

# 数字保护继电器的抽象建模方法研究

米增强, 赵洪山, 王海萍, 任惠

(华北电力大学电力系, 河北省保定市 071003)

## ABSTRACT MODELING METHOD OF DIGITAL PROTECTION DELAY

MI Zeng-qiang, ZHAO Hong-shan, WANG Hai-ping, REN Hui

(North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China)

**ABSTRACT:** The digital protection relay is a hybrid system which its inputs are continuous variables and its output is discrete event. The paper proposes a novel abstraction hierarchical GHPN modeling method for digital protection relay, the continuous dynamic layer of GHPN model describes the continuous variable change of relay, and its logic layer, namely Petri nets, describes the logic dynamic behavior of protection relay. This paper builds the GHPN model of the three zones digital distance relay. To consider the nonlinear of input signals, the transient GHPN model of digital distance relay is also built. The results of simulation showed that the GHPN model of digital distance relay is valid, and can describe the inner dynamic behavior of relay in detail and the interaction between the relay and power systems.

**KEY WORDS:** Power system; Protection system; Relay software models; Petri nets; Hybrid dynamics; Simulation

**摘要:** 该文提出了一种新的数字保护继电器抽象广义混杂 Petri 网(GHPN)分层建模方法, 利用 GHPN 模型的连续层描述数字保护继电器连续变量的动态变化, 由其逻辑层(Petri 网)描述保护继电器的逻辑动态行为。文中建立了三段式数字距离保护继电器的 GHPN 模型, 为了考虑影响保护动态行为的信号采集回路的非线性, 建立了距离保护的暂态 GHPN 模型。仿真结果表明, 保护模型 GHPN 是有效的, 通过保护 GHPN 模型, 可以详细地刻画保护内部动态行为以及保护与系统间的相互作用。

**关键词:** 电力系统; 保护系统; 继电器软模型; Petri 网; 混杂动态; 仿真

## 1 引言

进行保护继电器的建模与仿真研究, 有助于理解和揭示系统发生扰动和事故时保护继电器的动态行为, 分析保护的误动和拒动原因, 验证保护新原

理、新算法的有效性, 也有利于厂家在新产品定型之前的测试与仿真研究, 减少开发周期和费用<sup>[1-23]</sup>。保护模型结合暂态仿真数据或现场事故记录数据, 通过仿真, 即可揭示电力系统大停电事故中由保护动作引起的连锁事故发生的机理及电力系统动态演化过程<sup>[24-27]</sup>。文献[28-29]对传统的保护系统建模进行了详细的研究, 采用微分方程和代数方程来描述物理继电器的动态行为。因传统保护模型物理参数的确定较复杂, 且参数具有一定的变化范围, 故所建立的保护模型实用性有较大的限制。利用计算机软件来实现的继电保护模型称为保护软模型<sup>[30-33]</sup>。数字保护继电器软模型建模的难点是保护算法的建模研究, 目前大多数研究者采用 C 语言, FORTRAN 语言等来编制保护算法程序<sup>[33-34]</sup>, 然后将其嵌入到研究环境中进行仿真分析。因此, 保护继电器模型的可读性差, 不易理解, 还存在接口问题。

本文针对上述问题提出了利用 MODELICA 建模语言来实现数字保护继电器软模型的抽象建模广义混杂 Petri 网(GHPN)方法。

## 2 广义混杂 Petri 网

GHPN 模型分为离散逻辑层和连续变量动态层 2 层, 可用一个六元组  $(N, F, I_P, I_T, I_I, I_O)$  来表示<sup>[27]</sup>。其重各元素的定义如下:

(1)  $N$  为 Petri 网, 由四元组  $(M, \Sigma, I, O)$  表示, 用于描述保护系统的逻辑动态行为。其中, 库所  $M = \{m_1, \dots, m_N\}$ , 变迁  $S = \{t_1, \dots, t_M\}$ , 为保护系统逻辑状态模式和事件的集合; 输入弧  $I$  为连接库所与变迁的弧, 表示当前运行模式与将要发生事件间的关系; 输出弧  $O$  为连接变迁与库所的弧, 表示当

