]: 信号源模块组 (Sources)、输出池模块组 (Sinks)、连续模块组 (Continuous)、离散模块组 (Discrete)、数学运算模块组 (Math)、非线性模块组 (Nonlinear) 等。另外还有神经网络、模糊控制、电力系统模块。

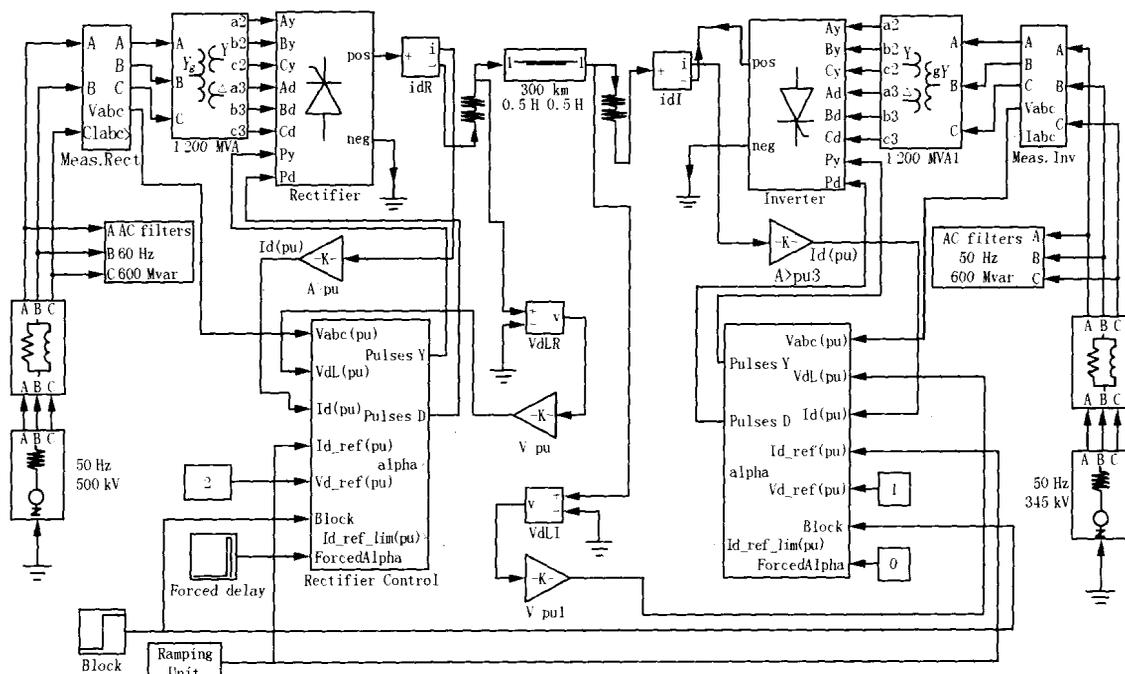


图 1 HVDC 系统模型

Fig. 1 HVDC system model

电力系统模块 (Power System Blockset) 包括: 连接部分 (Connectors), 其中包括各种地及连接线型; 电源 (Electrical Sources), 其中包括交、直流电源; 元件 (Elements), 其中包括 RC 滤波线路、RLC 负载和变压器等; 扩展库 (Extra Library), 其中包括直流电机、控制模块、离散测量、离散控制模块、测量、三相库; 电机 (Machines); 测量 (Measurement), 其中包括电流、电压互感器等; 电力电子 (Power Electronics), 其中包括二极管、晶闸管、IGBT 和通用桥等。只要能够熟练地运用各种元件, 就可以很容易地进行系统建模了。

