

# 基于PSCAD/EMTDC的舰船电力系统 智能保护仿真研究

吴 韡<sup>1</sup>, 李光中<sup>2</sup>, 肖强晖<sup>1</sup>

(1. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412008; 2. 湖南工程学院 应用技术学院, 湖南 湘潭 411101)

**摘 要:** 分析了传统电力系统保护方法存在的缺点, 介绍了基于BP神经网络的智能化保护方法原理。为验证该方法的有效性和正确性, 基于PSCAD/EMTDC构建了电力系统仿真模型, 分别以两相电流有效值和三相电流最大值作为神经网络的输入, 进行了仿真研究和对比分析。结果表明: 基于BP神经网络的智能保护方法用于舰船电力系统故障定位准确可行, 三相电流最大值作为智能保护的输入信号更有优势。

**关键词:** PSCAD/EMTDC; 舰船电力系统; 智能化保护; BP神经网络; 仿真

**中图分类号:** TM77; TP391.9

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2011)04-0064-06

## Simulation of Intelligent Protection for Ship Power System Based on the PSCAD/EMTDC

Wu Wei, Li Guangzhong, Xiao Qianghui

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China;  
2. Application Technology College, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan Hunan 411101, China)

**Abstract:** Analyzes the shortcomings of traditional power system protection method and introduces the principle of intelligent protection method based on BP neural network. In order to verify the validity and correctness of the method, constructs the power system simulation model based on the PSCAD/EMTDC, and with two phase current RMS and three phase current maximum value as neural network input respectively, conducts a simulation study and comparative analysis. The result shows that the intelligent protection method based on BP neural network for ship power system fault locating is accurate and feasible, and the maximum three-phase current input signals as the input signal of intelligent protection have more advantages.

**Keywords:** PSCAD/EMTDC; ship power system; intelligent protection; BP neural network; simulation

## 0 引言

舰船综合电力系统(integrated power system, IPS)是指将发电、日常用电、推进供电、高能武器发射供电、大功率探测供电等综合为一体的电力系统<sup>[1]</sup>。相比传统舰船电力系统, 舰船综合电力系统具

有以下特点: 1) 复杂多样的运行方式; 2) 容量量级增大, 电网分级越来越多<sup>[2-3]</sup>。随着电力系统向大型化、复杂化及运行方式多样化的方向发展, 传统时间电流保护方式的保护性能受到了很大影响, 研究一种选择性良好且动作迅速的保护方法, 对于保证电力系统安全和可靠运行意义重大。

收稿日期: 2011-04-07

作者简介: 吴 韡(1982-), 男, 湖南株洲人, 湖南工业大学教师, 主要研究方向为电力电子技术及应用,

E-mail: 17690674@qq.com

由于神经网络具有高度的并行性、容错性及实时性,并具有自适应、自组织、自学习和联想记忆等能力,使它在智能保护方面有着独特优势<sup>[4-5]</sup>。BP (back propagation) 神经网络是目前使用较广泛的网络模型,其突出优点在于其具有较强的非线性映射能力和柔性的网络结构<sup>[6]</sup>。因此,本文选取BP神经网络人工智能方法,基于PSCAD/EMTDC建立系统仿真模型,并进行仿真研究。

## 1 传统的电力系统保护

传统舰船电力系统保护通常采用结合时间原则的三段式电流保护方法,该方法具有简单、可靠的特点,能满足快速切除故障的要求<sup>[7-8]</sup>。在三段式电流保护中,相邻两级开关的保护动作必须确保具有选择性要求。而在舰船电网中,电缆长度较短、阻抗较小,短路后,相邻两级保护开关处的短路电流值相近,这使得保护开关的动作电流值难以整定,必须结合一定的保护分断延时,才能实现保护的选择性。

