

基于扩展时间 Petri 网和故障信息网的保护动作分析方法

倪承波

(胜利石油管理局生产管理部, 山东 东营 257000)

摘要: 继电保护动作信息是电网故障后故障诊断和事故分析最重要的依据, 随着继电保护和故障录波信息网的建立, 丰富的录波信息为保护动作分析提供了基础。Petri 网理论具有完善的理论证明依据, 是离散动态系统建模的有效工具。文中提出了一种基于扩展时间 Petri 网 (ETPN) 的继电保护动作过程建模, 综合利用故障信息, 利用 Matlab 进行保护动作行为分析的方法。算例结果表明, 该方法进行保护动作行为分析清晰直观、有效。

关键词: 扩展时间 Petri 网 (ETPN); 故障信息网; 保护动作行为分析

Protection action analysis method based on extended time Petri net and fault information networks

NI Cheng-bo

(Shengli Petroleum Administrative Bureau, Dongying 257000, China)

Abstract: Protection action information is the important evidence for fault diagnosis and accident analysis. Along with the establishment of the information network for protective relaying and fault recorders, the plentiful recorded fault data lay a foundation for protection action analysis. The Petri net is efficient to model DEEDS(discrete event dynamic systems) due to its full-developed theories. The protection action analysis method is proposed, in which the action processes of protection relaying are modeled based on the extended time Petri net (ETPN), the fault information is made good use of, the Matlab is adopted for dynamic simulation. Results of an example demonstrate the protection action analysis method is intuitional and effective.

Key words: extended time Petri net(ETPN); fault information net; protection action analysis

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)14-0033-04

0 引言

近年来, 随着电网规模的不断扩大, 投入电网的各种保护、自动装置、故障录波器等设备越来越多, 当故障或异常发生时, 这些装置记录了大量的数据和信息, 并由通信网络远传至调度中心, 然后由故障信息处理系统分析处理这些故障数据。保护动作行为分析是故障信息处理系统的重要的模块, 是事故分析和故障诊断的前提。当故障或异常发生时, 系统应能正确反映保护装置的动作过程, 因此选择可以综合利用故障信息进行保护动作行为动态分析的方法非常必要。

Petri网^[1]经过近40年的发展, 已成为具有严密数学基础、多抽象层次、多用途的通用网论, 特别适用于离散事件动态建模和仿真^[2], 其图形化的表示形式, 提高了建模结果的可读性。它综合了数据流、控制流和状态转移, 能很自然地描述并发、同

步、资源争用等特性, 而且本身自含执行控制机制, 集规范表示与执行于同一模型。利用Petri网建立继电保护的逻辑功能模型, 清晰直观, 便于在计算机上实现^[2~4]。

针对Petri网模型, 可以利用可达树、可达图和状态方程等方法进行性能分析, 但仿真分析也是一种有效的工具, 特别是在网络规模很大时更是显出不可替代的优越性。Matlab作为一种工程计算方面的大型商业软件, 在计算能力、扩展性、开放性及服务支持上有着明显的优势, 其齐全的软件工具包是一个创建和仿真复杂响应系统和事件驱动系统的工具, 非常适合用来对Petri网进行仿真。

本文在Petri网的基础上, 针对故障仿真中保护装置的动作特点, 运用扩展时间Petri网(ETPN)建立仿真模型, 根据综合故障信息进行故障动态行为分析, 从而根据分析结果得出保护动作行为是否正确。并利用Matlab中的软件包对算例进行仿真测试, 测

试表明,该方法清晰直观、有效。

1 保护模型的扩展Petri网表示

Petri网以图的形式刻画模型系统,可以描述系统中并行、同步、冲突及因果关系。用Petri网表示一个模型系统的组织结构和动态行为时,库所对应系统的状态,变迁描述引发系统状态变化的事件,弧反映了系统状态和事件之间的关系。它本质上是一种特殊的有向图,库所集 P 和变迁集 T 对应于有向图的顶点,流关系 F 对应于有向图的弧^[1]。

时序Petri网是指库所和变迁具有时间性。时间Petri网常用于时间相关系统的建模与分析。继电保护和自动装置模型必须考虑动作实施的逻辑条件和保护的整定值,利用扩展时间Petri网有利于仿真装置的动作逻辑建模。