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20030079002)。

前发生的事件与下一个系统模式间的关系。

(2)  $l_p(\cdot)$  定义为保护继电器各离散模式的描述。设保护继电器具有  $N$  种运行模式  $F = \{f^{(m_1)}, \dots, f^{(m_N)}\}$ , 其中  $f^{(m_j)}: R^n \rightarrow R^n, j=1, 2, \dots, N$ 。函数  $l_p(\cdot)$  合式公式的表达式为

$$l_p(m_j) \equiv (\dot{x} = f^{(m_j)}) \quad (1)$$

式中  $x \in R^n$ ;  $f^{(m_j)}$  为保护继电器模式  $m_j$  的连续动态系统描述。

(3)  $l_l(\cdot, \cdot)$  定义为保护继电器模式的变迁条件函数。设其变迁条件的集合为  $G = \{g_1, \dots, g_M\}$ , 其中,  $g_i: R^n \rightarrow R^n$ , 为光滑的超平面, 表示保护继电器各模式的切换条件。设  $J(m_j, t)$  为  $\{1, \dots, M\}$  的子集。则函数  $l_l(\cdot, \cdot)$  合式公式的表达式为

$$l_l(m_j, t) \equiv \bigwedge_{i \in J(m_j, t)} (g_i^{m_j}(x(t)) < 0) \quad (2)$$

式中  $i=1, \dots, M$ ;  $M$  为变迁函数个数。

当式(2)合式公式为真时, 变迁触发。

(4)  $l_o(\cdot, \cdot)$  定义为变迁触发后进入下一模式保护继电器连续状态变量的复位条件, 其表达式为

$$l_o(t, m_j) \equiv (r_{m_j+1}^{m_j}(x(t)) = 0) \quad (3)$$

式中  $j=1, 2, \dots, N$ 。

(5)  $l_T(\cdot)$  定义为永真式。图 1 给出了保护起动元件的 GHPN 模型。其中逻辑层用 Petri 网来描述逻辑动态关系; 连续变量层描述其各逻辑状态、逻辑关系及模式变迁条件的定义; 函数  $l_p(\text{Norm})$  和  $l_p(\text{Start Post})$  刻画了电力系统正常运行时保护继电器的动态行为及保护起动元件起动后保护继电器的动态行为;  $l_l(\text{Norm}, \text{Startup})$  描述了起动元件的起动条件; 变迁 Startup 描述了起动元件起动这一事件。

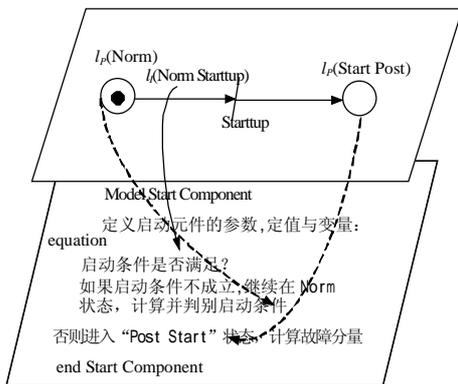


图 1 保护继电器起动元件的 GHPN 模型

Fig.1 The GHPN model of the startup component of relay

### 3 数字距离保护继电器 GHPN 模型

#### 3.1 信号处理模型与算法

电力系统三相电压和电流信号经信号处理后进入故障检测环节, 由保护算法进行计算和判断。若有故障出现, 逻辑输出信号为 1; 否则, 逻辑输出环节为 0。数字保护继电器的构成如图 2 所示。

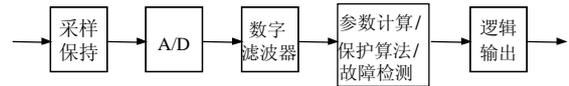


图 2 数字保护继电器构成原理

Fig.2 The structure of digital protection relay

下面给出由 MODELICA 语言<sup>[31]</sup>来实现的信号处理各环节的模型。

(1) 采样/保持器: 采集三相交流电压和三相交流电流信号, 其模型由下面的语句实现:

$V = \text{Pre}(\text{电压信号 } u_t)$

$I = \text{Pre}(\text{电流信号 } i_t)$

when(采样间隔  $T_s$ ) then

$V_S = V$

$I_S = I$

end when;

其中  $\text{Pre}(\cdot)$  为信号保持函数 (注:  $\text{Pre}$  为 MODELICA 语言的采样保持函数名称);  $V, I$  和  $V_S, I_S$  分别为三相电压和电流保持信号及其采样值;  $u_t$  和  $i_t$  分别为三相交流电压和电流的瞬时值;  $T_s$  为采样间隔; when ... end when 为采样函数。

