

# 舰船综合电力系统智能保护方法研究

胡亮灯<sup>1</sup>, 叶志浩<sup>1</sup>, 方明<sup>1</sup>, 王琦<sup>2</sup>, 王瑞田<sup>1</sup>

(1. 海军工程大学舰船综合电力技术国防科技重点实验室, 湖北 武汉 430033;  
2. 中国船舶重工集团公司第七零一研究所, 湖北 武汉 430064)

**摘要:** 舰船综合电力系统在保护方面存在若干问题: 多种工况导致断路器整定值难以选取; 系统分级增多, 时间原则下的保护延时大大增加; 电缆长度较短, 致使相邻两级故障难以区分。基于 BP 神经网络, 提出一种电流、电压有效值作为输入, 神经网络识别结果作为输出, 并用输出结果来控制断路器的通断, 实现舰船综合电力系统故障定位的智能保护方法。介绍 PSCAD/EMTDC 与 C 接口原理, 对神经网络输入量选取原则及处理方法进行说明, 并调用 BP 神经网络 C 程序进行了仿真验证, 结果表明该智能保护方法是保护舰船综合电力系统, 提高舰船战斗力和生命力的有效方法之一。

**关键词:** 舰船综合电力系统; 智能保护; PSCAD/EMTDC 与 C 接口; BP 神经网络; 仿真

## Intelligent protection method of vessel integrated power system

HU Liang-deng<sup>1</sup>, YE Zhi-hao<sup>1</sup>, FANG Ming<sup>1</sup>, WANG Qi<sup>2</sup>, WANG Rui-tian<sup>1</sup>

(1. National Key Laboratory for Vessel Integrated Power System Technology, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 2. Institute of Marine Electric Propulsion, CSIC, Wuhan 430064, China)

**Abstract:** Some protection problems exist in Vessel Integrated Power System (VIPS), for example, a lot of conditions of VIPs make it difficult to confirm setting values; protection time-delay becomes greatly longer based on time principle as system rating increases, cable is short leading to distinguish two-step fault hard. The paper brings forward an intelligent protection method in which current and voltage rms are taken as input while discriminating result of NN as output based on Back Propagation Neural Networks (BPNN). The method uses BPNN discriminating result to control breakers switching on and off in VIPS, thus to realize fault location of VIPS intelligently. The paper introduces interface principle between PSCAD/EMTDC and C and illuminates the choosing and processing of input quantity of neural network. Simulation verification is made base on BPNN C procedure and the result demonstrates the intelligent protection method is effective in protecting VIPS and enhancing vessel's fighting capacity and vitality.

This work supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50977090 and No. 50721063).

**Key words:** CIPS; intelligent protection; interface between PSCAD/EMTDC and C; BP neural networks; simulation

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)04-0094-06

## 0 引言

所谓综合电力系统 (Integrated Power System) 是指将发电、日常用电、推进供电、高能武器发射供电、大功率探测供电综合为一体的电力系统<sup>[1]</sup>, 简称 IPS。

相比传统舰船电力系统, 舰船综合电力系统在保护方面具有以下特点<sup>[2-7]</sup>:

(1) 复杂多样的运行方式。不同的运行方式下, 电力系统网络拓扑结构和发电机, 负载的投入

容量相差很大, 导致正常及故障情况下系统体现的电流水平也会有很大区别。

(2) 容量量级增大, 电网分级越来越多。按时间原则整定时, 越靠近源侧的断路器保护延迟时间越长, 保护快速性达不到要求, 短路电流的持续对电网和设备可能产生不利影响甚至带来破坏性后果。

这些特点给基于时间电流原则的断路器整定方法带来了很大的困难。对于全舰动力全部依靠电力的综合电力系统, 这样的弊端将严重影响舰船的战斗性能及可靠性、生命力水平。

同时, 舰船电力系统与陆用电力系统相比也存

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50977090, 50721063)

在较大的差异<sup>[8]</sup>:

(1) 舰船上电缆长度较短, 线路阻抗很小, 这使得相邻两级断路器保护范围内的短路电流很相近, 单纯依靠短路电流大小很难区分相邻两级故障。

(2) 舰船上发生短路的形式多样, 从金属性短路到具有限流作用的电弧性短路都存在。短路电阻不确定, 短路电流变化范围很大, 也造成了保护断路器的整定困难。

(3) 舰船电力系统的固有特性如: 包含大功率脉冲负载、负载变化显著、存在非线性成分、元件暂态过程的时间跨度大等进一步增加了断路器保护整定的难度。

综上, 有必要针对舰船综合电力系统的特点和需求来开展整个系统的智能保护研究。

所谓智能保护就是利用具备数据采集、处理与通信功能的电力系统综合检测系统得到的系统运行数据, 运用人工智能的方法进行系统故障辨识与故障定位, 进而完成保护逻辑判断, 并由此指示相应开关通断, 实现系统保护的一种新型保护方法。由于神经网络<sup>[9-10]</sup>具有高度的并行及容错性、实时性、自适应能力, 还具有自组织、自学习、联想记忆等能力, 使它在智能保护中的应用有着独特的优势。其中BP神经网络是目前神经网络中使用最为广泛的网络模型<sup>[11]</sup>, 它无论在网络理论还是网络性能方面都已经非常成熟, 其突出的优点在于其具有很强的非线性映射能力和柔性的网络结构。因此, 本文选取了BP神经网络人工智能方法, 并从以下两方面进行了研究:

(1) 建立了基于PSCAD/EMTDC的系统仿真模型, 以得到系统运行数据。

(2) 在几种典型故障下, 通过PSCAD/EMTDC内含的两个Fortran文件DSDYN、DSOUT调用BP神经网络C程序进行仿真, 以验证BP神经网络智能保护方案有效性。

## 1 BP神经网络基本原理

### 1.1 BP神经网络数学模型<sup>[12]</sup>

多层前馈神经网络的反向误差传播训练算法(可简称为BP算法)首先是由Werbos在他的博士学位论文中提出<sup>[13]</sup>, 它是一种有隐含层的多层前馈网络, 如果网络的输入节点数为 $M$ 、输出节点数为 $L$ , 则此神经网络可看成是从 $M$ 维欧氏空间至 $L$ 维欧氏空间的映射。图1为典型BP网络结构图。

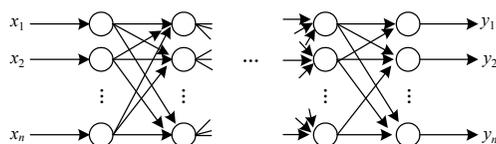


图1 BP网络结构示意图

Fig.1 Networks structure of BP

Hornik等已证明: 若输入层和输出层采用线性转换函数, 隐层采用Sigmoid转换函数, 该函数表达式为:

$$f(x) = 1 / (1 + e^{-x}) \quad (1)$$

则含一个隐层的MLP网络能够以任意精度逼近任何有理函数。其他资料研究也表明<sup>[10]</sup>, 一个三层(输入层、隐含层和输出层)的BP网络就能够实现任意精度的非线性函数逼近, 所以, 在实际应用中, 一般采用只具有一个隐含层的三层BP网络就能够达到目的。

假设三层BP网络, 输入层节点 $x_i$ , 隐含层节点 $y_j$ , 输出层节点 $z_l$ 。隐含层输出为:

$$y_j = f\left(\sum_i w_{ji} x_i - \theta_j\right) \quad (2)$$

其中:  $w_{ji}$ 为输入层节点与隐含层节点之间的网络权值;  $\theta_j$ 为隐含层的阈值。输出层的输出为:

$$z_l = f\left(\sum_j v_{lj} y_j - \theta_l\right) \quad (3)$$

其中:  $v_{lj}$ 为隐含层节点与输出节点之间网络权值,  $\theta_l$ 为输出层的阈值。输出节点误差为:

$$E = \frac{1}{2} \sum_l (t_l - z_l)^2 = \frac{1}{2} \sum_l (t_l - f(\sum_j v_{lj} f(\sum_i w_{ji} x_i - \theta_j) - \theta_l))^2 \quad (4)$$

其中,  $t_l$ 为目标输出。输入层节点误差 $\delta_l$ 为:

$$\delta_l = (t_l - z_l) \cdot f'(\sum_j v_{lj} y_j - \theta_l) \quad (5)$$

隐层节点误差 $\delta_j$ 为:

$$\delta_j = f'(\sum_i w_{ji} x_i - \theta_j) \cdot \sum_l \delta_l v_{lj} \quad (6)$$