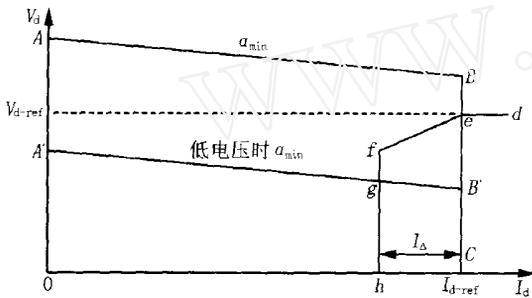


图 2 直流输电系统调节特性

Fig. 2 HVDC regulation characteristic

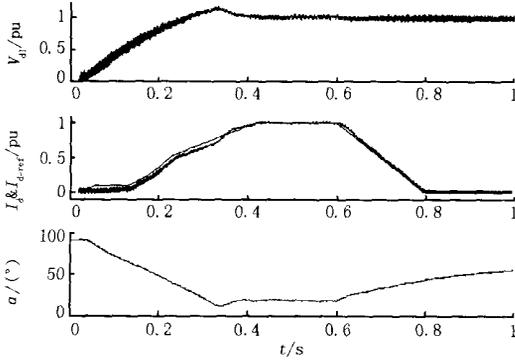


图 3 整流侧仿真结果

Fig. 3 Simulation result in rectifier

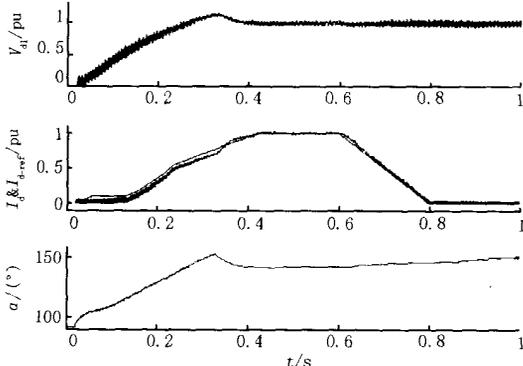


图 4 逆变侧仿真结果

Fig. 4 Simulation result in inverter

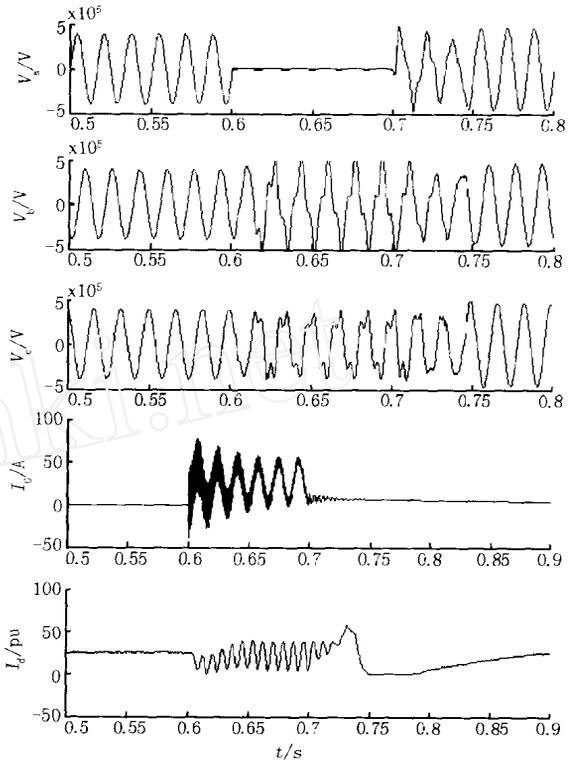


图 5 单相接地故障

Fig. 5 Single-phase-to-ground fault

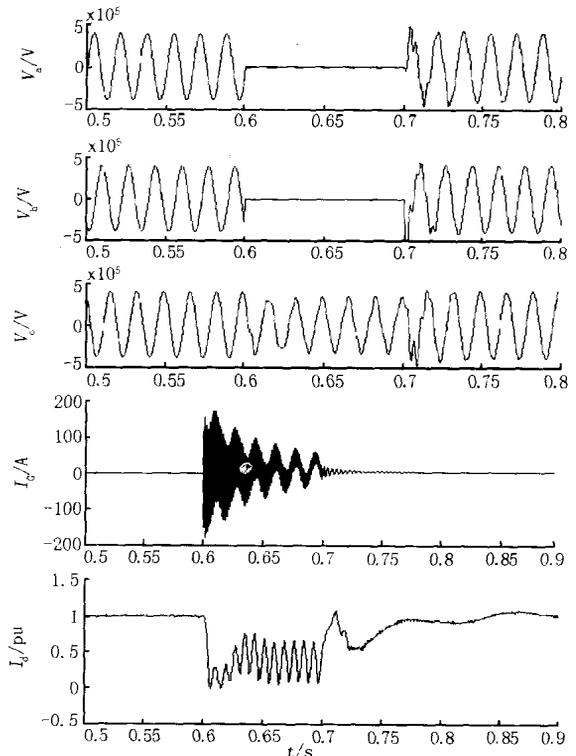


图 6 两相直接接地故障

Fig. 6 Two-phase-to-ground fault

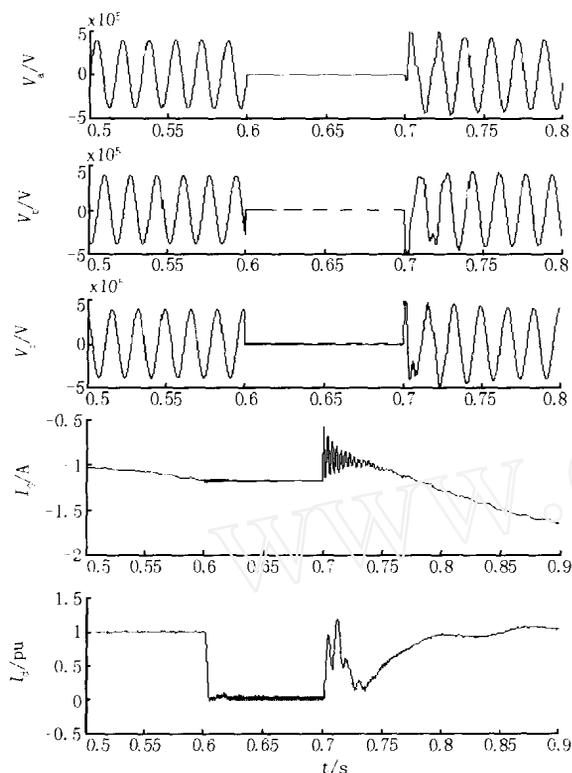


图7 三相直接接地故障