(2) A/D 转换器: 计算机处理的采样值可以直接视为数字信号, 为了对 A/D 转换环节进行模拟, 因此, 可通过一个延时环节来实现 A/D 转换时间。

(3) 数字滤波器: 根据数字滤波器原理不同, 可以构成不同算法的数字滤波器模型。下面给出一个差分数字滤波器的模型:

$$D_u = D_{\text{diff}} F(V_S) \quad (4)$$

$$D_i = D_{\text{diff}} F(I_S) \quad (5)$$

式中  $D_{\text{diff}} F$  为差分数字滤波器函数,  $D_u$  和  $D_i$  为电压和电流数字滤波器的输出。

(4) 全波付氏算法: 本节只给出采用全周傅氏算法进行计算距离保护安装处的电气参数测量阻抗的软模型。傅氏算法公式为

$$X_s = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \sin k \frac{2\pi}{N} \quad (6)$$

$$X_c = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cos k \frac{2\pi}{N} \quad (7)$$

式中  $X_s$  和  $X_c$  分别为电压和电流的实部和虚部。

任一相的电阻  $R$  和电抗  $X$  分别由下式计算

$$R = (U_c I_c + U_s I_s) / (I_c^2 + I_s^2) \quad (8)$$

$$X = (U_s I_c - U_c I_s) / (I_c^2 + I_s^2) \quad (9)$$

利用付氏算法，同样可以算出各相间的测量阻抗。由 MODELICA 语言实现的全波付氏算法为 DFT，计算测量阻抗的函数为  $I_{mpe}$ 。

### 3.2 数字保护继电器 GHPN 模型

为了不同的研究目的，本文将保护继电器的建模方法分为通用 GHPN 模型和详细 GHPN 模型，前者描述保护动态行为的一般共性，而后者除了能更精确地实现实际保护的各种算法及数据处理外，还能描述保护系统的衰减直流分量、谐波分量以及 CT 非线性等动态特性对保护动作行为的影响。下面以 3 段式数字距离保护为例<sup>[35]</sup>来讨论其通用 GHPN 建模方法。距离保护的阻抗继电器采用多边形阻抗特性。通过对 3 段式数字距离保护的功能、动态过程及行为分析，对其动态行为进行抽象，其动态行为可分为 4 种运行模式：系统正常运行模式 Norm、起动元件起动后运行模式 StartPost、振荡运行模式 Oscill 和保护动作后运行模式 OperPost。距离保护继电器的抽象 GHPN 模型的逻辑层如图 3 所示。其中， $V=\{u_a, u_b, u_c\}$ ， $I=\{i_a, i_b, i_c\}$ ，分别为三相瞬时电压和电流输入信号， $Z$  为保护逻辑跳闸信号。图标  $S/H$  为采样保持模型； $D_{diff}$  为数字滤波器模型；DFT 为用于计算各电气参数的付氏算法。

数字距离保护继电器 GHPN 模型各逻辑模式动态以及各模式间变迁条件的定义如表 1 所示。表中括号内的变量表示 GHPN 网的库所和变迁； $I_{OD}$

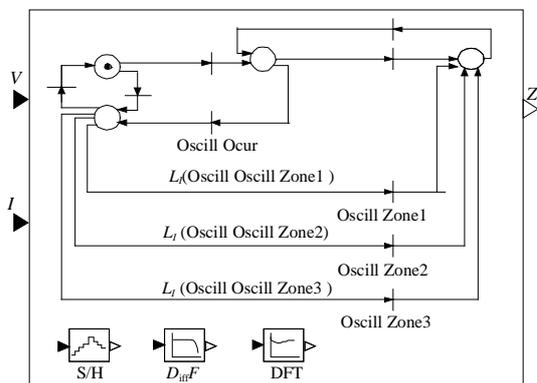


图 3 数字距离保护的 GHPN 模型

Fig. 3 The GHPN model of digital distance delay

为电流突变量定值； $I_{JW}$  为静稳破坏时 A 相电流定值； $Z_I, Z_{II}, Z_{III}$  分别为距离保护 1~3 段的定值； $K_{II}$  和  $K_{III}$  分别为保护 2 段和 3 段重合闸延时标志； $A_{Flag}$  为重合闸标志； $T$  为对应事件发生后的持续时间。