其中:  $f'(x)$ 为 $f(x)$ 的导数,  $x$ 为表达式。

### 1.2 BP网络各层神经元的选择<sup>[14]</sup>

输入层神经元个数和输出层神经元个数分别由需要观察的特征量和需要识别的模式类型数决定, 本文需采样24个特征量, 故输入层神经元个数 $x=24$ , 输出层神经元个数 $y$ 对应需要识别的模式, 本文考虑了8种情况, 故 $y=8$ 。而在确定隐含层神经元的个数时, 通常需要满足式(7)要求:

$$m = \sqrt{x + y} + R(10), \quad 2^m > y \quad (7)$$

式中:  $m$ 为隐含层神经元个数;  $x$ 、 $y$ 分别为输出、

输入层神经元个数;  $R(10)$ 表示 1~10 之间的任意整数。同时各层的节点数时还需满足下列条件:

(1) 输入层、隐层节点数必须小于  $N-1$  ( $N$  为训练样本数), 否则, 网络模型的系统误差与训练样本的特性无关而趋于零, 建立的网络模型没有泛化能力。

(2) 训练样本数必须多于网络模型的连接权数, 一般为 2~10 倍, 方能得到可靠的神经网络模型。

## 2 PSCAD/EMTDC 与 C 语言接口原理<sup>[15]</sup>

PSCAD/EMTDC 软件自身的元件模型库原理单一, 逻辑简单, 难以实现实际保护的原理以及内部复杂的逻辑与时序关系, 因此在 PSCAD/EMTDC 软件中常常需要通过其开放的应用程序扩展接口, 由用户编程来实现仿真<sup>[16]</sup>。该软件提供了 Fortran、C 和 Matlab 三种语言给用户进行自定义模块程序的编程。PSCAD/EMTDC 是在 Fortran 语言上实现的, 虽用 Fortran 语言编写的程序运行效率高、内嵌性好, 但它格式限制多、程序出错后信息不明确、调试难度大。Matlab 虽综合了数值计算、符号运算及图形处理等功能, 但调用 Matlab 运行的效率很低。而 C 语言具有功能丰富、通俗易懂、程序易编写调试、可移植性好等优点, 本文考虑 C 语言作为 PSCAD/EMTDC 用户自定义模块的开发语言是最适宜的<sup>[17]</sup>。

PSCAD/EMTDC 与外部模块的数据交换利用其提供的两个 Fortran 文件 DSDYN、DSOUT, 来实现数据交换。该 Fortran 子程序通过启动 C 语言的数据引擎并建立起 Fortran 子程序与 C 语言之间的信息交换通道, 使 PSCAD/EMTDC 与 C 构成一个完整系统, 用户可以根据需要编写 C 文件, 实现所需仿真<sup>[18]</sup>。图 2 是 PSCAD/EMTDC 在 GNU Fortran 编译环境下与 C 程序的接口示意图。

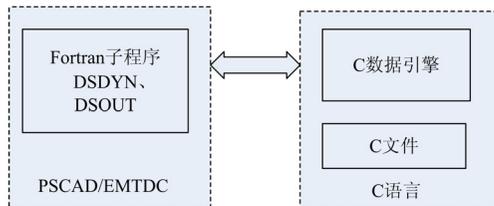


图 2 PSCAD/EMTDC 与 C 程序接口示意图

Fig.2 Interface between PSCAD/EMTDC and C procedure

## 3 典型电力网络系统模型

### 3.1 研究的典型网络<sup>[19]</sup>

考虑到对一个复杂的全系统进行分析比较困

难, 于是先从全系统的一个局部着手, 基于系统的一个典型局部进行建模并仿真各典型故障, 同时提取故障特征信号。舰船综合电力系统的一个典型局部网络如图 3 所示。

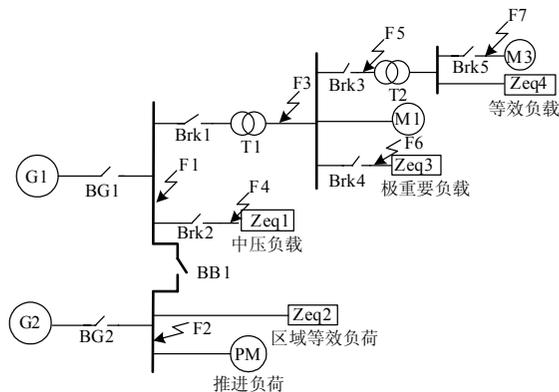


图 3 典型辐射网络

Fig.3 Typical radial network

该网络为典型辐射网络, 可以作为研究复杂复合型网络的基础。它包括一台 10 MW 柴油发电机组 G1 和一台 50 MW 燃气轮机发电机组 G2, 负载由一台 45 MW 等效推进负载和其他日用负载构成。由于推进电动机经过变频调速环节供电, 电动机外部发生短路故障时, 其短路电流由于整流模块二极管的单相导电性将无法回馈到短路点, 推进电动机对总的短路电流没有贡献, 可以用等功率的电阻负载近似处理。分别设置短路点 F1~F7, 如图 3 所示, 相应参数如表 1 所示。

