

有源电子式互感器故障诊断技术的研究与应用

王涛, 张宁, 刘琳, 杨超

(国网淄博供电公司, 山东 淄博 255095)

摘要: 作为继电保护和自动化装置的信息源头, 电子式互感器的运行性能直接影响整个电网, 由于受到环境和电磁辐射的影响, 其输出信号的稳定性是智能变电站普及推广应用的瓶颈。通过对电子式互感器运行中的故障类型进行分类, 采用分段函数模拟不同的故障类型, 利用小波理论分析对故障信号进行除噪处理, 再通过小波分解对除噪后的信号进行故障检测定位, 归纳为小波-神经网络的故障诊断分析方法。该方法能够直接判别漂移偏差故障、固定偏差故障和变比偏差故障, 对提高智能变电站运行可靠性具有前瞻性的意义。

关键词: 电子式互感器; 故障诊断; 小波变换; 人工神经网络; 分段函数

Research and application of electronic transformer fault diagnosis

WANG Tao, ZHANG Ning, LIU Lin, YANG Chao

(State Grid Zibo Electric Power Company, Zibo 255095, China)

Abstract: As the information source of relay protection and automation devices, the operation performance of electronic transformer will directly affect the grid. Influenced by environment and electromagnetic radiation, the stability of its output signal becomes the bottleneck of popularization and application for intelligent substation. By means of classifying the fault types of electronic transformer in operation, the different fault types with the piecewise function are simulated and fault signal with wavelet theory analysis is denoised. Then, by means of fault detection and location of the denoised signal with wavelet decomposition, a method of wavelet-neural network for fault diagnosis analysis is deduced which can directly distinguish the drift deviation fault, fixed deviation fault and transformation ratio deviation fault. It will be a prospective significance for improving the operation reliability of the intelligent substation.

Key words: electronic transformer; fault diagnosis; wavelet transform; artificial neural network; piecewise function

中图分类号: TM77

文章编号: 1674-3415(2015)18-0074-06

0 引言

随着电力系统继电保护的发展、设备自动化程度的提高, 以及光纤传感、光纤通信技术的普及应用, 智能化变电站有逐渐取代常规变电站的趋势, 而电子式互感器作为智能化变电站的重要组成因子, 成为了研究与分析的热点。传统的电磁式互感器因原理的局限呈现出一系列自身无法克服的问题^[1]:

(1) 电磁式互感器具有绝缘结构较为复杂, 体积庞大、重量和价格较高的特点。这是由于传统的电磁式互感器对绝缘的要求高, 且绝缘介质在运行中易发生极化、电导、损耗和击穿等现象。

(2) 在电流很大且动态范围较小的情况下, 互感器饱和的情况容易出现, 增加了保护装置识别故障的难度。

(3) 易产生铁磁谐振, 增加设备的损坏率。严重时容易造成零序电压互感器烧毁或者爆炸, 给电网运行带来隐患。

(4) 传输信号的电缆, 会耦合电磁干扰, 影响传输的精度。当二次系统接地不良时易造成保护的误动作。

(5) 通用的绝缘材料具有易燃易爆的安全隐患。这一系列问题使得传统的电磁式互感器越来越不适应现代电力系统自动化、数字化的发展, 严重阻碍了数字化变电站的建设及国家智能电网战略目标的实施, 从另一方面促进了电子式互感器这一新成果在实际工程中的逐步推广应用。

目前, 对电子式互感器的研究主要侧重在测量的精度、运行稳定性等方面, 而对故障诊断方面的研究并不成熟, 当电子式互感器发生渐变故障时,

故障信号在时域表现为跨度大且局部特征不明显, 很难直接用于故障判断^[2]。作为所有继电保护和自动化装置的信息源头, 电子式互感器采集数据的正确与否影响着整个电网的安全并直接影响变电站内部的二次系统的正常运行和功能实现。因此探究可行、准确的电子式互感器(EVT)的故障诊断分析方法势在必行。

1 电子式互感器(EVT)故障诊断研究现状

当前, 大部分电子式互感器的结构中大量使用光学和电子器件, 该结构特点导致其必须长期承受电磁干扰的影响, 因此长期工作在恶劣的环境中, 难免会产生各种各样的问题和故障。产生这些问题和故障的原因有很多, 内因表现在制造原理(电子、光学元器件的工作寿命及承受电磁干扰能力)、工艺组合(电磁隔离是否有效)、运行环境(长期温度变化及污秽影响)等多方面。由于现在已被大量应用的电子式互感器的运行时间不长, 并未达到全寿命周期的年限, 因此虽然从目前情况看其具有一定的故障率, 但是需要利用相应的故障诊断方法进行深入探究。