本文利用 MODELICA 模型语言开发了一套保护系统模型库，模型库包括 GHPN 子库、滤波器子库、算法子库、元件子库、保护继电器子库、开关子库及网络元件子库等。用户可利用 MDELICA 模型语言编制保护新算法，并将这些新算法添加到保护模型库中以构成新原理的保护软模型。在该模型库中添加、修改及组合原理不同的各种继电保护是非常容易的，如：通过 PT 和 CT 采集保护系统的输入电压和电流信号，再经过变换器转换成与保护相匹配的信号，进入保护装置，如图 4 所示。利用保护模型库中的元件模型即可将互感器、变换器、

表 1 数字距离保护继电器 GHPN 模型定义  
Tab.1 Definitions of distance relay GHPN model

函数名称	函数定义
$l_p$ (Norm)	1. 采样； 2. 计算电流突变量； 3. 计算 BC 相间阻抗和 A 相电流。
$l_p$ (StartPost)	1. 计算接地和相间阻抗； 2. 计算方向； 3. 选相。
$l_p$ (Osc)	1. 计算接地和相间阻抗； 2. 计算 BC 相间阻抗和 A 相电流； 3. 计算方向。
$l_p$ (OperPost)	1. 判别是否已重合闸； 2. 等待 0.4s 后，去 Start Post 模式。
$l_I$ (Norm, Startup)	$\Delta I_{jj} > I_{OD}?$
$l_I$ (Norm, SStab)	$(\Delta I_{jj} > I_{OD}) \wedge (Z_{BC} \leq Z_{III} \vee I_A > I_{JW})$
$l_I$ (Norm, Zone1)	$(Z_{AN}, Z_{BN}, Z_{CN}, Z_{AB}, Z_{BC}, Z_{CA}) < Z_I \wedge$ (正方向)
$l_I$ (Norm, OscOcur)	$(Z_{AN}, Z_{BN}, Z_{CN}, Z_{AB}, Z_{BC}, Z_{CA}) > Z_I \wedge$ (反方向)
$l_I$ (Norm, OscZone1)	$(Z_{AN}, Z_{BN}, Z_{CN}, Z_{AB}, Z_{BC}, Z_{CA}) \leq Z_I \wedge$ (正方向)
$l_I$ (Norm, Osczone2)	$O_{Flag} = (\text{正方向}) \wedge Z_I < (Z_{AN}, Z_{BN}, Z_{CN}, Z_{AB}, Z_{BC}, Z_{CA}) \leq Z_{II}$ 1. $((O_{Flag}) \wedge (\neg A_{Flag}) \wedge (T > 0.5s))$ 2. $\vee ((O_{Flag}) \wedge (A_{Flag}) \wedge (K_{II}))$ , 重合后瞬加速跳 2 段 3. $\vee (((O_{Flag}) \wedge (A_{Flag}) \wedge (\neg K_{II})) \wedge (T > 0.5s))$ , 重合后正常跳 2 段
$l_I$ (Norm, Osczone3)	1. $Z_{II} < (Z_{AN}, Z_{BN}, Z_{CN}, Z_{AB}, Z_{BC}, Z_{CA}) \wedge (\neg A_{Flag}) \wedge \text{正方向} \wedge (T > 2s)$ 2. $\vee Z_{II} < (Z_{AN}, Z_{BN}, Z_{CN}, Z_{AB}, Z_{BC}, Z_{CA}) \wedge (A_{Flag}) \wedge (K_{III})$ (正方向), 重合后瞬时加速 3 段。 3. $\vee (Z_{II} < (Z_{AN}, Z_{BN}, Z_{CN}, Z_{AB}, Z_{BC}, Z_{CA}) \leq Z_{III}) \wedge (A_{Flag}) \wedge (\neg K_{III}) \wedge \text{正方向} \wedge (T > 1.5s)$ , 重合后延时 1.5s 加速 3 段。
$l_I$ (Norm, SStabRet)	$(Z_{AN}, Z_{BN}, Z_{CN}, Z_{AB}, Z_{BC}, Z_{CA}) > Z_{III} \wedge (I_A < I_{JW}) \wedge (T > 4.5s)$
$l_I$ (Norm, OperRet)	$(A_{Flag}) \wedge (T > 0.8s)$

注：在保护继电器 GHPN 模型中，符号“ $\wedge$ ”、“ $\vee$ ”和“ $\neg$ ”分别表示逻辑算子“与”、逻辑关系“或”和“非”。

滤波器、保护继电器 DRelay、重合继电器 ARD 和断路器 CB 的模型组合在一起，构成一个完整的数字距离保护系统暂态模型。其中，保护继电器、重合继电器和断路器的模型皆为 GHPN 模型。