1.1 ETPN^[1, 5]

定义1 ETPN为6元组: $P, T, F_1, F_2, \theta, M_0$ 。

其中: $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ 为有限的库所集; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ 为有限的变迁集。 $P \cap T = \emptyset$; $P \cup T \neq \emptyset$; $F_1 \subset P \times T \cup T \times P$ (\times 为两集合的笛卡尔乘积运算) 为基本弧集; $F_2 \subset P \times T$ 为禁止弧集,在图上用“ $\rightarrow \circ$ ”表示; $\theta: T \rightarrow N^+$ (N^+ 为非负实数集), 写成 $(\theta(t_1), \theta(t_2), \dots, \theta(t_n))$, $\theta(t_i)$ 表示变迁 t_i 使能后等待发生的时间, 即变迁 t_i 在保持连续 $\theta(t_i)$ 时间的使能状态后发生, 若 $\theta(t_i) = 0$, 表示变迁 t_i 使能后立即发生; $M: P \rightarrow \{-1, 0, 1\}$ 为标识函数 (M_0 为初始标识集), 可写为 $(m(p_1), m(p_2), \dots, m(p_n))$ 为库所 p_i 的标识:

$$m(p_i) = \begin{cases} 1 & p_i \text{ 中有托肯} \\ 0 & p_i \text{ 中无托肯} \\ -1 & \text{不确定} \end{cases}$$

在ETPN中的禁止弧,表示为逻辑取“非”运算;保护装置的整定时间对应于变迁使能后的等待发生时间,即变迁 t_i 必须在保持连续 $\theta(t_i)$ 时间的使能状态后才能发生;库所标识为-1,对应于逻辑电路中的高阻态。

变迁事件的触发导致托肯在系统中的重新分配。对于给定的Petri网 S ,此动态过程可由以下状态变化方程描述:

$$q_s(k+1) = q_s(k) + Cx(k)$$

式中: C 为 $m \times n$ 矩阵,表明Petri网的结构,成为关联矩阵; $q_s(k) = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}^T$,表明时刻 k 各库所的托肯分布; $x(k) = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}^T$,表明变迁的触发状态。

图1为一个简单系统的ETPN表示。(P_1, T) 是一个

禁止弧, (P_2, T) 是一个基本弧, (P_3, T) 是一个基本弧, 只有当 $m(P_1) = 0$, $m(P_2) = 1$, $m(P_3) = 1$ 时, 变迁 T 才能发生, 使 $m(P_4) = 1$ 。

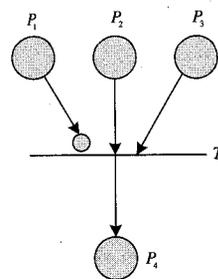


图1 简单系统的ETPN表示

Fig. 1 Expression of simple system using ETPN

1.2 保护模型的ETPN表示简例

一套保护装置包含若干个保护功能, 比如RCS-9615线路距离保护装置保护功能有: 三段相间距离保护、三段相间定时限过流保护等。每个保护功能都可以用一副保护逻辑图表示, 保护逻辑图可以转化为ETPN。图2为RCS-9615距离保护逻辑原理图, 图3为RCS-9615距离保护的ETPN模型图。

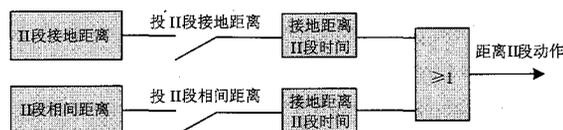
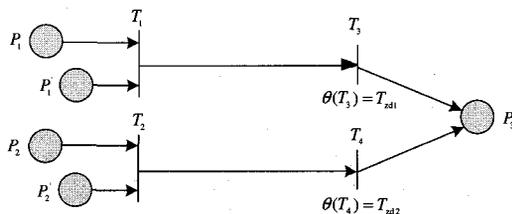