为了进一步分析时间电流原则保护方法,这里以通用舰船电力系统为例进行说明,其保护电路如图1所示。

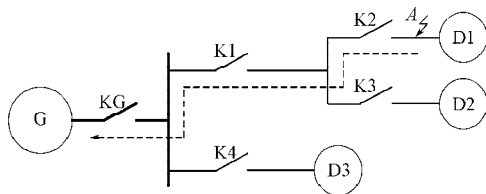


图1 通用舰船电力系统保护电路

Fig. 1 The protection circuit for general ship power system

图1中,当A点发生短路故障时,断路器KG, K1, K2流过的短路电流几乎相等,若仅依据电流原则整定,则3个断路器短路电流整定值一样,它们将同时分断,此时虽能实现A点故障隔离,但引起了系统大面积失电,严重影响舰船电网的正常运行。若结合时间原则,即从用电负载到供电电源方向断路器动作时间逐级递增,图1中断路器动作时间满足

$$t_{KG} > t_{K1} > t_{K2}, \quad (1)$$

此时,对于发生在A点的短路故障,断路器K2最先分断,K1, KG在延时等待过程中,若短路电流消失而不满足分断条件,断路器将继续保持闭合,以保证系统正常负载的供电。

上述时间电流原则方法是以牺牲保护的快速性为代价来实现保护的选择性。当系统保护级数较少时,延时时间较短,对处于短路状态的设备影响较小。如果系统级数过多,延时时间过长,则由于短路导致的电压跌落容易造成非故障电动机负载欠压

停机;同时,过长的延时时间还可能导致局部过热、对正常设备造成损坏。

舰船超大容量电力系统结构复杂、负载数目繁多且类型多样,从发电机到末端负载延时级数比较多(如发电机、母联、中压变压器、配电中心、分配电板、配电箱等)<sup>[10]</sup>。若系统每级保护的延时时间设置为0.16 s,则处于延时最后一级的发电机断路器的最长延时可能接近1 s,这对发电机的绝缘、母线热稳定性、电动机负载等都是一个严峻的考验,一旦处置不合理,极有可能带来大面积正常负载失电、甚至全船失电的灾难性后果。因此,研究一种选择性良好且动作迅速的舰船超大容量电力系统保护方法,对保证超大容量电力系统的生命力、可靠性和安全运行及提高舰船战技术水平意义重大。

## 2 基于BP神经网络的智能保护方法

### 2.1 BP神经网络的基本原理

多层前馈神经网络的反向误差传播训练算法<sup>[11]</sup>(可简称为BP算法)首先是由Werbos在他的博士学位论文中提出,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2为典型BP网络结构图。

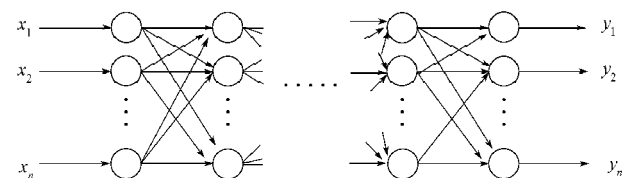


图2 BP网络结构示意图

Fig. 2 The diagram of BP network structure

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,则转换函数表达式为

$$f(x) = 1 / (1 + e^{-x}), \quad (2)$$

即含1个隐层的MLP (multilayer perceptron) 网络能以任意精度逼近任何有理函数<sup>[12]</sup>。其它资料研究也表明,一个3层(输入层、隐含层和输出层)的BP网络就能实现任意精度的非线性函数逼近<sup>[13]</sup>。所以,在实际应用中,一般采用只含1个隐层的3层BP网络就能达到目的。

假设3层BP网络的输入层节点为 $x_i$ , 隐含层节点为 $y_j$ , 输出层节点为 $z_l$ 。则隐含层输出为

$$y_j = f\left(\sum_i w_{ji}x_i - \theta_j\right), \quad (3)$$

式中:  $w_{ji}$  为输入层与隐含层节点间的网络权值;

$\theta_j$  为隐含层的阈值。

输出层的输出为

$$z_i = f\left(\sum_j v_{ij} y_j - \theta_i\right), \quad (4)$$

式中:  $v_{ij}$  为隐含层节点与输出节点间的网络权值;

$\theta_i$  为输出层的阈值。

输出节点误差为

$$E = \frac{1}{2} \sum_i (t_i - z_i)^2 = \frac{1}{2} \sum_i \left( t_i - f\left(\sum_j v_{ij} \cdot f\left(\sum_i w_{ji} x_i - \theta_j\right) - \theta_i\right) \right)^2, \quad (5)$$