Fig. 7 Three-phase to-ground fault

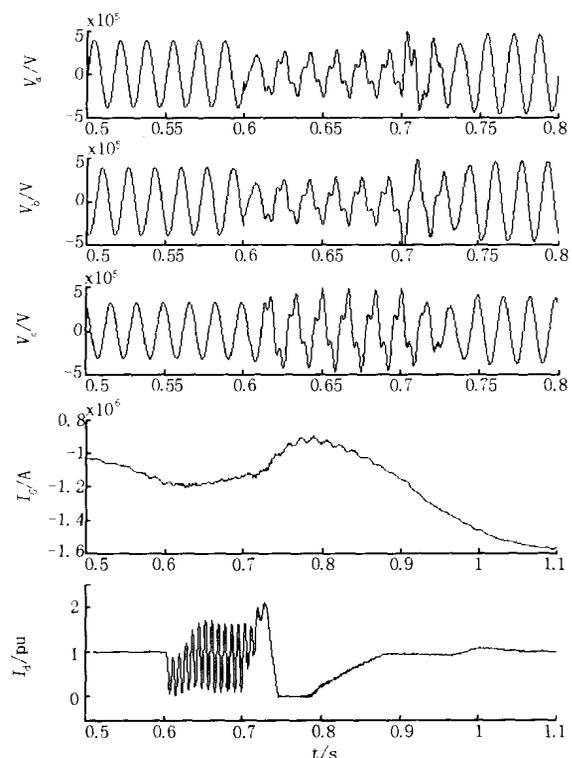


图8 两相直接短路故障

Fig. 8 Two-phase short circuit

2 HVDC 的建模

本文建立了一个单极 12 脉冲的 HVDC 模型,如图 1 所示。通过 1000 MW(500 kV, 2 kA)的直流输电线路 ($R = 0.015 \text{ Ohms/km}$, $L = 0.792 \text{ mH/km}$, $C = 14.4 \text{ nF/km}$), 从一个 500 kV、5000 MVA ($R = 26.07 \text{ Ohms}$, $L = 48.86 \text{ mH}$)、50 Hz 的电力系统向另一个 345 kV、10000 MVA ($R = 6.205 \text{ Ohms}$, $L = 13.96 \text{ mH}$)、50 Hz 的电力系统输送电力。整流桥和逆变桥均由两个通用 6 脉冲桥搭建而成。交流滤波器直接接在交流母线上,它包括 11 次、13 次和更高次谐波等单调支路,总共提供 600 Mvar 的容量。