表 1 典型辐射网络参数

Tab.1 Parameter of typical radial network

元件	参数类型	参数值
发电机组 (G1)	额定功率	10 MW
	额定线电压	6.6 kV
发电机组 (G2)	额定功率	50 MW
	额定线电压	6.6 kV
变压器 (T1、T2)	额定容量	8 MVA
	漏抗	0.1 p.u.
	变比	6600 V/380 V
推进负荷	功率	45 MW
区域等效负荷	功率	3.5 MW
中压负载	功率	2.5 MW
极重要负载	功率	2.5 MW
等效负荷	功率	0.5 MW

### 3.2 基于 BP 神经网络智能保护系统

#### 3.2.1 训练样本的形成

在 PSCAD/EMTDC 搭建图所示网络的仿真模

型,并对该系统运行行为进行仿真研究,以得到系统在 F1~F7 故障时,8 个断路器处每个断路器的 A、B 相电流和 C 相电压有效值,两相电流有效值加一相电压有效值能提高 BP 故障模式识别准确性<sup>[20]</sup>。将 A、B 相电流和 C 相电压有效值共 24 个特征量构成一个行向量,作为 BP 神经网络一个训练样本。

舰船电网常为三相三线不接地系统,电网保护只要求能正确识别三相和两相故障即可,故本文只考虑两种工况下(工况一:G1、G2 均投入;工况二:只投入 G1,推进电机和 G2 不投入)每个故障点的 AB 两相短路(记 FAB)、ABC 三相短路(FABC)、AC 两相短路(FAC)、BC 两相短路(FBC)四种模式。不同工况、短路时间及短路模式,A、B 相电流和 C 相电压有效值可能有比较大的差异,因此需对各个短路点进行多次短路。本文对每个故障点分别进行了 20 次短路,以确保每个点故障时 A、B 相电流和 C 相电压有效值的各种情况都能采集到。

保护要求快速性,同时为避开正常扰动,主要提取短路后 2.5~10 ms(约 10 ms 故障电流到其最大值)之间的数据作为神经网络训练样本,采样间隔为 0.5 ms,一次短路一个故障点提取的样本数为 (10-2.5)/0.5=15 个,20 次短路一个故障点提取的总样本为 15×20 个。考虑到样本可能有重复,基于 Matlab 剔除其中波形相近的样本,形成最终训练样本。每个故障点训练样本各为 120 组,因正常运行有效值波形基本一致,训练样本为 60 组,7 种短路情况及正常运行共提取训练样本为 900 组。

### 3.2.2 训练样本的处理及训练

不同工况、短路时间及模式,样本数据可能相差很大,为提高识别准确率和训练速度,首先对样本进行归一化。归一化函数有直线型、折线型和曲线型三种,常采用的是直线型函数如式(8):

$$v' = \frac{v - \min_x}{\max_x - \min_x} \quad (8)$$

其中:  $\min_x$ 、 $\max_x$  分别为所有训练样本对应的某个特征量的最小值和最大值。该函数将样本映射到 0~1 区间,同时为保证建立的模型具有一定的外推能力,最好使数据预处理后的值在 0.2~0.8 之间。

设定神经网络训练误差为 0.01,训练速度为 0.4,隐层神经元数为 10,目标函数为表 2 所示编码(见第 4 部分),基于 VC 进行训练。

### 3.2.3 基于 PSCAD/EMTDC 神经网络接口

#### (1) 接口规则<sup>[21]</sup>

由于 PSCAD/EMTDC 控制接口不支持 24 个节点,故将 24 个特征量分成两组,每组 12 个数据。通

过数据合并标签(它只支持最大合并 12 个数据)形成两个向量,而此时只需 2 个节点,能较好地应用于 PSCAD/EMTDC。需要注意的是 PSCAD/EMTDC 在 GNU Fortran 编译环境下不支持嵌套函数中参数的传递即使参数为数组地址或指针。