互感器的故障种类繁多, 按故障变化的程度可将其归纳为渐变性和突发性故障^[3-4]。国内外对电子式互感器的故障检测和诊断工作还处于初级研究阶段, 相关研究成果较少。与新型电子式互感器相比, 传统的电磁式互感器故障诊断方法的研究成果较多, 根据两种互感器特性的相似性, 可以对传统互感器的故障分析方法进行借鉴和参考, 下面对这些方法进行介绍。

1.1 基于解析数学模型的故障诊断方法

这种诊断方法是发展较早, 应用较为广泛的故障诊断方法^[5], 需要对研究对象进行深入分析, 建立准确的数学模型, 按一定的方法对测量信息进行诊断。根据产生的残差形式不同, 利用数学模型解析的故障分析诊断方法可将其分为状态估计法^[6]、等价空间法^[7]和参数估计法^[8], 这几种方法的优缺点比较如表 1 所示。

1.2 基于信号处理的故障诊断分析方法

这种诊断方法利用信号分析理论对信号的时频信息特征进行深层次的提取, 并利用这些特征向量实现对故障源的定位。基于信号处理的诊断分析方法有^[9-10]:

(1) 基于 Kullback 信息准则的故障分析诊断方法。此种方法是度量系统的变化程度为信息准则, 要在满足比较条件的情况下, 与所设定的阈值进行比较, 进行诊断。

表 1 基于解析数学模型的一些故障诊断方法的特点比较

Table 1 Comparison between different analytic diagnosis

methods		
方法	优点	缺点
状态估计法	对系统的输入信号无严格要求; 实用性好。	检测出来的故障有限; 可能会出现误报和系统灵敏度降低。
参数估计法	能够准确定位受控对象中受损元件的受损程度和物理位置; 物理意义明显, 故障分离优势突出; 能检测出被控对象的故障情况。	收敛效果差, 在诊断结果方面易产生较大延时; 需要外加激励信号, 实用效果差。
等价空间法	鲁棒性优势明显; 能够分离出任意一种传感器故障; 可检测同一时刻出现的多个故障; 计算工作量小, 方法简便、准确; 可以实时获取故障信息。	诊断结果会存在一定程度上的误差。

(2) 基于自适应滑动窗格形滤波器的故障诊断分析方法。判别准则是该滤波器所产生的残差序列, 以是否为零均值或者固定方差作为判别条件。若完全符合两个判别条件, 则为正常状态; 否则为故障状态。

(3) 基于小波理论变化的故障诊断分析等方法。其利用尺度-时间分析方法, 它的优势是能够多分辨率分析、并能实现可综合分析信号的时频特性。离散小波和连续小波可对原始信号、干扰信号和信号突变的情况进行甄别。

1.3 基于知识的故障诊断方法

这种方法以知识处理技术为基础, 在知识的层次上, 实现了辩证和数理逻辑的集合。具体的方法有:

(1) 基于专家系统的方法^[11]。该方法依靠的专家诊断知识库和规则库是基于丰富的专家经验和相关准则的基础上建立的。该方法运用设计的微机程序, 以推理的形式来模仿专家解决问题的过程, 对常见的一些故障进行专家诊断。

(2) 基于模糊的方法^[12]。模糊数学作为一种经典的数学方法, 在解决具有模糊性质的问题上有着理想的作用。基于模糊的故障诊断方法利用模糊集合论中的隶属度定义和模糊判断矩阵, 来解决特征量和构造模式之间模糊关系。

(3) 基于神经网络的方法^[13]。神经网络具有很多优点, 如自组织、自适应、联想记忆、并行处理等, 在处理非线性系统的故障诊断方面有很大优势, 通常将其与其他方法结合, 来取得更有效的结果。