直流系统调节特性如图 2 所示^[4]。整流侧由定电流特性和定 α_{\min} 特性两段组成,分别对应图中 BC 段和 AB 段, AB 是交流电压降低或者故障时的定 α_{\min} 特性。逆变侧由定电压 de 段、定电流段 fh 和 VDCOL 决定的 $ef3$ 段组成。整流侧和逆变侧都使用 PI 调节器进行控制。正常时,整流侧根据 PI 调节器电流给定 $I_{d\text{-ref}}$ 决定运行电流。逆变侧根据 PI 调节器的电压给定 $V_{d\text{-ref}}$ 控制逆变侧电压恒定,也就是工作在图中的 e 点。当交流侧电压下降或者发生故障时,整流侧工作在最小触发角 α_{\min} 特性,而逆变侧控制线路电流恒定在 $I_{d\text{-ref}} - I$,如图 2 中的 g 点。逆变侧控制电流时比整流侧小 I ,设置这个电流裕度是为了避免两侧定电流特性重叠而引起运行点不稳定。该模型能够实现电流给定值 $I_{d\text{-ref}}$ 随直流电压 V_d 的大小而变化的功能,该功能被称为 VDCOL。依赖于此功能,能够防止电压降低时的换相失败,并有利于电压扰动后直流系统的迅速恢复。

3 HVDC 系统的起停仿真

直流输电系统的起动、停运采用逐渐升压、降压的方式,以避免产生过电压。整流侧、逆变侧起动、停运的仿真结果如图 3、图 4 所示^[5,6]。从图中可知,直流电流 I_d 在 0.4 s 时达到给定值 2 000 A,在 0.6 s 时开始下降,在 0.8 s 时降为 0。

4 HVDC 系统的故障仿真

在这里,本文将对 HVDC 系统中经常出现的 5 种故障类型进行仿真,它们是:单相接地故障、两相直接接地故障、两相直接短路故障、三相直接接地故障和直流线路短路故障。分别如图 5 ~ 图 7 所示,