调用 BP 神经网络 C 程序语句为: CALL BRK\_CONTROL (\$BRK1\_12, \$BRK13\_24, \$BRK\_ST), 其中 BRK1\_12、BRK13\_24 为 PSCAD/EMTDC 中采样的 24 个特征量,该 24 个特征量传入 BP 神经网络, BRK\_ST 为 BP 神经网络传出的识别结果共 8 个量,用来控制基于 PSCAD/EMTDC 仿真网络中断路器的通断。

#### (2) 接口示意图

在 PSCAD/EMTDC 搭建的 BP 神经网络接口示意图如图 4 所示,它包括神经网络控制接口(如图 4(a))和神经网络 C 程序(如图 4(b))。

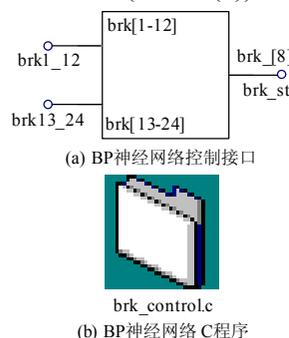


图 4 BP 神经网络接口图  
Fig.4 Interface of BPNN

### 3.2.4 智能保护系统流程

离线训练 BP 神经网络,基于 PSCAD/EMTDC 在线测试。具体思路如下:当采样后 24 个特征量中任意电流归一化值大于 0.35,或电压归一化值小于 0.65(正常运行电流归一化值约等于 0,电压归一化值约等于 1),进入训练好的 BP 神经网络程序,保存神经网络输出结果,否则继续进行采样。当保存的神经网络输出结果次数大于 2 时,取两组结果中相应元素均值,作为神经网络识别结果。同时对识别结果的 8 均值中差别小于 0.1 的赋相同值,将最后结果回传给 PSCAD/EMTDC,来控制仿真系统中断路器的通断,智能保护系统流程如图 5 所示。

## 4 仿真结果及分析

PSCAD/EMTDC 断路器控制信号为: 1 断路器断开; 0 断路器闭合。将 BP 神经网络传回给 PSCAD/EMTDC 的结果进行取整,得到 0 或 1 信号,以控制断路器的通断。一旦取整后的信号含 1(即断路器状态改变),则对信号进行保持,断路器不再动

作，直至开始下一次仿真。

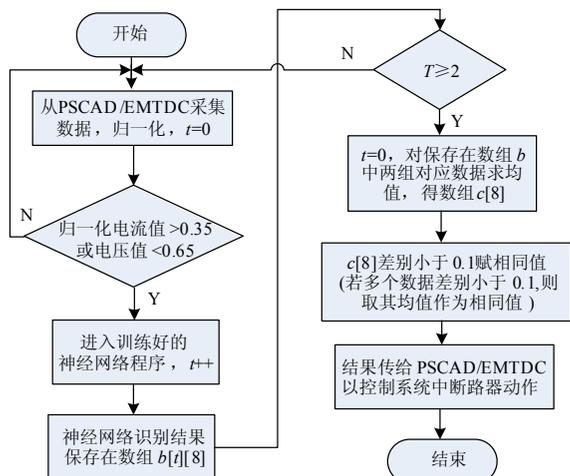


图 5 基于 PSCAD/EMTDC 智能保护流程图  
Fig.5 Intelligence protection flow chart based on PSCAD/EMTDC

根据断路器次序Brk1、Brk2、Brk3、Brk4、Brk5、BG1、BG2、BB1，依次进行编码。仿真网络正常运行F0，对应编码为00000000；F1点故障（包括FAB、FABC、FAC、FBC四种模式），断路器BB1、BG1断开，则断路器对应的编码为00000101。其他典型故障以此类推，编码后的序列将作为BP神经网络的目标向量。当F1短路时，断路器动状态如图6所示，相应断路器波形如图7所示。

