

# 基于小波和分形的直流系统环网支路接地故障检测研究

李冬辉,李晟,王金凤

(天津大学电气与自动化工程学院,天津 300072)

**摘要:** 分析了低频信号注入法在直流系统环网支路接地故障检测中的局限性,提出了利用小波变换与分形理论进行环网支路接地故障检测的新方法:首先对环网支路的采样电流信号进行基于双正交  $\text{bio}_n 2$  样条小波的 2 次多分辨率分析,提取出环网电流信号的低频段成分特征,再计算 2 尺度(底层)空间概貌系数  $a_2$  曲线的分形维数,以识别不同情况下的环网接地故障。该方法解决了环网中谐波电流对低频信号注入法的影响。经数值仿真分析,验证了此方法的可行性和有效性。

**关键词:** 直流系统; 环网; 小波; 分形; 盒维数

**中图分类号:** TM77 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)16-0017-05

## 0 引言

发电厂、变电所的直流系统是操作信号和保护装置的电源。直流系统的绝缘水平关系着电网、发电厂和变电站的安全运行。支路接地是直流系统最常见的故障,当发生一点接地时必须进行处理,否则一旦发生另一点接地,就有可能引起信号回路、控制回路、继电保护装置等的误操作,甚至会酿成大范围的停电事故。

目前,低频信号注入法是常用的直流系统接地故障检测方法之一,即向直流系统正负母线注入低频正弦电压信号,通过计算接地电阻值来判断出故障支路。但是该方法在实际应用中,存在一定的局限性,容易受到直流系统支路中存在的对地分布电容,环网谐波电流,纹波电压和其它干扰的影响<sup>[1-3]</sup>。本文针对直流系统中环网故障检测这一问题进行分析探讨,在低频信号注入法的基础上提出利用小波与分形进行环网故障检测的方法。该方法通过计算小波分解后不同尺度上信号盒维数的大小及其变化,反应信号在不同频段内的不规则程度和复杂度,从信号的非平稳性角度分析,克服了谐波电流的影响,实现直流系统接地故障支路的准确定位。

本文首先对环网支路进行了分析,其次对小波与分形理论的相关内容进行了简单介绍,然后具体地阐述了环网故障检测方法的步骤,最后给出了仿真结果。通过对仿真结果进行分析,验证了该方法在环网接地支路故障检测中的可行性和有效性。

基金项目:天津市自然科学基金资助项目(033601511)

## 1 环网支路对直流系统接地故障检测的影响

为了保证重要的控制、信号回路供电可靠,发电厂、变电站直流系统中多采用环网方式供电,如图 1 所示。假设当支路 1 与直流电网负母线相连的负极电缆出现故障时,通过支路 2,3 均可以保证支路 1 的回路完整,不出现开环断路。因此,支路 1 的供电可靠性大大增加。

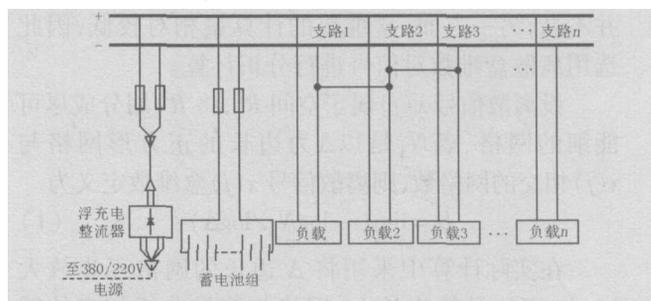


图 1 直流系统中的环网

Fig 1 Sample of loop net in DC system

但是由于整流电源纹波电压的影响,流经四段导线的电流包含着幅值和相位各不相同的谐波分量,四段导线中的复阻抗也各不相同,因此其上形成的压降各不相等,如图 2。

在环网运行时,可以等效为四个电压源和四个复阻抗串连在同一回路中,因此会形成由谐波分量组成的环流。这种情况下,电流互感器一次侧的谐波成分非常大,很可能会达到饱和,饱和程度不同,信号变形也不同。因此一般的检测方法难以将各种信号区分开,分辨出支路环流和接地电阻电流,往往