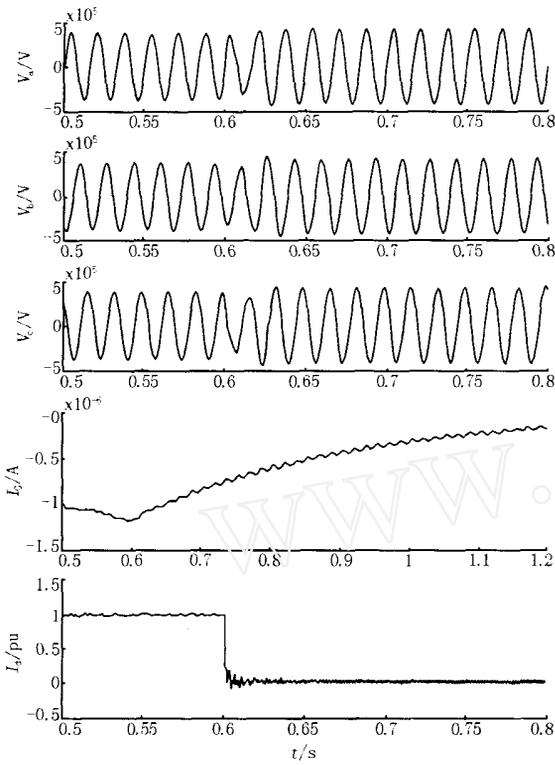


图9 直流线路短路故障

Fig.9 DC line short circuit

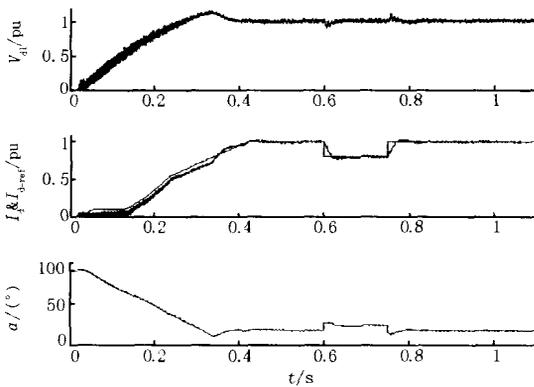


图10 直流输电系统控制响应

Fig.10 HVDC system controlling response

与真实系统的现象相同。由图9可知,对于交流侧三相故障,由于整流器换相电压明显下降,直流系统在VDCOL控制下闭锁,直到故障消除。由图9可知,直流线路短路故障时,由于调节器调节速度较快,定电流调节器能够限制稳态短路电流。因此,在直流线路故障时,能够把故障电流限制在额定电流的10%左右。

通过对这些故障的仿真,可以为下一步进行系统的故障诊断提供有效的数据。

5 结论

通过上面的工作,可以看到:利用MATLAB对HVDC系统进行仿真,其结果是比较理想的。主要问题在于如何建立系统模型,即如何构建一个理想的HVDC系统。只要建模正确,仿真就变得容易了。本文建立的系统控制效果良好。如图10所示,当直流参考电流产生一个阶跃下降时,电流实际值跟随效果好,直流电压只是在上升沿和下降沿产生微小的波动,在PI调节下,触发角增大。综上所述,在MATLAB环境下可以很好地进行HVDC系统的建模与仿真等工作。

参考文献:

- [1] Maharsi Y, Do V Q, Sood V K, et al. HVDC Control System Based on Parallel Digital Signal Processors [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(2).
- [2] Etemadi, Sood V K, Khorasani K, et al. Neural Network Based Fault Diagnosis in an HVDC System [J]. IEEE.
- [3] 简清华,杨高波(JIAN Qing-hua, YANG Gao-bo). 基于Matlab Simulink的仿真方法研究(Simulation Research Based on Matlab Simulink) [J]. 工业仪表与自动化装置 (Industrial Instrumentation & Automation), 2001, (4): 41-43.
- [4] 浙江大学发电教研组直流输电教研组(HVDC & FACTS Group of Zhejiang University Power Generating Department). 直流输电(DC Transmission) [M]. 北京: 电力工业出版社(Beijing: Electric Power Industry Press), 1982.
- [5] 程卫国,冯峰,王雪梅,等(CHENG Wei-guo, FENG Feng, WANG Xue-mei, et al). Matlab5.3 精要编程及高级应用(Extractive Programming and Advanced Applications of Matlab5.3) [M]. 北京:机械工业出版社(Beijing: China Machine Press), 2000.
- [6] 李兴源(LI Xing-yuan). 高压直流输电系统的运行和控制(Operation and Control of HVDC System) [M]. 北京: 科学出版社(Beijing: Science Press), 1998.

收稿日期: 2003-10-22; 修回日期: 2003-12-03

作者简介:

于飞(1961-),男,副教授,博士,研究领域为计算机控制、工业自动化、故障诊断; E-mail: yuffqd@163.com

钟秋海(1944-),男,教授,博士生导师,研究领域为自动控制理论、系统建模与仿真、智能控制;

张望(1951-),男,高级工程师,研究领域为超高压直流输电系统的控制及保护。

(下转第77页 continued on page 77)