系统设置的起始短路时间为第4.0 s，从图中可

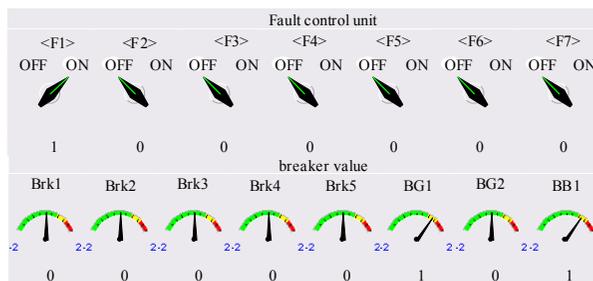


图 6 F1 短路各断路器状态  
Fig.6 Breakers state while F1 is short

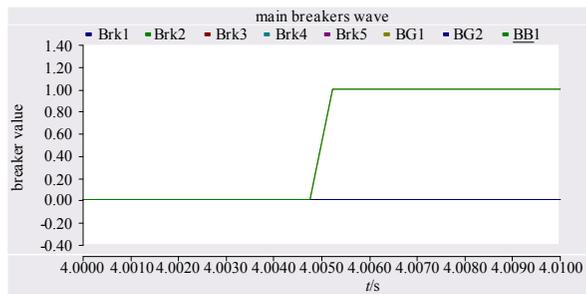


图 7 F1 短路各断路器波形  
Fig.7 Breakers wave while F1 is short

以看出，断路器开始动作时间约为 4.005 3 s，短路后 5~6 ms 神经网络就判断出了故障，验证了智能保护方法的准确和快速性。同时对其他几种短路情况进行了仿真，仿真结果表明 BP 网络能较好地进行了故障定位，并使断路器准确快速动作，说明了此智能保护方法有效可行，仿真实例结果见表 2。

表 2 几种典型故障 BP 网络识别结果

Tab.2 BP network identification results of several typical faults

故障点	目标输出	BP 网络识别结果								断路器控制信号	断路器动作情况
F0	00000000	0.010	0.001	0.001	0.004	0.004	0.001	0.004	0.018	00000000	—
F1	00000101	0.012	0.002	0.002	0.007	0.000	0.974	0.016	0.987	00000101	BB1、BG1 断开
F2	00000011	0.003	0.007	0.001	0.004	0.013	0.022	0.972	0.984	00000011	BB1、BG2 断开
F3	10000000	0.967	0.006	0.005	0.001	0.001	0.019	0.000	0.012	10000000	Brk1 断开
F4	01000000	0.018	0.966	0.001	0.003	0.000	0.011	0.001	0.015	01000000	Brk2 断开
F5	00100000	0.006	0.001	0.941	0.005	0.010	0.005	0.001	0.005	00100000	Brk3 断开
F6	00010000	0.002	0.001	0.001	0.963	0.002	0.000	0.004	0.009	00010000	Brk4 断开
F7	00001000	0.002	0.001	0.005	0.001	0.980	0.000	0.012	0.008	00001000	Brk5 断开

## 5 结语

(1) PSCAD/EMTDC 通过接口与外部程序结合起来，突破了 PSCAD/EMTDC 自带模型的限制，增强了仿真的灵活性。智能保护接口系统与电力网络仿真模型能较好地完成动态闭环控制及信息交

互，基于 BP 神经网络建立的智能保护接口系统正确性得以验证。

(2) 基于 PSCAD/EMTDC 典型辐射网络仿真模型，通过调用训练好的 BP 神经网络系统，对几种典型故障情况下的开关保护动作行为进行了深入的仿真分析，结果表明基于 BP 神经网络的智能保

护方法正确可行。

(3) BP神经网络智能保护方法为舰船综合电力系统保护方案的确定提供了一种可以借鉴的途径,尤其是BP神经网络C程序能较好地嵌入到DSP中,为智能保护硬件的进一步开发打下了基础。

(4) 采用BP神经网络算法来进行VIPS的保护,能够适应VIPS的特点,满足保护的灵敏性、可靠性要求,其快速性将随着控制和通讯硬件的进步而提高。智能保护将成为VIPS保护系统发展的趋势之一。