(4) 基于故障树的方法。故障树就是特定事件与其他子部件故障之间逻辑关系的结构图。这种方法

既考虑了规则模型,也考虑了定量模型的特点,可有效解决实际问题。

综上可知,可用于对电子式互感器的故障诊断方法有很多种,均有各自的原理结构、适应范围和优缺点。如何建立合理的故障诊断系统,国内的个别学者进行了一些研究,文献[14]通过建立的故障诊断模型,证明了小波分析可以很有效地辨别一次系统的故障和扰动信号。文献[15]提出利用残差故障信息对 ECT 渐变故障进行辨识,并提出基于网络图论的 ECT 故障定位综合矩阵算法来实现故障定位。文献[16]将小波在检测信号和分形理论在信号提取方面的优势相结合,提出基于小波-分形理论电子式互感器故障诊断方法,可有效剔除噪声信号影响,有极高的故障信息挖掘能力,可有效地诊断故障。

2 有源电子式电压互感器的故障类型

事实上,有源电子式互感器的故障是相当复杂的,为便于理论上的描述和进一步分析,将实际中的故障大致划分成两类包括:渐变类故障和突变类故障。渐变类故障主要是漂移偏差性故障;突变类故障可以划分为:变比偏差性故障,固定偏差性故障,完全失效性故障等。上述各种故障中,完全失效故障较容易被发现,而其他三种故障则较难以被发现,因此本文主要对这三种故障的诊断技术进行研究。下面就对这三种故障的数学模型进行分析。

(1) 漂移偏差故障

该种故障发生的主要原因是电子式互感器中的光学器件和电子器件的性能受温度等环境变化的影响较大,一旦持续长时间运行,其性能将会下降,严重影响输出的信号。

本文用公式对该种故障进行模拟,如式(1)所示。

$$f_i = a(t - T_s) \quad (1)$$

式中: T_s 为故障的初始时刻; a 为一常数; t 为故障发生后的任意一时刻。

为了更好地描述故障信号,采用如下分段函数来表示,如式(2)所示。

$$f(t) = \begin{cases} K_m (\sin wt + a_0), & t < T_s \\ K_m (\sin wt + a_0) + at, & t \geq T_s \end{cases} \quad (2)$$

假设 T_m 为一个时间窗,则 T_s/T_m 可以控制故障在一个时间窗内发生的时间,由 a/K_m 可以控制偏差的严重程度。该故障的表现形式如图 1 所示,且图中故障时刻对应于采样点在 400 处。

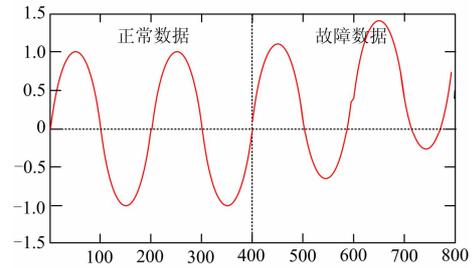


图 1 漂移偏差故障

Fig. 1 Drifting deviation fault

(2) 固定偏差故障

固定偏差故障中故障测量值与正确值相差某一恒定的常数,即如式(3)所示。

$$f_i = b \quad (3)$$

式中, b 为一常数。

其分段函数如式(4)所示。

$$f(t) = \begin{cases} K_m (\sin wt + a_0), & t < T_s \\ K_m (\sin wt + a_0) + b, & t \geq T_s \end{cases} \quad (4)$$

同样的, b/K_m 用来控制偏差的严重程度,其故障表现形式如图 2 所示。

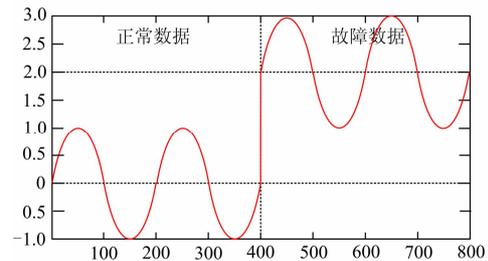


图 2 固定偏差故障

Fig. 2 Fixed deviation fault

(3) 变比偏差性故障

如果变比发生突发性变化,互感器输出信号波形也会随之畸变,因此称之为变比偏差性故障,其分段函数如式(5)所示。

$$f(t) = \begin{cases} K_{m1} (\sin wt + a_0), & t < T_s \\ K_{m2} (\sin wt + a_0), & t \geq T_s \end{cases} \quad (5)$$

式中, K_{m1} 和 K_{m2} 表示发生变比故障前后输出信号的不同幅值。

该故障表现形式如图 3 所示。

3 基于小波神经网络的有源电子式互感器的故障诊断

3.1 基于原始信号进行的小波理论分析^[17]