图2 RCS-9615距离II段保护逻辑原理图

Fig.2 Principle diagram of RCS-9615 zone II distance protection logic



注: P_1' 、 P_2' 分别表示II段接地距离、相间距离继电器动作状况; P_1 、 P_2 分别表示II段接地距离、相间距离投入状况; T_{zd1} 、 T_{zd2} 分别表示II段接地距离、相间距离保护时间整定值; P_3 表示距离II段保护动作命令。

图3 RCS-9615距离保护的ETPN

Fig.3 Expression of RCS-9615 zone II distance protection using ETPN

2 基于 Petri 网和故障信息网的保护动作行为分析方法

2.1 故障录波数据处理

录波数据文件由头文件、配置文件和数据文件按

一定的格式组成, 首先按一定的文件标准进行记录数据的读取, 如果录波数据文件与标准格式 (COMTRADE) 存在差异时需进行相关格式转换^[6~8]。

采用录波数据进行保护动作行为分析时, 为使分析使用的分析数据与保护装置中保护软件使用的分析数据尽量一致, 首先要对录波数据进行低通滤波预处理, 滤掉高频噪音, 在分析软件中前置低通滤波器选用数字式二阶RC低通滤波器模拟。采用数字滤波器模拟模拟式滤波器时, 首先确定模拟滤波器的传递函数 $H(s)$, 然后应用变换技术将连续时间域的 $H(s)$ 转换为离散时间域的 $H(z)$, 使二者的幅频特性足够相似^[9~11]。

2.2 保护模型的 ETPN 模型表示

每套保护装置包含若干保护功能, 每种保护功能的原理可用一幅保护逻辑图表示, 然后根据逻辑图建立对应保护功能的 ETPN 模型图。

下面以 RCS-9615 保护装置中的定时限过电流保护功能为例, 定时限过电流保护的動作条件是: 当保护压板投入的情况下, 当三相保护电流 I_a, I_b, I_c 中任意一相大于电流整定值 I_{zd} , 保护经过时间 T_{zd} 后动作。

该保护的 ETPN 模型分为“ A 相过电流继电器状态” (P_1)、“ B 相过电流继电器状态” (P_2)、“ C 相过电流继电器状态” (P_3)、“过电流继电器状态” (P_4)、“保护压板投入状态” (P_5)、“保护动作事件记录” (P_6)、“保护动作跳闸出口” (P_7)、“保护事件告警” (P_8) 等八个库所, 根据保护逻辑功能用即时变迁 (T_1, T_2, T_3, T_5)、不保留延时变迁 (T_4) 将所有库所连接起来, 就可得到定时限过电流保护功能的 ETPN 模型。图 4、图 5 分别表示 RCS-9615 定时限过流保护逻辑原理图及其对应的 ETPN。如 $I_a > I_{zd}$, 则 P_1 的标识为 1, 否则为 0, I_b, I_c 亦然。变迁 T_4 使能后的等待时间为 T_{zd} 。

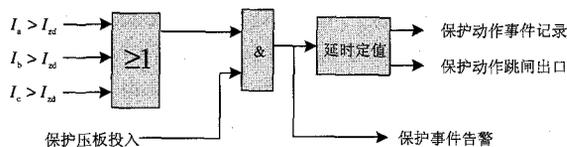


图4 RCS-9615定时限过流保护逻辑原理图

Fig. 4 Principle diagram of RCS-9615

over-current relay

2.3 保护动作仿真分析步骤^[12~14]

任何一套保护装置包含若干个保护功能, 比如线路过流保护装置主要保护功能有: 三段相间定时

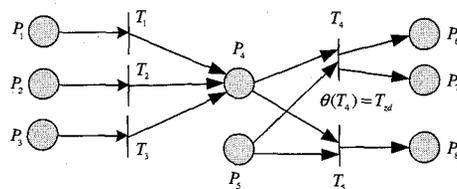


图5 RCS-9615定时限过流保护的ETPN

Fig. 5 Expression of RCS-9615 over-current relay using ETPN

限过流保护、过负荷保护等。每个保护功能都可根据2.2建立相应的ETPN模型, 根据ETPN模型图即可建立Matlab仿真模型^[15], 然后利用故障信息网的故障数据, 即可进行保护动作行为仿真, 仿真分析流程图如图6。