式中  $t_i$  为目标输出。

输入层节点误差  $\delta_i$  为

$$\delta_i = (t_i - z_i) \cdot f'\left(\sum_j v_{ij} y_j - \theta_i\right), \quad (6)$$

隐含层节点误差  $\delta_j$  为

$$\delta_j = f'\left(\sum_i w_{ji} x_i - \theta_j\right) \cdot \sum_i \delta_i v_{ij}, \quad (7)$$

式中  $f'(\cdot)$  为  $f(\cdot)$  的导数。

## 2.2 BP神经网络的训练过程

本文设计神经网络的实现算法步骤如下:

**步骤1** 编码ANN(artificial neural network)参数, 据网络泛化能力设立适应度函数, 随机产生  $M$  个串。

**步骤2** 解码GA(genetic algorithm)串, 得到描述ANN模型的参数组合  $P$ , 用  $P$  中的隐层神经元数目构成具有一定结构的ANN。

**步骤3** 在此结构的ANN中和其它解码确定的参数组合下, 按一定方法初始化网络权值, 并对训练样本采用BP神经网络来学习网络权, 满足一定误差后结束; 再计算验证样本训练产生的均方根误差, 以此来评价所构成的ANN结构。

**步骤4** 根据适应度值, 进行GA操作, 即选择、交叉和变异。

**步骤5** 重复步骤2~4, 直到找出适应度最大的串, 并解码成ANN。

**步骤6** 在GA所得最佳ANN参数组合下, 用BP神经网络对其权重进一步学习, 最后确定全部权重。

**步骤7** 得到最终优化后的神经网络(包括神经网络的结构、最终的权重和其它参数)后, 结束。

## 2.3 综合电力系统智能保护仿真

本文采用基于BP神经网络智能保护方法实现综合电力系统的保护。具体方法是: 通过采集智能保护区域内的特征量信号作为BP神经网络的输入,

用神经网络识别结果指示智能保护区域内的开关动作, 为验证该方法的有效性和正确性, 本文基于PSCAD/EMTDC进行了仿真研究。

### 2.3.1 仿真模型及参数

基于PSCAD/EMTDC搭建交流辐射型仿真系统, 如图3所示, 具体参数见表1。其中BG1为发电机到主配电板断路器, Brk1~Brk5为配电区开关,  $F_1 \sim F_6$  为故障点。

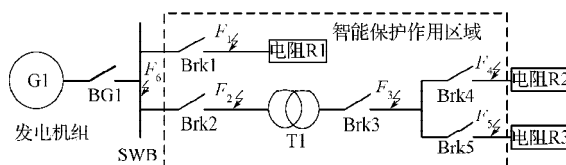


图3 交流辐射舰船电力系统示意图

Fig. 3 The diagram of AC radiation ship power system

表1 仿真模型主要参数

Table 1 The main parameters of simulation model

| 元件名称      | 参数类型  | 参数值          |
|-----------|-------|--------------|
| 发电机组 (G1) | 额定功率  | 5 kW         |
|           | 额定线电压 | 0.38 kV      |
|           | 功率因素  | 0.8          |
| 变压器 (T1)  | 额定容量  | 1.2 kVA      |
|           | 漏抗    | 0.1 p.u.     |
|           | 变比    | 1:1          |
| 电阻负载 (R1) | 欧姆    | 242 $\Omega$ |
| 电阻负载 (R2) | 欧姆    | 242 $\Omega$ |
| 电阻负载 (R3) | 欧姆    | 242 $\Omega$ |

### 2.3.2 综合电力系统网络开关动作策略

因本文主要研究配电网的保护, 故这里只考虑配电网区域  $F_1 \sim F_5$  短路故障。据配电网故障位置形成相应的开关动作策略, 并基于断路器次序 Brk1, Brk2, Brk3, Brk4, Brk5, 确定目标编码如表2。