小波变换后的小波系数会伴随设备发生故障状态的不同而发生相应的变化。本文就是基于这一特

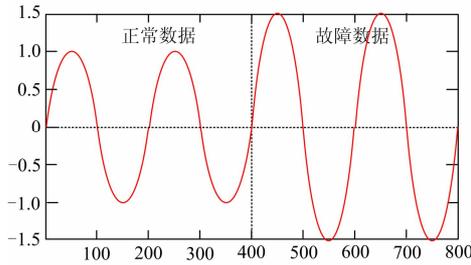


图3 变比偏差故障

Fig. 3 Transformation ratio deviation fault

性和神经网络的非线性映射能力,建立了小波系数变化到设备故障状态的映射关系表,进而利用小波变换来获得含有设备故障状态的特征向量,从而确定故障类型。本文选取的小波函数是‘db3’,信号分解层数为3层,故障特征向量是分解后获得的A3、D3、D2、D1的小波系数,处理的步骤如下。

(1) 利用小波理论分解原始信号,得到各分解层相应的小波系数,如式(6)所示。

$$x_j = W(s) \quad j=1,2,\dots,4 \quad (6)$$

式中:原始信号是 S ;各层小波系数离散值为 x_j 。

(2) 将小波系数每一分解层的绝对值求和,如式(7)所示。

$$E_j = \sum_{k=1}^n |x_{jk}| \quad j=1,2,\dots,4 \quad (7)$$

(3) 特征向量的构成

用求和后的小波系数构造所需的特征向量。构造如式(8)所示。

$$T = [E_1, E_2, E_3, E_4] \quad (8)$$

(4) 归一化处理,如式(9)

$$E = (\sum_{j=1}^4 E_j^2)^{1/2} \quad (9)$$

$$T' = T / E$$

向量 T' 即将特征向量归一化。结合上述内容,特征向量在设备不同故障状态下的信息体现将各具特征。

3.2 BP 模式神经网络设计^[18]

BP 模式神经网络的设计主要是对其输入、输出、激励函数、初始权值、隐含层节点数等数据进行设计。前文已述及对激励函数和权值的设计,下面将主要针对节点数的设计。

(1) 输入层节点数

本文所采用的神经网络的输入信号的特征向量维数与输入信号节点数相同。

(2) 输出层节点数

输出层输出的数据是诊断的结果,因此,设备划分的故障类型个数与节点的个数相同,且应该具备一一对应的特性。本文当中只考虑被测设备发生单一性的故障,同时该网络输出结果的训练目标向量应为 $[0, 0, 0, 1]$, $[0, 1, 0, 0]$, $[1, 0, 0, 0]$, $[0, 0, 1, 0]$,分别表示电子式电压互感器所处固定正常状态、固定偏差性故障、漂移偏差性故障和变比偏差性故障四种情况。

(3) 隐含层节点数

隐含层节点数的确定通常以经验为主,并未有明确的理论依据。通常利用实验方法来确定,如果网络结构中的输出和输入节点数、权值、激励函数均不发生变化,通过改变隐含层节点的个数来对该神经网络进行训练,通过比较泛化能力和训练结果等指标来确定一个最优的节点个数,且由于权值初始化的随机性容易导致输出结果的波动性,采用每种情况下训练10次取平均结果作为训练的最终效果。本文选取隐含层节点数为5时,整个网络最优。

3.3 仿真实验

本文针对电子式电压互感器经常出现却不容易发现的漂移性偏差、变比性偏差、固定性偏差三种故障进行诊断,提出了基于小波理论分析-神经网络的故障诊断分析方法。该故障诊断的分析过程是先利用小波除噪除掉原始故障信号中的噪声,最后再利用构造的小波神经网络对发生的故障类型进行识别。下面分别针对三种故障进行仿真验证,仿真时间设为 $T_m=0.08$ s,采样频率为10 kHz,且认为电子式电压互感器发生单一故障,即不同时发生两种及两种以上故障,故障发生时刻设定为 $T_s=0.5T_m=0.04$ s。

(1) 漂移偏差故障

由于互感器长期工作于电网电磁干扰的环境下,漂移偏差性故障是最易出现的一种故障,即其输出信号会产生一定的漂移。实际环境造成的漂移偏差很复杂,本文为了简化研究,认为其缓慢稳定变化。

先利用小波分析对故障信号进行除噪^[19]和故障定位,其波形如图4所示。

由图4可以看出,经过小波除噪处理后,含有噪声的原始信号去除了噪声,变得光滑有效;而通过小波分解后得到的各频带的小波分解波形可以看出除噪后的信号在第400个采样点处有奇异值,即在 $t=0.04$ s时发生了故障,这与之前设定的故障发生时间吻合,这说明基于小波分析的故障检测与定位是有效的。