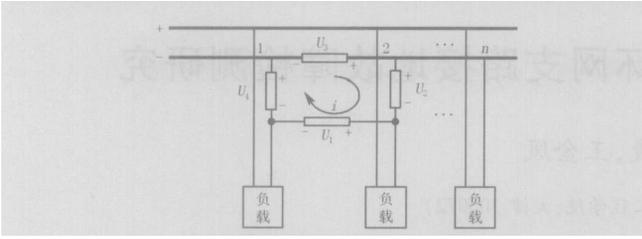


图 2 环网中的谐波电流

Fig 2 Harmonic current in loop net

在发生接地时把环网支路误选出来,而真正的接地故障支路却无法选出。因此,寻找一种更加有效的检测方法非常必要。

## 2 分形维数和小波多分辨率分析

### 2.1 分形理论与分形维数

分形一词是由 Mandelbrot 在 1975 年提出的,来源于拉丁文 fractus,原意具有不规则和破碎的含义。分形自创立起到现在一直没有一个严格的数学定义。现在普遍认为局部与整体之间存在某种自相似性的集合为分形<sup>[4]</sup>。分形在处理复杂表面时具有很强的优势。

分形维数是对分形进行定量描述的参数,它描述了分形的复杂程度。计算分形维数的方法有多种,例如:相似维数,豪斯道夫维数,信息维数和盒计数维数等。对环网电流信号进行分析,其复杂程度并不高,另一方面,盒维数的计算量相对较低,因此选用离散盒维数对信号进行分析计算。

设离散信号  $x(j)$  属于空间  $R^2$ , 将  $R^2$  划分成尽可能细的网格,若  $N$  是以  $k$  为边长的正方形网格与  $x(j)$  相交的网格数,则离散信号  $x(j)$  盒维数定义为

$$D = \lim_{k \rightarrow 0} (-\log V_k / \log k) \quad (1)$$

在实际计算中采用将  $k$  边长的网格逐步放大  $k, k \in Z^+$ , 计算边长  $k$  网格与信号曲线相交的网格数  $N$ , 盒维数  $D$  通过计算在无标度区内做出的  $(-\log k, \log V_k)$  双对数图的斜率求得。由于盒维数  $D$  是线性方程斜率的相反数,在  $D$  值确定的情况下,它由  $\log k$  和  $\log V_k$  的关系唯一确定。设  $[k_1, k_2]$  为  $k$  值的有效取值区间,则  $k_2 - k_1 + 1$  为无标度区间所对应的  $(-\log k, \log V_k)$  点对数量。用最小二乘法可求得:

$$D = \frac{(k_2 - k_1 + 1) \sum_{k=k_1}^{k_2} (\log k \log V_k) - \sum_{k=k_1}^{k_2} \log k \cdot \sum_{k=k_1}^{k_2} \log V_k}{(k_2 - k_1 + 1) \sum_{k=k_1}^{k_2} \log^2 k - (\sum_{k=k_1}^{k_2} \log k)^2}$$

(2)

由于环网电流信号的横向为时间尺度,纵向为信号幅值,采用正方形网格相当于只用其中的一个尺度来对时间和振幅两个物理量进行测量,从物理意义上来说无法反映出各自的标度特性,因此采用矩形网格对信号曲线进行覆盖。矩形网格不会掩盖信号曲线的周期性和振幅特征。这样在不同尺寸矩形网格下,分别计算与信号相交的网格数,得到的盒维数更加合理。

### 2.2 小波理论的多分辨率分析

1988 年 S Mallat 提出了多分辨率的概念,从空间角度上说明了小波的多分辨率特性。小波空间可以构成  $L^2(R)$  的正交分解。设  $\phi_{j,k}(t)$  为  $W_0$  上的小波基函数,那么其二进伸缩和整数平移序列  $\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} (2^{-j}t - k)$  构成了  $W_j$  空间的正交基。对于任意函数  $f(t) \in V_0$ , 我们可以将它分解为细节部分  $W_1$  和大尺度逼近部分  $V_1$ , 然后将大尺度逼近部分  $V_1$  进一步分解,如此重复就可得到任意分辨率上的逼近部分和细节部分,这就是多分辨率分析的框架<sup>[5,6]</sup>。