表2 故障类型编码表

Table 2 The coding table of fault type

| 系统运行情况    | 故障类型                       | 断路器<br>对应编码 | 断路器<br>动作情况 |
|-----------|----------------------------|-------------|-------------|
| 系统正常运行    | —                          | 00000       | —           |
| $F_1$ 点短路 | F1ABC, F1AB,<br>F1AC, F1BC | 10000       | Brk1 断开     |
| $F_2$ 点短路 | F2ABC, F2AB,<br>F2AC, F2BC | 01000       | Brk2 断开     |
| $F_3$ 点短路 | F3ABC, F3AB,<br>F3AC, F3BC | 00100       | Brk3 断开     |
| $F_4$ 点短路 | F4ABC, F4AB,<br>F4AC, F4BC | 00010       | Brk4 断开     |
| $F_5$ 点短路 | F5ABC, F5AB,<br>F5AC, F5BC | 00001       | Brk5 断开     |

注: FiABC, FiAB, FiAC, FiBC ( $i=1 \sim 5$ ) 分别表示  $F_i$  点三相短路, AB, AC, BC 两相短路, 此外, 表中“—”代表断路器不动作, 表中没提及断路器为闭合状态。

### 3 仿真结果分析

一方面, 由于舰船电网常为低压三相三线不接地系统, 对线路的保护要求主要是正确反应三相和两相故障, 不要求反应单相故障, 故只需考虑三相短路和两相短路的故障情况。另一方面, 在故障发生后, 电流特征量更容易被测量, 能较好地反应故障是否发生, 其在故障识别灵敏度方面比电压更有优势, 用电流进行故障识别能提高保护的快速性。综上考虑, 文中采用两相电流有效值或三相电流最大值作为输入特征量进行BP故障模式识别。

#### 3.1 选取两相电流有效值为输入特征量

图4给出了模拟系统在 $F_5$ 点发生短路故障时, 相应断路器所在位置信号波形。系统设置的短路时间为系统正常运行后2 s。从图4中可看出, 短路后6 ms内系统就能准确判断出故障并使断路器断开。两相电流有效值作为神经网络输入时,  $F_5$ 点故障的BP网络识别结果见表3。

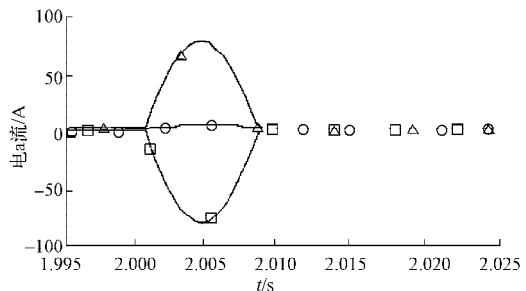
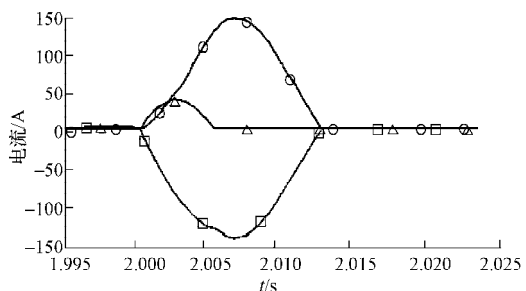
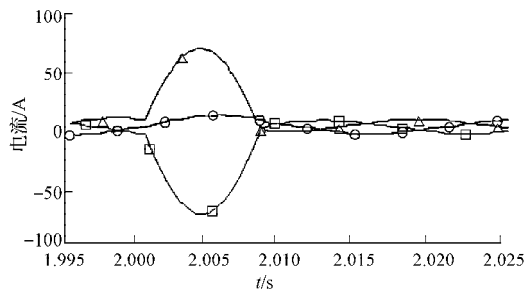
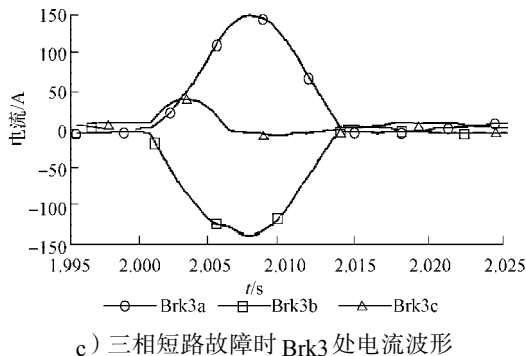
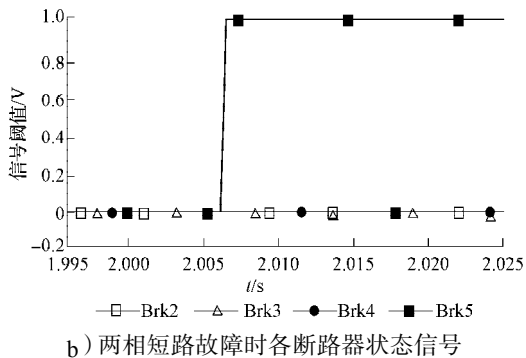
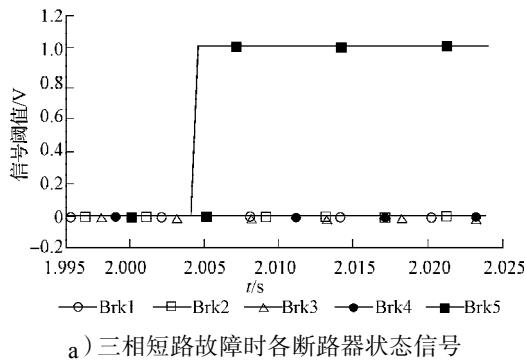