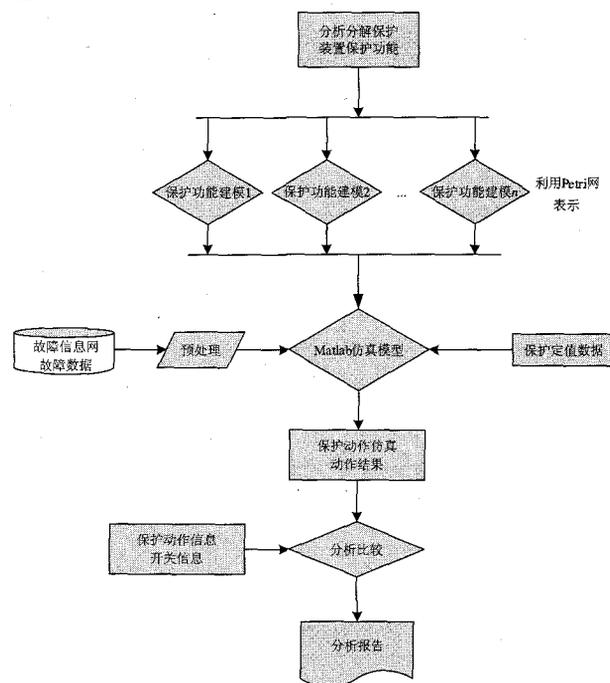


图6 仿真分析流程图

Fig. 6 Flow chart of simulative analysis

3 保护动作行为分析的动态仿真

根据前面建立的定时限过流保护的ETPN模型, 仿真分析故障时保护装置的動作情况。以IEEE 9母线系统为例, 如图7。线路L配置了定时限过流保护, 对该系统进行线路保护整定计算, 确定各保护的定值 ($I_{dz} = 5.0 \text{ A}, T_{dz} = 0.5 \text{ s}$)。建立定时限过流保护的Petri网模型(如图5)。

假设A相短路故障发生在线路L中间, 由故障信息网得到的故障数据进行处理计算, 计算结果如表1。由于保护1DL和保护2DL的動作情况相似, 这里

只给出1DL定时限过流保护的动作为仿真曲线，如图8。

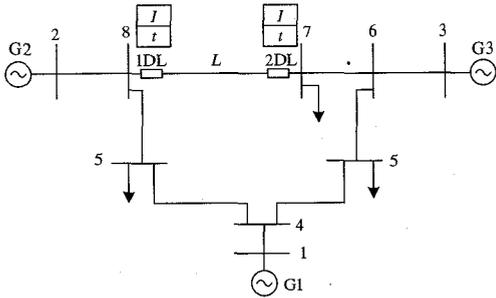


图7 IEEE 9节点系统结构

Fig. 7 Network configuration of IEEE 9-bus system

表 1 线路 L 故障时电流计算结果表

Tab.1 Calculation results of fault current in line L

t	-0.1	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
I_8	1.00	9.71	9.35	9.24	9.45	9.45	9.54	0.00	0.00
I_7	1.01	1.02	1.03	1.02	1.05	1.06	1.05	1.04	1.03
I_5	1.02	1.03	1.04	1.05	1.07	1.02	1.06	1.07	1.08