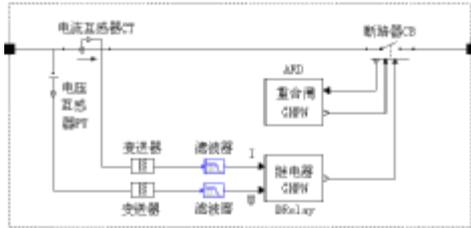


图 4 数字距离保护系统的暂态模型

Fig. 4 The transient GHPN model of distance relay system

### 4 距离保护 GHPN 模型动态仿真

由 MODELICA 建模语言实现的保护系统软模型能方便地将模型中所有的参数、动态变量甚至中间变量通过曲线显示出来。下面给出 2 个仿真算例。

#### (1) 数字保护内部动态仿真

图 5 为一双电源供电输电线路，其两侧母线处安装了考虑距离保护系统模型的断路器。故障发生时对数字三段式距离保护系统的内部动态行为进行仿真：设在 0.05s 时，线路中间发生三相短路故障，15.18ms 后保护动作切除线路。保护 GHPN 模型的仿真曲线如图 6 所示。

#### (2) 数字相间故障动态仿真

保护软模型的配置如图 7 所示，距离保护软模型动作过程与系统的动态仿真情况如图 8 所示。其动作过程为：若故障开始时为单相接地故障，但不在 1 段保护范围内，在振荡闭锁开放后发展成相间故障，此时一般的相间距离保护只能由 3 段切除故障；当由单相接地故障转换成相间故障时，保护软模型立即计算 3 种相间阻抗，若任一相别在 2 段内，且故障距离与开始时单相接地故障距离接近，立即固定 2 段。其仿真过程为：0.1s 时刻，在线路  $L_1$  上距保护  $CB_1$  处 90% 的位置发生 A 相接地故障，故障发生 0.21s 时又发展成为 AB 相间短路瞬时性故障。