### 参考文献

- [1] 马伟明. 舰船动力发展的方向—综合电力系统[J]. 海军工程大学学报, 2002, 14(6): 1-5, 9.  
MA Wei-ming. Integrated power systems—trend of ship power development[J]. Naval University of Engineering, 2002, 14(6): 1-5, 9.
- [2] 郑定泰. 水面舰艇综合电力系统的技术进展[J]. 舰船科学技术, 2005, 27(5): 5-12.  
ZHENG Ding-tai. The technical development of the integrated power system for surface ships[J]. Ship Science and Technology, 2005, 27(5): 5-12.
- [3] 杨秀霞, 张晓锋, 张毅. 舰船电力系统的发展趋势[J]. 中国修船, 2004 (3): 12-14.  
YANG Xiu-xia, ZHANG Xiao-feng, ZHANG Yi. Developing trend of marine power system[J]. China Lay-up, 2004 (3): 12-14.
- [4] 孙建波, 廖永红, 权宪军, 等. 继电保护的现状与思考[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(12): 77-79, 85.  
SUN Jian-bo, LIAO Yong-hong, QUAN Xian-jun, et al. The status quo and thinking of relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(12): 77-79, 85.
- [5] 周卫, 张尧, 夏成军, 等. 分布式发电对配电网继电保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 1-5, 10.  
ZHOU Wei, ZHANG Yao, XIA Cheng-jun, et al. Effect of distributed generation on relay protection of distributed system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 1-5, 10.
- [6] 蒋陆萍, 胡峰, 冷建群. 继电保护故障快速查找的几种典型方法及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(18): 124-127.  
JIANG Lu-ping, HU Feng, LENG Jian-qun. Several typical ways and applications of quickly finding relay faults[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(18): 124-127.
- [7] 汤大海, 严国平. 单电源220 kV多级供电线路继电保护整定策略[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(20): 139-144.  
TANG Da-hai, YAN Guo-ping. Relay Protection strategy of 220 kV single-source multi-level power supply line[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(20): 139-144.
- [8] 谢楨, 叶志浩, 吕昊. 基于直流区域配电的舰船综合电力系统智能保护方式研究[J]. 船电技术, 2009, 29(1): 56-60.  
XIE Zhen, YE Zhi-hao, Lü Hao. Intelligentized protection method analysis on DC-ZEDS-based shipboard integrated power system[J]. Maring Electric & Electronic Engineering, 2009, 29(1): 56-60.
- [9] Jongepier A G, Sluis L V. Adaptive distance protection of double-circuit lines using artificial neural networks[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1997, 12(1): 97-105.
- [10] Abdelaziz A Y, Irving M R, Mansour M M. Adaptive protection strategies for detecting power system out-of-step conditions using neural networks[J]. IEE Proc Gener Transm Distrib, 1998, 145(4): 387-394.
- [11] Mohamed E A, Rao N D. Artificial neural network based fault diagnostic system for electric power distribution feeders[J]. Electric Power Systems Research, 1995, 35(4): 1-10.
- [12] 董长虹. Matlab神经网络与应用[M]. 国防工业出版社, 2005.  
DONG Chang-hong. MATLAB neural network and application[M]. National Defence Industry Press, 2005.
- [13] Werbos P J. Beyond regression: new tools for prediction and analysis in the behavioral sciences[D]. Harvard University, Cambridge, MA, 1974.
- [14] 葛哲学, 孙志强. 神经网络理论与MATLAB R2007实现[M]. 电子工业出版社, 2007.  
GE Zhe-xue, SUN Zhi-qiang. Neural network theory and Matlab R2007 application[M]. Publishing House of Electronics Industry, 2007.
- [15] 黄志岭, 田杰. PSCAD/EMTDC与直流控制仿真模型接口研究[J]. 第十一届全国保护和控制学术研讨会, 2007.  
HUANG Zhi-ling, TIAN Jie. Research on interface technique connecting PSCAD/EMTDC and HVDC control system simulation model[J]. 11th Protection and Control Academic Seminar, 2007.
- [16] Manitoba HVDC Research Centre Inc. PSCAD on-line help system[M]. Winnipeg: Manitoba HVDC Research Centre Inc, 2002.
- [17] 肖异, 尹项根, 张哲, 等. PSCAD/EMTDC程序与继电保护仿真模型接口技术及应用[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(11): 67-70.  
XIAO Yi, YING Xiang-gen, ZHANG Zhe. PSCAD/EMTDC' procedure and relay protection emulational model interface technique with application[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(11): 67-70.
- [18] 钟波, 赵华军. PSCAD/EMTDC程序与MATLAB语言接口的研究[J]. 广东电力, 2005, 18(8): 28-30.  
ZHONG Bo, ZHAO Hua-jun. Study on PSCAD/EMTDC-Matlab interface[J]. Guangdong Electric Power, 2005, 18(8): 28-30.
- [19] 胡亮灯, 叶志浩, 方明, 等. 综合电力系统不同容量机组并联时整定保护的考虑[C]. //中国高校电力系统及其自动化专业第二十五届学术年会, 2009.

(下转第104页 continued on page 104)

系统运行风险评估(二)理论部分[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 11-15, 21.

FENG Yong-qing, WU Wen-chuan, ZHANG Bo-ming, et al. Power system operation risk assessment based on credibility theory part two theory fundament[J]. Automation of Electric Power System, 2006, 30(2): 11-15, 21.