将各个故障时刻的电流值输入Matlab仿真模型中，进行仿真，即可得到库所 P_4 、 P_6 、 P_7 、 P_8 的曲线图，如图8所示。

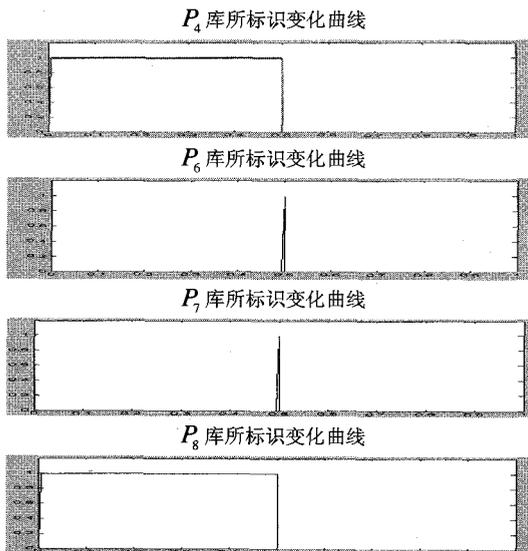


图8 定时限过流保护动作曲线图

Fig. 8 Curve chart of over-current relay

根据图 8 得到的仿真动作结果与从故障信息网上送的保护动作事项比较，可清晰地判断出保护动作是否正确。所有保护功能的 ETPN 的并行运行，可完成主保护和后备保护之间的配合工作。当故障发生时，故障分析结果将分别传给主保护和后备保护对应的 ETPN，初始化输入标识集。若主保护动

作，后备保护的 ETPN 中使能的变迁由于等待时间未到还未发生，但此时故障电流已消失而无发生权，则后备保护不会动作；如果主保护未动作，故障电流一直存在，后备保护的 ETPN 中的变迁保持使能状态，当等待时间都来后变迁发生，则后备保护动作。

4 结论

采用扩展时间 Petri 网表示保护功能原理图，库所对应于仿真对象运行的状态，变迁对应于装置的动作，变迁发生的时间对应于保护动作的整定时间。然后利用故障信息网的故障数据，通过 Matlab 软件工具进行仿真分析保护动作行为。算例结果表明：该方法采用的逻辑建模方法简单有效，分析方法清晰直观、有效。

参考文献

- [1] 袁崇义.Petri网原理[M].北京：电子工业出版社，1998. YUAN Chong-yi. The Theory of Petri Net[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry,1998.
- [2] 赵洪山,米增强,牛东晓,等. 利用混杂系统理论进行电力系统建模的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003,23(1): 20-25. ZHAO Hong-shan, MI Zeng-qiang, NIU Dong-xiao, et al. Power System Modeling Using Hybrid System Theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (1) : 20-25.
- [3] 米增强,赵洪山,王海萍,等. 数字保护继电器的抽象建模方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21) : 51-56. MI Zeng-qiang, ZHAO Hong-shan, WANG Hai-ping, et al. Abstract Modeling Method of Digital Protection Relay [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (21) : 51-56.
- [4] Jenkins L,Khnincha H P. Deterministic and Stochastic Petri Net Models of Protection Schemes[J]. IEEE Trans on Power Delivery,1992,7(1):84-90.
- [5] 王晓东,米增强.基于Petri网技术的继电保护建模研究[J]. 华北电力大学学报, 2004, 31(2):20-23. WANG Xiao-dong, MI Zeng-qiang. Model Research of Protective System Based on Petri Net Theory[J]. Journal of North China Electric Power University, 2004,31(2): 20-23.
- [6] 刘天斌,王永业,柳焕章,等. 基于COMTRADE格式的故障分析管理系统[J]. 继电器,2001,29(11):47-49. LIU Tian-bin,WANG Yong-ye,LIU Huan-zhang,et al. The Fault Data Management & Analysis System Based on Comtrade[J]. Relay,2001,29(11):47-49.
- [7] 郑敏, 黄华林, 吕鹏, 等. 故障录波数据通用分析与管理软件的设计[J]. 电网技术, 2001, 25(2): 75-77.

(下转第41页 continued on page 41)

- Analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999,23(14):13-16.
- [6] 江伟, 王成山. 电力系统输电能力研究中 PV 曲线的求取[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(1):9-12.
JIANG Wei, WANG Cheng-shan. PV Curve Tracing in Power System Transfer Capability Analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(1):9-12.
- [7] Kenji Iba, Hiroshi Suzuki, et al. Calculation of Critical Loading Condition with Nose Curve Using Homotopy Continuation Method[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(2):584-591.
- [8] 祝达康, 程浩忠. 求取电力系统 PV 曲线的改进连续潮流法[J]. 电网技术, 1999, 23(4):91-97.
ZHU Da-kang, CHENG Hao-zhong, A Modified Continuation Power Flow Method for Computing PV Curve of Power System[J]. Power System Technology, 1999,23(4):91-97.
- [9] Chiang H D, Flueck A J, Shan K S, et al. CPFLOW: a Practical Tool for Tracing Power System Steady-state Stationary Behavior Due to Load and Generation Variations[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(2):623-634.
- [10] 赵晋泉, 江晓东, 张伯明. 一种用于静态稳定分析的故障参数化连续潮流模型[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(14):45-49.
ZHAO Jin-quan, JIANG Xiao-dong, ZHANG Bo-ming. A New Contingency Parameterization Continuation Power Flow Model for Steady Stability Analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14):45-49.
- [11] Flueck A J, Dondeti J R. A New Continuation Power Flow Tool for Investigating the Nonlinear Effects of Transmission Branch Parameter Variations[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(1):223-227.