图 5 一个简单电力系统

Fig. 5 A simple electric power system

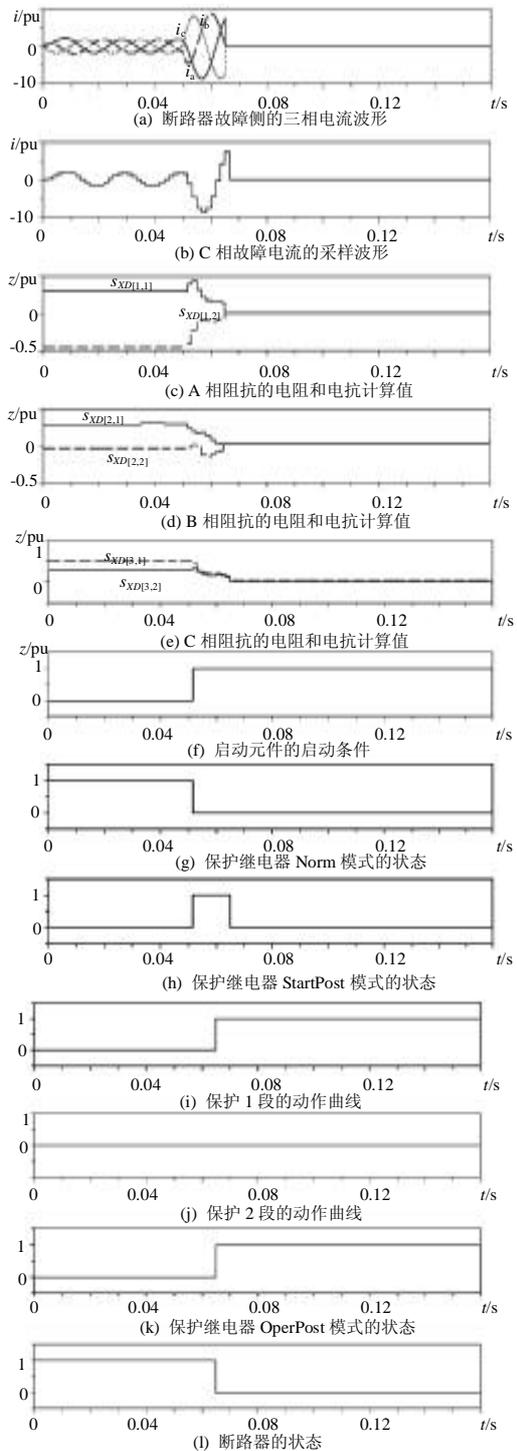


图 6 距离保护内部动态信号波形

Fig. 6 The inner signal curves of digital distance relay

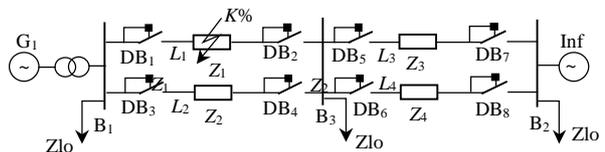


图 7 双机三母线双回输电系统

Fig. 7 Three bus bars double transmission lines system

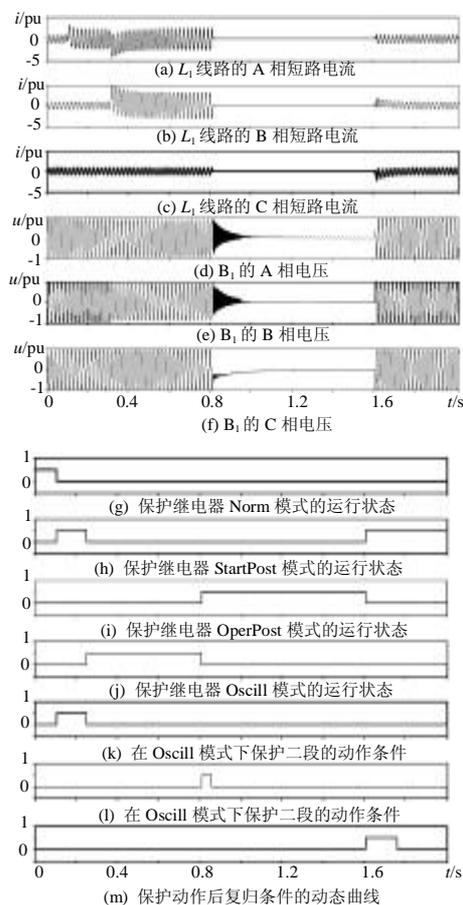


图 8 由 A 相接地故障转换 AB 相故障时保护动态波形

Fig. 8 The relay dynamic curves during relay operation

## 5 结论

本文提出的数字保护继电器的 GHPN 建模方法具有以下特点：

(1) 由 MODELICA 建模语言实现的 GHPN 模型采用分层结构，便于描述保护系统的混杂动态行为，而且模型代码是开放的，便于用户对所建模型进行修改和功能扩充；

(2) 通过保护 GHPN 软模型的仿真，可分析保护继电器的内部动态过程及误动和拒动的原因；

(3) GHPN 软模型也可用来研究保护的新原理和新算法；

(4) 利用保护软模型结合事故记录数据，可以用来分析继电器保护动作与系统之间的混杂动态过程，揭示在大停电事故中由保护动作引起的连锁事故发生的机理以及电力系统动态行为的演化过程。目前，这一工作仍在继续研究之中。

## 参考文献

[1] 张东英, 柳焯, 周庆捷, 等. 电站保护系统的通用仿真方案[J]. 电

网技术, 1998, 22(3): 61-64.