[11] 李德毅. 知识表示中的不确定性[J]. 中国工程科学, 2000, 2(10): 73-79.

LI De-yi. Uncertainty in knowledge representation[J]. Engineering Science, 2000, 2(10): 73-79.

[12] 李德毅, 刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. 中国工程科学, 2004, 6(8): 28-34.

LI De-yi, LIU Chang-yu. Study on the universality of the normal cloud model[J]. Engineering Science, 2004, 6(8): 28-34.

[13] 刘常昱, 李德毅, 杜鹤, 等. 正态云模型的统计分析[J]. 信息与控制, 2005, 34(2): 236-239, 248.

LIU Chang-yu, LI De-yi, DU Yi, et al. Some statistical analysis of the normal cloud model[J]. Information and Control, 2005, 34(2): 236-239, 248.

[14] 刘常昱, 李德毅, 潘莉莉. 基于云模型的不确定性知识表示[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(2): 32-35.

LIU Chang-yu, LI De-yi, PAN Li-li. Uncertain knowledge representation based on cloud model[J]. Computer Engineer and Application, 2004, 40(2): 32-35.

[15] 罗自强, 张光卫, 李德毅. 一维正态云的概率统计分析[J]. 信息与控制, 2007, 36(4): 471-475.

LUO Zi-qiang, ZHANG Guang-wei, LI De-yi. Probability statistics analysis of one-dimensional normal cloud[J]. Information and Control, 2007, 36(4): 471-475.

[16] 胡斌, 王生进, 丁晓青. 基于云模型的驾驶员驾驶状态评估方法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2009, 49(10): 39-43.

HU Bin, WANG Sheng-jin, DING Xiao-qing. Estimation of driver's driving state based on cloud model[J]. Tsinghua Univ: Sci&Tech, 2009, 49(10): 39-43.

[17] Djokic S Z, Milanovic J V, Kirschen D S. Sensitivity of AC coil contactors to voltage sag, short interruptions and undervoltage transients[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(3): 1299-1307.

[18] Djokic S Z, Desmet J, Vanalme G, et al. Sensitivity of personal computers to voltage sags and short interruptions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 375-383.

[19] Djokic S Z, Stockman K, Milanovic J V, et al. Sensitivity of AC adjustable speed drives to voltage sags and short interruptions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 494-505.

[20] 胡兵, 李清朗. 现代科学与工程计算基础[M]. 成都: 四川大学出版社, 2003.

[21] 黄洪钟, 孙占全, 郭东明, 等. 随机应力模糊强度时模糊可靠性的计算理论[J]. 机械强度, 2001, 23(3): 305-307.

HUANG Hong-zhong, SUN Zhan-quan, GUO Dong-ming, et al. Fuzzy reliability analysis in the case of random stress and fuzzy strength[J]. Journal of Mechanical Strength, 2001, 23(3): 305-307.

[22] 肖先勇, 杨洪耕, 陈武, 等. 敏感设备电压暂降敏感度的模糊随机评估[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34): 90-95.

XIAO Xian-yong, YANG Hong-geng, CHEN Wu, et al. Fuzzy-random evaluation of equipment sensitivity due to voltage sags[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 90-95.

收稿日期: 2010-03-09; 修回日期: 2010-04-28

作者简介:

孙晓璐(1987-), 女, 本科, 研究方向为电能质量与智能电网; E-mail: sunxiaolu2008@126.com

马静(1991-), 女, 本科, 研究方向为电能质量与智能电网;

李渊博(1984-), 男, 硕士, 研究方向为电能质量及其控制技术。

(上接第 99 页 continued from page 99)

HU Liang-deng, YE Zhi-hao, FANG Ming, et al. Analysis protection setting of different capacity generators parallel for integrated power system[C]. //25th CUS-EPSCA, 2009.

[20] 王琦. 新型船舶电力系统短路特征分析与保护措施研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2009.

WANG Qi. Research on short-circuit characteristic and protection of new shipboard power system[D]. Wuhan: Wuhan University, 2009.

[21] Lin Liang-zhen, Ye Lin. Transient analysis software package of electromagnetism in PSCAD/EMTDC[J]. Power System Technology, 2000, 24(1): 65-66.

收稿日期: 2010-02-07; 修回日期: 2010-06-05

作者简介:

胡亮灯(1986-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电力系统安全运行; E-mail: hldhdg@163.com

叶志浩(1975-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统安全运行;

方明(1984-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为电力系统安全运行。