图4 两相电流有效值为输入时的信号波形

Fig. 4 The signal waveform when two-phase current effective value as NN input

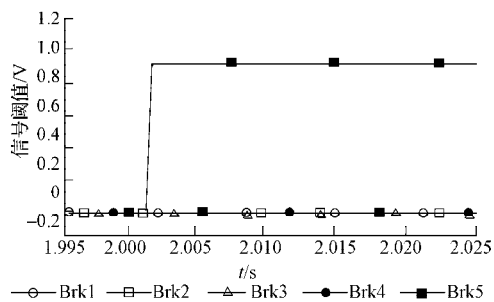
表3 两相电流有效值为输入时的识别结果

Table 3 The recognition results when two-phase current effective value as NN input

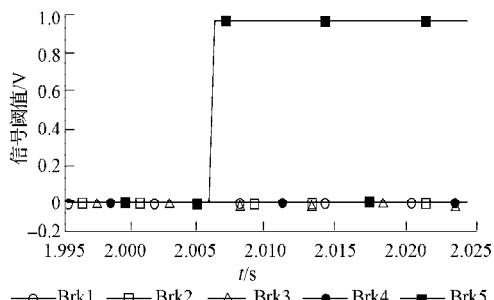
| 故障点      | 故障类型    | 目标输出  | 识别时间/ms | 识别结果    |
|----------|---------|-------|---------|---------|
| $F_5$ 短路 | 三相对称短路  | 00001 | 4.12    | Brk5 断开 |
|          | AB 两相短路 |       | 4.60    | Brk5 断开 |
|          | AC 两相短路 |       | 8.80    | Brk5 断开 |
|          | BC 两相短路 |       | 6.16    | Brk5 断开 |

#### 3.2 选取三相电流最大值为输入特征量

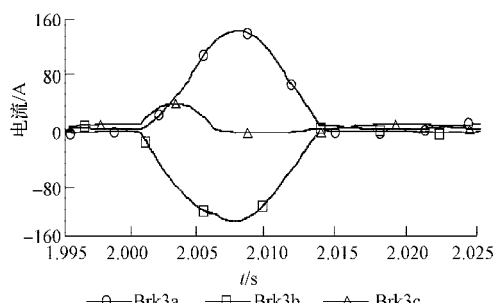
神经网络输入量越多, 即输入层神经元数目越多, 而输入层神经元数目的增加将导致神经网络判断识别决策用时增加。为进一步提高BP神经网络故障识别的快速性, 本节选取了三相电流最大值作为神经网络输入。同样实施 $F_5$ 点短路故障时, 相应断路器所在处信号波形如图5所示。