基于多分辨率分析,将信号在时间和频率的多个尺度上进行分解,可提取出所需的特征。假设采样频率为  $f_s$ , 则经过  $\{h_n\}$  低通滤波器作用后得到平滑部分,它是频率介于  $[0, f_s/4]$  的分量;而经过  $\{g_n\}$  高通滤波器作用后得到细节部分,它是频率介于  $[f_s/4, f_s/2]$  的分量。再对平滑部分重复上面的操作,则可得到  $2^j$  尺度上的平滑和细节部分。

由于环网支路中接地电流信号和无接地的电流信号在低频段的特征区别比较明显,容易实现两种信号的鉴别。因此对最底层的平滑部分进行重构,以获得滤除噪声和高次谐波后的支路电流信号。

## 3 环网故障检测方案

基于小波和分形的环网接地故障检测步骤如下:

1) 基于小波变换的环网支路电流频带划分

对环网支路电流进行基于样条小波的  $2^j$  次多分辨率分析,对底层的概貌系数  $a_2$  进行分析,提取环网支路电流低频段信号成分的特征。

选用 bior2.2 双正交样条小波,其分解低通滤波器 ( $h_d$ ), 分解高通滤波器 ( $g_d$ ), 重构低通滤波器 ( $h_r$ ), 重构高通滤波器 ( $g_r$ ) 分别为:

$$h_d = [0, 0, 0.3536, 0.7071, 0.3536, 0]$$

$$g_d = [0.1768, 0.3536, -1.0607, 0.3536, 0]$$

0.176 8, 0

$h_r = -0.176 8, 0.353 6, 1.060 7, 0.353 6,$   
 $-0.176 8, 0$

$g = 0, 0, 0.353 6, -0.707 1, 0.353 6, 0$

## 2) 计算离散信号分形盒维数

采用矩形网格覆盖曲线,设网格横向最小网格宽度为采样时间  $t$ ,纵向最小网格高度为  $A$ ,则矩形网格可为  $k \cdot t \times k \cdot A$ 。

### a $k$ 值的确定

因为实际的信号为采样间隔为  $t$ 的采样信号,其波形表示方式是将相邻数据用直线相连,所以  $k$  小于 1 没有意义。如果近似认为信号的主周期为  $T$ ,则在一个周期内的数据点数为  $[T/t] + 1$  ( $[\cdot]$  表示取整),如果  $k \cdot t$  大于信号半周期,作为正负交替的信号其周期性将不明显,所以可以确定  $k$  的最高取值为  $[T/2 \cdot t] + 1$ 。根据上面的分析  $k$  的取值范围为:

$$1 \leq k < \left\lceil \frac{T}{2 \cdot t} \right\rceil + 1 \quad (3)$$

### b 矩形网格纵向 $A$ 的确定

$A$  应能体现振幅尺度的特征,它不可能小于整个分析信号相邻数据点间的最小幅值差  $A_{\min}$ ,也不应大于信号的最高峰值  $A_{\max}$ ,又应当和最高峰值有一定的关系。在分析环网电流信号时设定  $A$  为  $A_{\max}$  与 2 倍  $k$  最高取值的比:

$$A = \frac{A_{\max}}{2k_{\max}} \quad (4)$$

### c 与曲线相交的盒数量计算

设矩形网格为  $k \cdot t \times k \cdot A$ ,环网电流信号的离散序列为  $s(n \cdot t)$ , ( $n = 1, 2, \dots, N$ ) 则整个波形曲线可被时间坐标分为  $M = \left\lceil \frac{N-1}{k} \right\rceil$  个等间距区间,曲线所处的平面被分隔成  $M$  个竖状条格;在  $\frac{N-1}{k}$  的余数非零时,还将有一个  $N - M \cdot k + 1$  个数据  $s(m \cdot t)$ , ( $m = M \cdot k, M \cdot k + 1, \dots, N$ ) 组成的窄条格,该窄条格下与曲线相交的网格数为:

$$N_k = \left\lceil \frac{\max(s(m)) - \min(s(m))}{k \cdot A} \right\rceil + \phi(\text{rem}(\max(s(m)) - \min(s(m)), k \cdot A)) \quad (5)$$

$(m = M \cdot k, M \cdot k + 1, \dots, N)$

式中:  $[x]$  表示取整,  $\text{rem}(u, v)$  表示  $u, v$  相除取余,  $\phi(x)$  取值定义为:

$$\phi(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \end{cases} \quad (6)$$