- Zhang Dongying, Liu Zhou, Zhou Qingjie *et al.* Universal simulation project of substation protection system[J]. Power System Technology, 1998, 22(3): 61-64.
- [2] 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 Maosheng, Li Xiaohua *et al.*, Reliability analysis of digital protection[J]. Proceedings of the CESS, 2004, 24(7): 47-52.
- [3] 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 Jiali, Guo Zheng, Yang Xiaojun *et al.* Reliability and dynamic performance simulation of protective relays[J]. Power System Technology, 2004, 28(9): 18-22.
- [4] 韩学军, 朱涛, 韩学山. 供电网继电保护可视化整定计算与动作仿真系统[J]. 电网技术, 2004, 28(14): 28-31.  
Han Xuejun, Zhu Tao, Han Xueshan. Visualized system of setting calculation and action simulation for protective relaying in power supply network[J]. Power System Technology, 2004, 28(14): 28-31.
- [5] 李一泉, 何奔腾, 黄瀛. 基于电容式电压互感器暂态误差估计的自适应距离保护[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 72-76.  
Li Yiquan, He Benteng, Huang Ying. An adaptive distance relay based on transient error estimation of CVT[J]. Proceedings of the CESS, 2004, 24(10): 72-76.
- [6] 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 Yanjiao, Wang Peng, Sun Gang. Main procedures and method to analyze maloperation of protective relaying[J]. Power System Technology, 2004, 28(20): 80-82.
- [7] 杨光, 王慧芳. 基于 Web 的发电厂继电保护整定与信息管理系统[J]. 电网技术, 2002, 26(4): 31-33.  
Yang Guang, Wang Huifang. A web technique based protective relaying setting calculation and information management system for power plant[J]. Power System Technology, 2002, 26(4): 31-33.
- [8] 李生虎, 丁明, 王敏, 等. 考虑故障不确定性和保护动作性能的电网连锁故障模式搜索[J]. 电网技术, 2004, 28(13): 27-31.  
Li Shenghu, Ding Ming, Wang Min *et al.* Search of power system chained failure mode considering uncertainty of element fault and performance of protective relaying[J]. Power System Technology, 2004, 28(13): 27-31.
- [9] 王广学, 俸玲, 李晓娟. 电力系统输电线路接地距离保护整定计算研究[J]. 电网技术, 2002, 26(2): 49-53.  
Wang Guangxue, Feng Ling, Li Xiaojuan. Research on setting calculation of grounding distance protection of transmission line[J]. Power System Technology, 2002, 26(2): 49-53.
- [10] 李银红, 段献忠. 基于感受量的接地距离保护整定方法探讨[J]. 电网技术, 2003, 27(8): 64-67.  
Li Yinhong, Duan Xianzhong. A discussion on grounding distance protection method based on detecting impedance[J]. Power System Technology, 2003, 27(8): 64-67.
- [11] 王增平, 徐岩, 王雪, 等. 基于变压器模型的新型变压器保护原理的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 54-58.  
Wang Zengping, Xu Yan, Wang Xue *et al.*, Study on the novel transformer protection principle based on the transformer model[J]. Proceedings of the CESS, 2003, 23(12): 54-58.
- [12] 王为国, 尹项根, 余江, 等. 固定串补电容对输电线路继电保护影响的综述[J]. 电网技术, 1998, 22(11): 18-21.  
Wang Weiguo, Yin Xianggen, Yu Jiang *et al.* In fluence of fixed