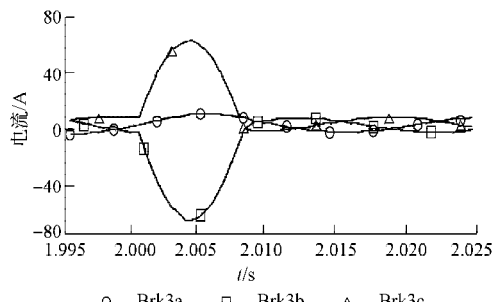
a) 三相短路故障时各断路器状态信号



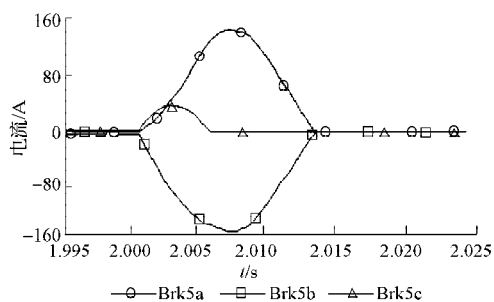
b) 两相短路故障时各断路器状态信号



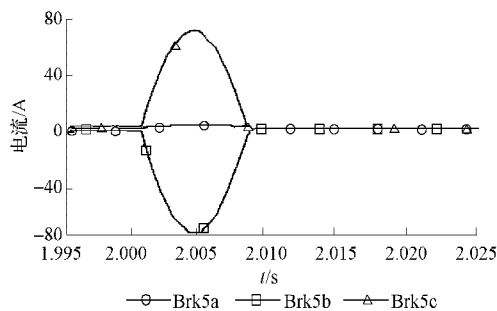
c) 三相短路故障时 Brk3 处电流波形



d) 两相短路故障时 Brk3 处电流波形



e) 三相短路故障时 Brk5 处电流波形



f) 两相短路故障时 Brk5 处电流波形

图5 三相电流最大值为输入时的信号波形

Fig. 5 The signal waveform when max three-phase current value as NN input

系统设置的短路时间为系统正常运行后 2 s。从图 5 可看出, 短路后 4 ms 内系统就能准确判断出故障并使相应断路器断开。与图 4 对比可知, 三相电流最大值作为神经网络输入可明显缩短智能保护判断决策所用时间。

相对两相电流有效值输入, 三相电流最大值输入方案使 BP 神经网络输入层的神经元数目减少了 1 倍, 这大幅减少了 BP 神经网络决策所用时间。此外, 相对两相电流有效值输入而言, 三相电流最大值作为输入时, 在三相、两相短路故障模式下的电流波形更相似 (见图 5), 尤其是神经网络故障识别用到的数据 (短路后 2.5~10 ms 间数据) 更接近。在相近的样本下, 神经网络训练更容易, 识别更准确。

三相电流最大值作为神经网络输入时, 对应  $F_5$  点故障的 BP 网络识别结果见表 4。

表4 三相电流最大值为输入时的识别结果

Table 4 The recognition results when max three-phase current value as NN input

| 故障点      | 故障类型    | 目标输出  | 识别时间 /ms | 识别结果    |
|----------|---------|-------|----------|---------|
| $F_5$ 短路 | 三相对称短路  | 00001 | 1.12     | Brk5 断开 |
|          | AB 两相短路 |       | 1.60     | Brk5 断开 |
|          | AC 两相短路 |       | 4.36     | Brk5 断开 |
|          | BC 两相短路 |       | 1.24     | Brk5 断开 |

对比表 3 和 4 可知, 采用三相电流最大值作为神经网络输入时, 系统故障识别和判断决策用时有所减少, 说明此方案能进一步提高保护的快速性。

从图 4 和 5 还可看出,  $F_5$  点短路后, 开关 Brk5 迅速断开, 隔离了  $F_5$  点的短路故障, 而此时其它开关 (如 Brk3) 一直保持闭合, 保证了其它负载不失电, 提高了综合电力系统的连续供电水平。仿真结果表明, 采用 BP 神经网络智能保护方法较好地实现了选择性保护。