时间轴上的第  $p$  ( $p = 1, 2, \dots, M$ ) 个等间隔区间内,与曲线相交的网格数为:

$$N_{p,k} = \left\lceil \frac{\max(s(h)) - \min(s(h))}{k \cdot A} \right\rceil + \phi(\text{rem}(\max(s(h)) - \min(s(h)), k \cdot A)) \quad (7)$$

$(h = k(p-1) + 1, k(p-1) + 2, \dots, kp + 1)$

在  $k$  的计算取值范围内 ( $k_1 \leq k \leq k_2$ ),改变  $k$  值得到一系列  $N_{p,k}$  和  $N_k$ ,则在尺寸为  $k \cdot t \times k \cdot A$  的矩形网格下,与信号波形曲线相交的总网格数为:

$$N_k = \sum_{p=1}^M N_{p,k} + N_k \quad (8)$$

根据公式 (1) 对数据  $(\log k, \log N_k)$  进行线性方程回归就得到信号曲线的矩形盒分形维数。

## 4 仿真结果与分析

在直流电网环网支路模型中取一条环网支路对无接地和接地两种情况下的电流信号进行分析。负载为 300 的环网支路,在无接地情况下,仅有 20  $\mu\text{F}$  的对地电容,电流互感器得到发生饱和的支路电流  $i_1$ ;支路在有 100 接地电阻,20  $\mu\text{F}$  对地电容情况下,电流互感器得到发生饱和的支路电流  $i_2$ 。

对环网支路电流  $i_1, i_2$  分别进行基于双正交  $\text{bior2.2}$  样条小波的 2 次多分辨率分析,得到 2 尺度(底层)空间的概貌系数  $a_2$ 。对信号进行频率为 1 000 Hz 的采样,根据采样定理,离散采样信号所能反映的最高频率为 500 Hz。进行 2 次多分辨率分解后,2 尺度空间的概貌系数  $a_2$  反映的是 0 ~ 125 Hz 的信号分量。图 3、图 4 分别为环网无接地支路电流  $i_1$  及环网接地支路电流  $i_2$  的 2 次多分辨率分析。

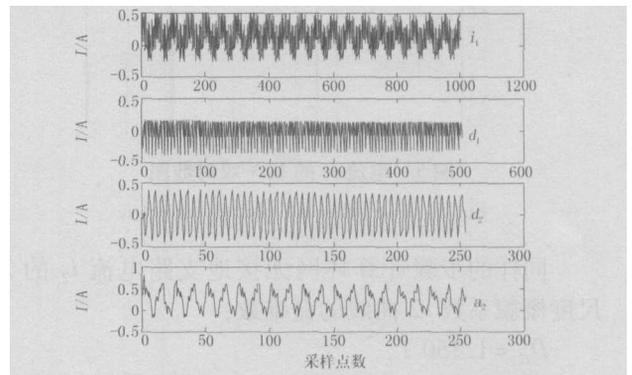


图 3 环网无接地支路电流  $i_1$  的 2 次多分辨率分析

Fig 3 Wavelet representation of branch current  $i_1$  at resolution 2

由图 3、图 4 可以分析出,由于谐波环流和电流互感器饱和的影响,环网信号各种谐波分量明显增

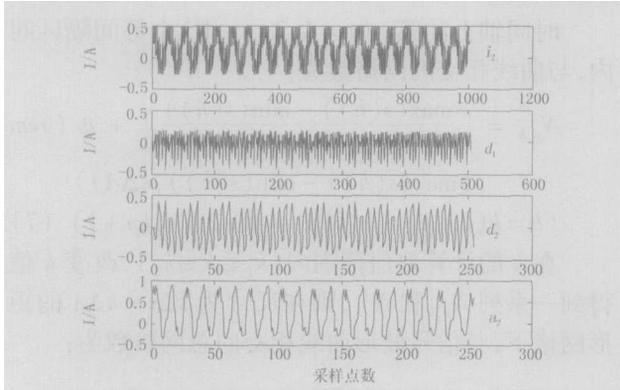


图 4 环网接地支路电流  $i_2$  的 2 次多分辨率分析

Fig 4 Wavelet representation of branch current  $i_2$  at resolution 2

多。环网接地支路电流  $i_2$  在 0 ~ 125 Hz 频段内 20 Hz 低频注入分量占主要成分;环网无接地支路电流  $i_1$  在 0 ~ 125 Hz 频段内除了 20 Hz 低频注入分量,其它谐波成分也比较明显,曲线光滑性差。