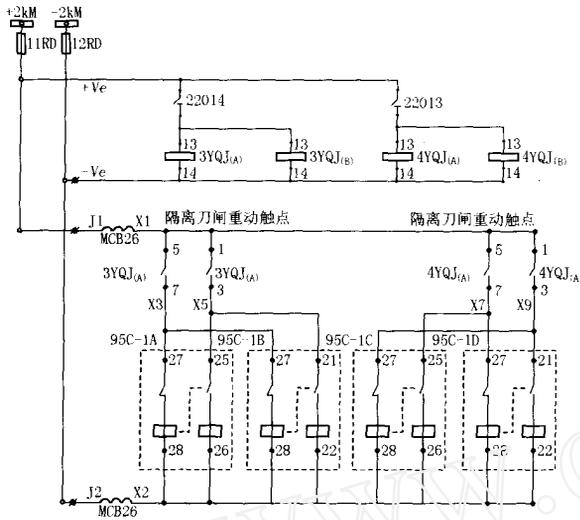


图3 改造后的差动保护电流切换中间继电器回路

Fig. 3 Rebuilt differential protection current switching repeat relay circuits

返回,将差动保护中压侧电流回路瞬时短接,随后 3 YQJ_(A)、(B)、4 YQJ_(A)、(B) 动作才将 95C-1 励磁使回路恢复正常。由于 CT 切换回路在失电复电操作过程中出现继电器 YQJ 与 95C-1“触点竞赛”,有可能引起保护误动作。因此在 11RD、12RD 熔断后,装入保险前,应先人工断开 CT 回路切换直流空气开关 MCB26,保证 95C-1 不能动作,然后才给上 11RD、12RD 保险,使 3 YQJ_(A)、(B)、4 YQJ_(A)、(B) 恢复正常状态,最后才给上 MCB26 开关。按此操作直流电源,才能确保差动保护安全运行。主变第二套差动保护电源的“主差动保护 CT 切换回路”(95C-2A、95C-2B、95C-2C、95C-2D)

Allocation and operation analysis of 500 kV transformer protection in Huizhou substation

L IN Zhī-chao

(Huizhou Power Supply Branch, SVA, Huizhou 516001, China)

Abstract: The characteristic, demand and allocation of 500 kV transformer protection in Huizhou substation are introduced. Performances of each imported protection device of transformer are analyzed. Operation problems of the transformer differential protection current switching circuit are proposed, and the improved measures are also put forward.

Key words: transformer protection; operation performance; improved measure

(上接第 34 页 continued from page 34)

Simulation of a HVDC system based on MATLAB

YU Fei¹, ZHONG Qiu-hai¹, ZHANG Wang³, LIU Xi-mei³, ZHANG Jia-qi³

(1. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Xuchang Relay Research Institute, Xuchang 461000, China;

3. Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China)

Abstract: A simulation model of HVDC system in the Simulink environment is proposed. On this basis, the paper performs the system dynamic simulation and analyzes several kinds of faults. The results of simulation are the same as that of the real system. All this work has done great contribution to the further identification, controlling and fault diagnosis for HVDC system.

Key words: HVDC; MATLAB software package; Simulink; power system blockset; simulation

也改接到 11RD、12RD 上,其问题处理与主变第一套差动保护相同。

4) 在“主变差动保护 CT 切换电源”回路上,装设一个中间继电器,用于监视“主变差动保护 CT 切换电源”,在电源消失时发告警信号。

4 结语

本文对惠州变电站 500 kV 变压器继电保护的配置、装置的原理及运行作了介绍与分析。主变保护既有国产设备又有进口设备。NEI 公司主变保护所用继电器形式多样,从电磁型、整流型、晶体管型、集成电路型到微机型都有,性能也较复杂。只有深入了解保护装置性能,熟悉保护原理,才能做好设备调试、维护工作。

参考文献:

- [1] 王维俭(WANG Wei-jian). 电力系统继电保护基本原理(Basic Principle of Protective Relaying in Electric Power Systems) [M]. 北京:清华大学出版社(Beijing: Tsinghua University Press).
- [2] 贺家李,宋从矩(HE Jia-li, SONG Cong-ju). 电力系统继电保护原理(第三版)(Principle of Protective Relaying in Electric Power Systems, Third Edition) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press), 1994.

收稿日期: 2004-03-08; 修回日期: 2004-04-08

作者简介:

林志超(1972-),男,硕士,工程师,长期从事继电保护研究与运行维护工作。E-mail: lzchz@21cn.com