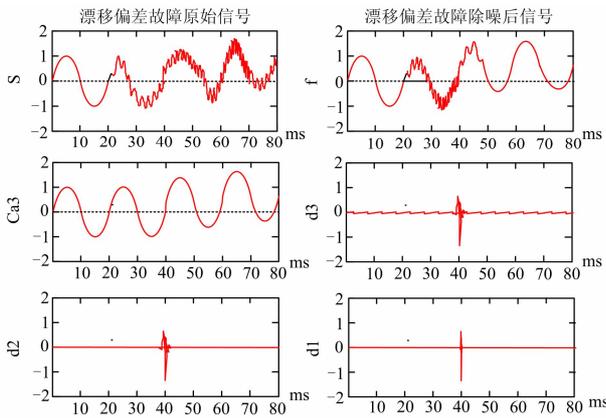


图 4 漂移偏差故障诊断仿真

Fig. 4 Simulation result for drifting deviation fault diagnosis

(2)固定偏差故障

进行固定偏差性故障的诊断过程与漂移偏差故障的相同，先除噪和故障检测定位，得到波形如图 5 所示。

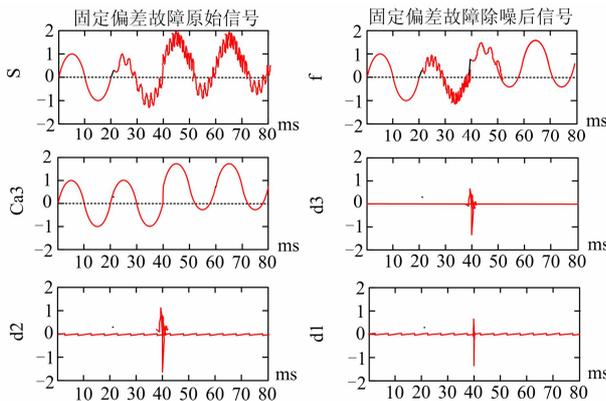


图 5 固定偏差性故障诊断仿真

Fig. 5 Simulation result for fixed deviation fault diagnosis

由图 5 可知本文提出的小波-神经网络能够有效检测定位和识别判断电子式电压互感器的固定偏差故障。

(3)变比偏差故障

处理过程同上，得到波形如图 6 所示。

由图 6 可知本文提出的小波-神经网络对电子式电压互感器的变比偏差故障能够有效检测定位和识别判断。

综上所述，本文提出的小波理论-神经网络能够较好地进行电子式电压互感器固定偏差性故障、漂移偏差性故障以及变比偏差性故障的识别判断和检测定位，仿真验证了该方法对电子式电压互感器故障诊断的有效性。

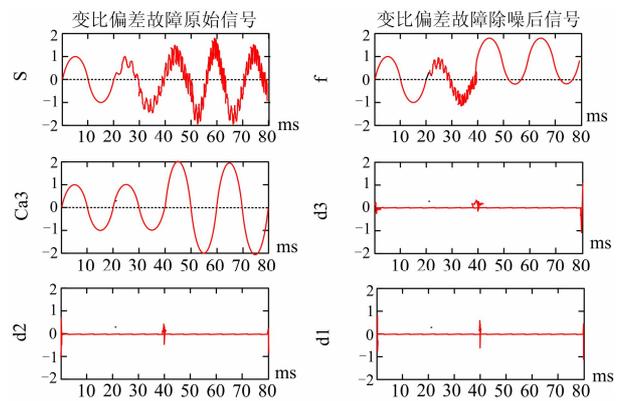


图 6 变比偏差性故障诊断仿真

Fig. 6 Simulation result for transformation ratio deviation fault diagnosis

4 结论

本文针对有源电子式互感器的故障特征进行了分析，提出了基于小波神经网络的有源电子式电压互感器故障诊断模型，并构造了用于电子式电压互感器故障识别的小波神经网络，对电子式电压互感器的三种最常见的故障类型均进行了故障诊断仿真分析，验证了本文中提出的诊断分析方法有效、可行，为有源电子式互感器故障定位提供了有效的诊断手段。

参考文献

[1] 张建超, 刘晓波, 张飞, 等. 电子式高压电力互感器的发展现状及在电力系统中的应用[J]. 高压电器, 2009, 45(4): 106-110.
ZHANG Jianchao, LIU Xiaobo, ZHANG Fei, et al. Electronic type instrument transformer and its present technical development manner[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(4): 106-110.