计算 2 尺度概貌系数  $a_2$  对信号的采样频率为  $1000/2^2 = 250$  Hz,电流信号的主频率为 20 Hz,由公式 (3) 可计算电流信号的无标度区间为  $1 < k < 6$ 。计算环网无接地支路电流  $i_1$  的 2 尺度概貌系数  $a_2$  曲线的盒维数:

$$A = \frac{A_{\max}}{2 \times k_{\max}} \frac{7.963 - (-1.656)}{2 \times 6} = 801$$

$$D_{i1} = 1.2734$$

$k$  不同取值下,对应不同的与曲线相交的网格数  $N$ ,其双对数曲线如图 5。

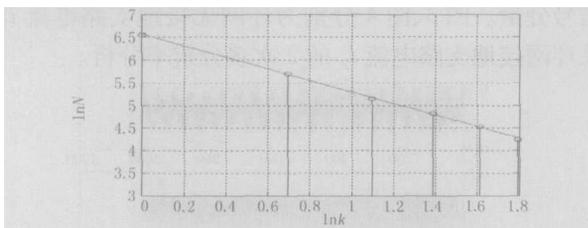


图 5 电流  $i_1$  的  $k, N$  双对数图

Fig 5 The  $\ln k - \ln N$  plot of current  $i_1$

同样的步骤计算环网无接地支路电流  $i_2$  的 2 尺度概貌系数  $a_2$  曲线的盒维数:

$$D_{i2} = 1.1501$$

$k$  不同取值下,对应不同  $N$  的双对数曲线如图 6。

依次改变环网支路 (支路 1) 的接地电阻值,重复以上的计算步骤,再在直流电网环网支路模型中取另一条环网支路 (支路 2),忽略支路对地电容,依次改变支路接地电阻值,得到表 1 的盒维数计算结果。

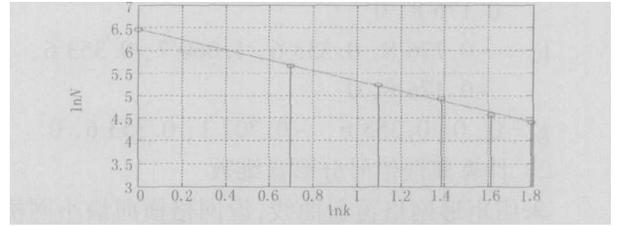


图 6 电流  $i_2$  的  $k, N$  双对数图

Fig 6 The  $\ln k - \ln N$  plot of current  $i_2$

表 1 不同接地电阻值下的盒维数

Tab 1 Box dimension with variation of grounding resistance

支路 1		支路 2	
接地电阻 /	盒维数	接地电阻 /	盒维数
100	1.15011	100	1.12059
500	1.18018	500	1.14193
1K	1.23158	1K	1.18142
10K	1.26748	10K	1.3435
20K	1.26966	20K	1.34926
100K	1.27021	100K	1.36543
1M	1.27338	1M	1.36681

对表 1 进行分析可以看出,随着接地电阻的增大,电流低频段分量曲线的分形盒维数也在逐渐增大。可以分析在支路存在接地的情况下,信号低频段分量中 20 Hz 注入信号所占的比重较大,虽然由于电流互感器的饱和使信号发生畸变,在多分辨率分析进行频带划分后,仍能提取出注入的低频成分;当接地电阻变大后,注入的低频成分较小,淹没在由于环网存在而产生的谐波环流中,再加之互感器的饱和使信号畸变,多分辨率分析进行频带划分后,低频段信号也含有大量的谐波成分,信号低频段分量曲线光滑性差、复杂度增加,盒维数变大。

## 5 总结

本文通过对提出的环网支路接地故障检测方法的验证、分析,可以发现随支路接地电阻的变化,其相应的分形维数也存在相应的变化趋势。在实际运行中,可以根据不同的环网支路及其对地电容情况,计算在接地电阻经验值 20 k 时的支路低频段分形盒维数,以此作为检测判断标准,通过实时检测电网的绝缘状况,对照各自支路的接地盒维数标准,实现环网支路接地状况的实时判断。

## 参考文献:

- [1] 李冬辉,蔡旭,邹宝兰. 微机直流系统绝缘监视装置及测量方法的研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2000, 14 (3): 37-39.