收稿日期: 2007-10-24; 修回日期: 2008-02-22

作者简介:

徐晓春(1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统电压稳定; E-mail:xuxiaochun2659@163.com

万秋兰(1950-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电力系统稳定分析、电力系统仿真和电力市场等方面的研究;

顾伟(1981-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为电力系统稳定控制、电力电子技术、电能质量等。

(上接第 36 页 continued from page 36)

- ZHENG Min, HUANG Hua-lin, Lü Peng, et al. General Analysis and Management Software for Transient Data From Protective Relaying and Fault Recorder[J]. Power System Technology, 2001, 25(2): 75-77.
- [8] 陈佳胜, 曾克娥, 孙扬声, 等. 大型发变组故障录波装置分析软件的研制[J]. 电网技术, 2002, 26(5): 76-79.
CHEN Jia-sheng, ZENG Ke-e, SUN Yang-sheng, et al. Development of Analysis Software of Fault Recorder for High Power Generator Transformerbank[J]. Power System Technology, 2002, 26(5): 76-79.
- [9] 骆健, 丁雨林, 王汉林, 等. 一种新型故障录波系统的实现[J]. 电网技术, 2003, 27(3): 78-82.
LUO Jian, DING Wang-lin, WANG Han-lin, et al. Implementation of a New Kind of Fault Recording System[J]. Power System Technology, 2003, 27(3): 78-82.
- [10] 周亚玲, 张举, 焦彦军, 等. 基于故障录波信息的故障诊断系统[J]. 电网技术, 2001, 25(11): 42-45.
ZHOU Ya-ling, ZHANG Ju, JIAO Yan-jun, et al. Implementation of Intelligent Fault Diagnosis System Based on Fault Recorder Information[J]. Power System Technology, 2001, 25(11): 42-45.
- [11] 何赞峰, 赵冬梅, 高曙, 等. 一种基于故障录波信息的电网故障诊断方法[J]. 电网技术, 2002, 26(5): 39-43.
HE Zan-feng, ZHAO Dong-mei, GAO Shu, et al. A Power System Fault Diagnosis Method Based on Recorder Fault Data[J]. Power System Technology, 2002, 26(5): 39-43.
- [12] 吴彦皎, 王澎, 孙刚. 分析继电保护不正确动作的主要步骤和方法[J]. 电网技术, 2004, 28(20):80-82.
WU Yan-jiao, WANG Peng, SUN Gang. Main Procedures and Method to Analyze Mal-operation of Protective Relaying[J]. Power System Technology, 2004, 28(20):80-82.
- [13] 王钢, 丁茂生, 李晓华, 等. 数字继电保护装置可靠性研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7):47-52.
WANG Gang, DING Mao-sheng, LI Xiao-hua, et al. Reliability Analysis of Digital Protection[J]. Proceedings of the CESS, 2004, 24(7):47-52.
- [14] 贺家李, 郭征, 杨晓军, 等. 继电保护的可靠性与动态性能仿真[J]. 电网技术, 2004, 28(9):18-22.
HE Jia-li, GUO Zheng, YANG Xiao-jun, et al. Reliability and Dynamic Performance Simulation of Protective Relays[J]. Power System Technology, 2004, 28(9):18-22.
- [15] 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.

收稿日期: 2008-04-24; 修回日期: 2008-06-05

作者简介:

倪承波(1966-), 男, 高级工程师, 长期从事电网调度管理和电网管理工作, 主要研究领域是电力系统控制、保护及电力信息技术。E-mail:nicb@slof.com