- series capacitor on protective relaying for transmission line[J]. Power System Technology, 1998, 22(11): 18-21.
- [13] 薛永端, 徐丙垠, 冯祖仁, 等. 小电流接地故障暂态方向保护原理研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 51-56.  
Xue Yongduan, Xu Bingyin, Feng Zuren *et al.* The principle of directional earth fault protection using zero sequence transients in non-solid earthed network[J]. Proceedings of the CESS, 2003, 23(7): 51-56.
- [14] 苏文博, 张高峰, 刘国平. 干簧继电器误动问题的试验与研究[J]. 电网技术, 1998, 22(6): 55-58.  
Su Wenbo, Zhang Gaofeng, Liu Guoping. The test and research of mal operation of dry Reed relay[J]. Power System Technology, 1998, 22(6): 55-58.
- [15] 段建东, 张保会, 周艺. 超高速暂态方向继电器的研究[J], 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 7-12.  
Duan Jiandong, Zhang Baohui, Zhou Yi. Study of ultra-high-speed transient-based directional relay[J]. Proceedings of the CESS, 2005, 25(4): 7-12.
- [16] 褚文捷, 陈珩. 三相不对称复杂电力系统暂态仿真的解耦计算[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(1): 42-47.  
ChH Wenjie, Chen Heng. Decoupled Computation of Unsymmetrical Three-Phase M uJti-M achine Power System Transient Simulation [J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(1): 42-47.
- [17] 翟国富, 王淑娟, 许峰, 等. 基于超程时间和吸合时间建模的继电器双变量寿命预测方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 76-80.  
Zhai Guofu, Wang Shuquan, Xu Feng *et al.* Research on double-variable life forecasting based on Model-building of super-path time and pick-up time for Relays[J]. Proceedings of the CESS, 2002, 22(7): 76-80.
- [18] 叶萍, 陈德树. 一种能克服 10 极化接地距离继电器区外稳态超越问题的新方案[J]. 中国电机工程学报, 1995, 15(3): 199-203.  
Ye ping Chen Deshu. New algorithm of io polarized ground distance relay[J]. Proceedings of the CESS, 1995, 15(3): 199-203.
- [19] 林湘宁, 刘沛, 杨春明, 等. 基于相关分析的故障序分量选相元件[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 16-21.  
Lin Xiangning, Liu pei, Yang Mingchun *et al.* A Superimposed phase selector based on symmetrical components and correlation analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 16-21.
- [20] 危韧勇, 刘春芳. 基于小波理论的超高压输电线路故障定位与选相方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(5): 85-88.  
Wei Renyong, Liu Chunfang. Approach fault location and fault phase selection in uhv power transmission line based on the wavelet theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(5): 85-88.
- [21] 曹国臣, 蔡国伟, 王海军. 继电保护整定计算方法存在的问题与解决对策[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 51-56.  
Cao Guochen, Chai Guowei, Wang Haijun. Problems and Solutions in Relay setting and coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 51-56.
- [22] 余锐, 熊小伏, 赵霞. 互联系统振荡造成保护误动的分析及其对策[J]. 电网技术, 2002, 26(8): 78-81.  
Yu Rui, Xiong Xiaofu, Zhao Xia. Analysis of maloperation of protectlve relaying caused by power system oscillation and its countermeasure[J]. Power System Technology, 2002, 26(8): 78-81.
- [23] 邓永生. 互联电网保护误动行为分析[J]. 电网技术, 2002, 26(8): 56-59.  
Deng Yongsheng. Analysis of protection maloperation occurring in interconnected power system[J]. Power System Technology, 2002, 26(8): 56-59.
- [24] 王成山, 张家安. 分布式暂态稳定仿真的面向对象分析与设计[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 27-30.  
Wang Chengshan, Zhang Jiaan. Object-oriented analysis and design of distributed transient stability simulation[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 27-30.
- [25] 白雪峰, 倪以信. 电力系统动态安全分析综述[J]. 电网技术, 2004, 28(16): 14-20.  
Bai Xuefeng, Ni Yixin. Survey om dynamic security assessment of power systems[J]. Power System Technology, 2004, 28(16): 14-20.
- [26] 韩祯祥, 曹一家. 电力系统的安全性及防治措施[J]. 电网技术, 2004, 28(9): 1-6.  
Han Zhenxiang, Chao Yijia. Power system security and its prevention [J]. Power System Technology, 2004, 28(9): 1-6.
- [27] 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研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 20-25.  
Zhao Hongshan, Mi Zengqiang, Niu Dongxiao *et al.* Power system Modeling using Hybrid system theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 20-25.
- [28] Perez L G, Flechsig A J, Venkatasubramanian V. Modeling the protective system for power system dynamic analysis[J]. IEEE Transactions on power system, 1994, 9(4): 1963-1973.
- [29] Domijan A, Emanj M V. State space relay modeling and simulation using the electromagnetic transients program and its transient analysis of control systems capability[J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 1992, 7(2): 697-702.
- [30] Kezunovic M, Pickett B A, Adamiak MG *et al.* Digital simulator performance requirements for relay testing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(4): 78-84.
- [31] McLaren P G, Skendzic V, Girgis A *et al.* Software models for relays[J]. IEEE Transaction on Power Delivery. 2000, 16(2): 238-246.
- [32] Kezunovic M, Kasztenny M B, Galijasevic B Z. Modeling, developing and testing protective relays using matlab, programmable relays and digital simulators for power engineering education[C]. 3rd Int'l. Conference on Digital Power System Simulators- ICDS '99, Vasteras, Sweden, 1999.
- [33] Sidhu T S, Hfuda M, Sachdev M S. Generating relay models for protection stadiues[C]. IEEE Computer Applications in Power, 1998, 11(4): 33-38.
- [34] Mattsson S E, Elmqvist H, Broenink J F. Modelica: An international effort to design the next generation modelling language[J]. Journal A, Benelux Quarterly Journal on Automatic Control, 1997, 38(3): 16-19.
- [35] Li Y J, Guo B Y. Protection of CSL160B. Beijing Sifang Automation CO., LTD. [online]. Available: [http://www.sf-auto.com/download/mat\\_all.html](http://www.sf-auto.com/download/mat_all.html). HTML.

收稿日期: 2005-09-06.

作者简介:

米增强 (1960-), 男, 教授, 主要从事电力系统混杂建模与动态过程仿真研究;

赵洪山 (1965-), 男, 副教授, 博士, 主要从事电力系统混杂建模与动态过程仿真, 电力系统早期预警机理以及电力系统广域动态安全监控研究;

王海萍 (1968-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事电力系统自动化研究;

任惠 (1973-), 女, 讲师, 主要从事电力系统自动化研究。