LIDong-hui, CAIXu, ZOU Bao-lan Research on Insur-

- lation Monitoring Device and Measuring Method for DC System Based on Microcomputer[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2000, 14(3): 37-39.
- [2] 李冬辉,史临潼. 小波理论在直流系统接地故障检测中的应用[J]. 继电器, 2004, 32(21): 29-32  
LI Dong-hui, SHI Lin-tong Method for Detecting DC System Grounding Fault Based on Wavelet Transform[J]. Relay, 2004, 32(21): 29-32
- [3] 李晓明,梁军,张沛云,等. 直流系统接地点探测新原理[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(13): 55-56  
LI Xiao-ming, LIANG Jun, ZHANG Pei-yun, et al A New Method of Detecting Grounding Point in DC System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(13): 53-56
- [4] 张济忠. 分形[M]. 北京:清华大学出版, 2001. 1-398  
ZHANG Ji-zhong Fractal[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001. 1-398
- [5] Mallat S A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: the Wavelet Representation[J]. IEEE Trans Pat A-nal Mach Intell, 1989, 11(7): 674-693.
- [6] Mallat S Multiresolution Approximation and Wavelet Orthonormal Base of  $L^2(R)$  [J]. Trans Amer Math Soc, 1989, 315: 69-87.
- [7] 彭玉华. 小波变换与工程应用[M]. 北京:科学出版社, 2002 1-137.  
PENG Yu-hua Wavelet Transform and Project Application[M]. Beijing: Science Press, 2002 1-137.

收稿日期: 2006-04-06; 修回日期: 2006-05-25

作者简介:

李冬辉(1962-),男,博士,副教授,主要从事电力电子应用、计算机控制、楼宇自动化等方面的研究工作;

李晟(1981-),女,硕士研究生,主要从事电力系统、楼宇自动化方面研究工作; Email: palmli@sohu.com

王金凤(1980-),女,硕士研究生,主要从事嵌入式系统、楼宇自动化方面的研究工作。

## Research on grounding fault detection in loop net of DC system using wavelet and fractal theory

LI Dong-hui, LI Sheng, WANG Jin-feng

(School of Electrical Engineering & Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The paper analyzes the limitation of "low frequency injection" method for the purpose of detecting grounding fault branches in loop net in DC system, and advances a new scheme based on the wavelet transform and fractal theory. First, the scheme implements the frequency band division for current signal using multi-resolution analysis based on the bior2.2 wavelet at resolution 2 to extract the feature of low frequency band, and then calculates the fractal dimension of the scale coefficient curve  $a_2$  to judge the insulation condition of the branch, referring to change trends of fractal dimensions. This scheme overcomes the influence of harmonic current in loop net. Simulation results prove that this new method is sufficient enough for the identification of the grounding fault branches.

This project is supported by National Natural Science Foundation of Tianjin (No. 033601571).

**Key words:** DC system; loop net; wavelet; fractal; box dimension

(上接第 16 页 continued from page 16)

## Research and simulation of bus protection with function approximation ability

ZHAN Hong-xia<sup>1</sup>, LUO Jian<sup>2</sup>, LEI Xia<sup>1</sup>

(1. College of Electricity and Information, Xihua University, Chengdu 610039, China; 2. The Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** For a long time, the application of ANN to relay protection is based on classification ability. Enough fault samples are crucial for the performance of the protection, but limited sample data can be actually available for the training of ANN model. In order to overcome the drawback, bus protection based on ANN model with function approximation ability is presented in this paper. Function approximation is one of the most important ability of ANN, a function object can be replaced by an ANN model with function approximation ability. Physical object of bus protection is a function with certain relation between inputs and outputs, which can be replaced by an ANN model, i.e. can be approximated by an ANN mathematical model. Based on the ANN model trained under normal bus operation conditions, the inner or outer fault can be distinguished successfully.

**Key words:** bus-bar protection; artificial neural network; function approximation; simulation