## 4 结语

本文以典型舰船综合电力系统输配电网络为例, 基于 BP 神经网络, 提出了一种以电流特征量作为输入, 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。研究表明, BP 神经网络智能保护方法为舰船综合电力系统保护方案提供了一种可借鉴的途径, 为智能保护硬件的进一步开发打下了基础。采用 BP 算法进行系统保护, 可满足保护的灵敏性、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。智能保护将成为电力保护系统发展的主流趋势。

## 参考文献:

- [1] 李 麟, 沈 兵, 庄劲武. 舰船电力系统[M]. 武汉: 海军工程大学出版社, 2003: 12.  
Li Lin, Shen Bing, Zhuang Jingwu. Ship Power System [M]. Wuhan: Naval Engineering University Press, 2003: 12.
- [2] 郑华耀. 船舶电气设备及系统[M]. 大连: 大连海事大学出版社, 2005: 278-285.  
Zheng Huayao. Marine Electrical Equipment and System [M]. Dalian: Dalian Maritime University Press, 2005: 278-285.
- [3] 马伟明, 吕 昊, 单潮龙. 舰船电力系统的电制[C]// 电工技术前沿问题学术论坛论文集. 北京: 中国电工技术学会, 2004: 124-127.  
Ma Weiming, Lü Hao, Shan Chaolong. Electricity Regulations for Shipboard Power System[C]//Academic Forum Proceedings on Frontier Issues of Electrical Technology. Beijing: China Electrotechnical Society, 2004: 124-127.
- [4] 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.  
Ma Weiming. Integrated Power Systems: Trend of Ship Power Development[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2002, 14(6): 1-5.
- [5] 甄洪斌, 张晓锋. 舰船交流电力网络短路电流计算[J]. 海军工程大学学报, 2004, 16(3): 15-19.  
Zhen Hongbin, Zhang Xiaofeng. Short-Circuit Current Calculation for Naval Alternating Current Loop Power Network[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2004, 16(3): 15-19.
- [6] 郝 鹏, 刘维亭, 庄肖波. 船舶电力系统短路计算及仿真[J]. 华东船舶工业学院学报: 自然科学版, 2003, 17(5): 11-15.  
Hao Peng, Liu Weiting, Zhuang Xiaobo. Calculation Research and Its Simulation of Short-Circuit Current on Combat Marine Power System[J]. Journal of East China Shipbuilding Institute: Natural Science Edition, 2003, 17(5): 11-15.
- [7] 王 琦, 马伟明. 未来船舶电力系统保护策略研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2009, 36(1): 50-54.  
Wang Qi, Ma Weiming. Discussions about the Protection Schemes in a Future Shipboard Power System[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2009, 36(1): 50-54.
- [8] 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, 1994: 130-141.  
He Jiali, Song Congju. Principle of Power System Relay Protection[M]. Beijing: China Power Press, 1994: 130-141.
- [9] 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 Dingtai. The Technical Development of the Integrated Power System for Surface Ships[J]. Ship Science and Technology, 2005, 27(5): 5-12.
- [10] Gong Yanfeng, Huang Yan, Schulz N N. Integrated Protection System Design for Shipboard Power System[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(6): 1930-1936.
- [11] 董长虹. Matlab 神经网络与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 143-149.  
Dong Changhong. Matlab Neural Network and Application [M]. Beijing: China National Defence Industry Press, 2005: 143-149.
- [12] 倪效勇, 王典洪, 张红剑. 一种适于函数逼近的混合RBF专家网络快速算法[J]. 微电子学与计算机, 2008, 25(2): 17-20.  
Ni Xiaoyong, Wang Dianhong, Zhang Hongjian. Quick Algorithm to Mixture of RBF Experts Network for Function Approximation[J]. Microelectronics and Computer, 2008, 25(2): 17-20.
- [13] 葛哲学, 孙志强. 神经网络理论与 MATLAB R2007 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 270-272.  
Ge Zhexue, Sun Zhiqiang. Neural Network Theory and MATLAB R2007 Implementation[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007: 270-272.

(责任编辑: 李玉珍)