[2] 王洪彬, 唐昆明, 徐瑞林, 等. 数字化变电站电子式互感器渐变故障诊断方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 53-58.
WANG Hongbin, TANG Kunming, XU Ruilin, et al. Diagnosis of soft fault of electronic transformer in digital substation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 53-58.

[3] MOULTON C H. Light pulse system shrinks high voltage protection device[J]. Electronics, 1965, 38: 71-75.

[4] BRAUN A, ZINKERNAGEL J. Optoelectronic electricity meter for high-voltage lines[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1973, 22(4): 394-399.

[5] SASANO T. Laser CT and laser PD for EHV power

- transmission lines[J]. *Electrical Engineering in Japan*, 1973, 93(5): 91-98.
- [6] LAURENSSE I J, KOREMAN C G A, RUTGERS W R, et al. Applications for optical current and voltage sensors [J]. *Sensors and Actuators*, 1989, 17(1): 181-186.
- [7] CHATREFOU D. Optical sensors in high voltage substations, part one: ALSTOM Products and IPP applications, & part two: protection application, digital interface, EDF 420 kV experiment[J]. *Montrouge, France*. (2001-11).
- [8] 冯建勤, 王庆铭, 丁莉芬, 等. 电子式电压互感器的研究现状和展望[J]. *变压器*, 2010, 47(11): 40-42.
FENG Jianqin, WANG Qingming, DING Lifen, et al. Development of electronic transformer[J]. *Transformer*, 2010, 47(11): 40-42.
- [9] 李开成, 叶妙元. 从电磁式电压互感器到光学式光纤电压互感器[J]. *变压器*, 1995, 32(11): 6-8.
LI Kaicheng, YE Miaoyuan. From Electromagnetic voltage transformer to fiber-optic voltage transformer[J]. *Transformer*, 1995, 32(11): 6-8.
- [10] IEC. IEC60044-7 instrument transformers part 7 electronic voltage transformers[S]. 1999.
- [11] IEC. IEC60044-8 instrument transformers part 8 electronic current transformers[S]. 2002.
- [12] GB/T20840. 7-2007 互感器 第7部分: 电子式电压互感器[S].
GB/T20840. 7-2007 transformer part 7: electronic potential transformer[S].
- [13] GB/T20840. 8-2007 互感器 第8部分: 电子式电流互感器[S].
GB/T20840. 8-2007 transformer part 7: electronic current transformer[S].
- [14] HOLM U, SOHLSTROM H, BROGARDH T. Measurement system for magneto-optic sensor materials[J]. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1984, 17(10): 885.
- [15] NIENHUIS G, WOERDMAN J P, KUŠČER I. Magnetic and mechanical Faraday effects[J]. *Physical Review A*, 1992, 46(11): 70-79.
- [16] FEIL H, HAAS C. Magneto-optical Kerr effect, enhanced by the plasma resonance of charge carriers[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(1): 65.
- [17] 熊小伏, 杨雪东, 刘年. 基于站间信息的电子式互感器故障协同诊断方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(21): 80-89.
XIONG Xiaofu, YANG Xuedong, LIU Nian. A collaborative diagnosis method of electronic transformer fault based on the inter-substation information[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 42(21): 80-89.
- [18] 孙帆, 施学勤. 基于 MATLAB 的 BP 神经网络设计[J]. *计算机与数字工程*, 2007(8): 124-126.
SUN Fan, SHI Xueqin. Design of BP networks based on MATLAB[J]. *Computer & Digital Engineering*, 2007(8): 124-126.
- [19] 周冬旭, 李晓明, 杨玲君, 等. 一种电子式互感器现场校准的新算法[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(10): 133-137.
ZHOU Dongxu, LI Xiaoming, YANG Lingjun, et al. A novel algorithm of field calibration of electronic transformers[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(10): 133-137.

收稿日期: 2014-12-01; 修回日期: 2015-01-30

作者简介:

王涛(1982-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事供电公司运维检修工作; E-mail: zb_wangtao@sina.com.cn

张宁(1982-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事档案管理工;

刘琳(1988-), 女, 本科, 工程师, 主要从事变电检修工作。

(编辑 张爱琴)