

基于模糊输入的BP-ART2混合神经网络在电力变压器故障综合诊断中的应用

高如新,王福忠,冉正云

(焦作工学院,河南 焦作 454000)

摘要: 根据模糊理论和神经网络理论,提出了变压器故障诊断的新方法。根据DGA(dissolved gas analysis)法、电气试验法及外部故障特征法,建立了基于模糊输入的BP-ART2混和神经网络对电力变压器故障进行综合诊断。仿真结果表明本方法能有效提高变压器故障诊断正确率。

关键词: 模糊控制; BP神经网络; ART2模型; 故障诊断; 电力变压器

中图分类号: TP273;TM41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)05-0015-04

0 引言

电力变压器是电力系统中重要的设备之一,对电力系统的安全运行起着举足轻重的作用。搞好变压器的运行维护,特别是故障诊断工作,对于提高电力系统安全运行可靠性具有非常重要的作用。

DGA的出现和逐渐成熟,给变压器故障诊断带来了许多方便。利用DGA来判断变压器故障的方法有许多种,如罗杰斯法、特征气体法、三比值法、电协研法等,然而这些方法本身具有一定程度的不完善性,仅基于DGA并不能对故障进行准确评判,不能准确定位。结合电气试验,如测直流电阻、绝缘电阻、吸收比等,再加上一些故障特征,如温度升高、油位下降等,综合进行评判,可以有效提高诊断质量。

BP神经网络具有较强的非线性逼近能力,能进行故障模式识别,还能进行故障严重程度评估和故障预测,应用很广,但它对异常类故障处理能力低,不具备增量学习功能。ART2模型是一种自组织的网络模型,采用无监督的竞争学习规则,不存在BP算法对样本知识的强烈依赖性问题,能正确识别出异常类故障,且识别速度快。但是,该模型是通过聚类来完成模式分类任务的,它不能进行故障严重性评估和发展趋势预测。把BP神经网络和ART2模型结合起来,将有监督算法和无监督算法集成起来,用模糊量作为输入,构成一种新的模糊神经网络来对变压器进行诊断,可以取得良好诊断效果^[1]。

1 电力变压器常见故障及其特点^[3]

变压器故障有很多种,一些常见的故障及其故

障特点如下:

- (1) 分解开关接触不良。直流电阻差值大,特征气体中既含有 H_2 又含有 CO ,且 CH_4 或 C_2H_4 含量高;
- (2) 绕组匝间短路。变比偏差大,直流电阻差值大, H_2 和 C_2H_2 含量高,含有 CO ;
- (3) 有载分接开关箱漏油。温度过高,油位下降率高;
- (4) 过热性故障。 CH_4 和 C_2H_4 含量高,还可能含有 CO 和 CO_2 ,温度较高;
- (5) 绝缘老化。介质损耗 $\tan \delta$ 较大,绝缘电阻过低,特征气体中 CO 、 CO_2 和 CH_4 较多;
- (6) 严重受潮。介质损耗 $\tan \delta$ 较大,水分含量大,吸收比小于1.3,绝缘电阻过低,特征气体中 H_2 含量大;
- (7) 油中局部放电。 H_2 、 C_2H_2 、 CH_4 和 CO 含量高;
- (8) 断线故障。直流电阻差值大, H_2 含量最大。

变压器常见故障很多,故障原因也很多。把故障的多种特征提取出来,送到故障诊断模型中,进行分析、综合,最后可得出故障诊断结果。

2 故障诊断模型—多重模糊神经网络的建立

用模糊神经网络进行变压器故障诊断时,考虑到实际应用中样本多,数据差异大,采用一个网络非常复杂,而且收敛性差,诊断准确率低,因此,本文根据某些特征指标和一定的规则组合,将整个样本分为若干个相互独立的子样本集,建立多重子模糊神经网络,如图1所示。

基金项目: 河南省攻关课题(0124140156)

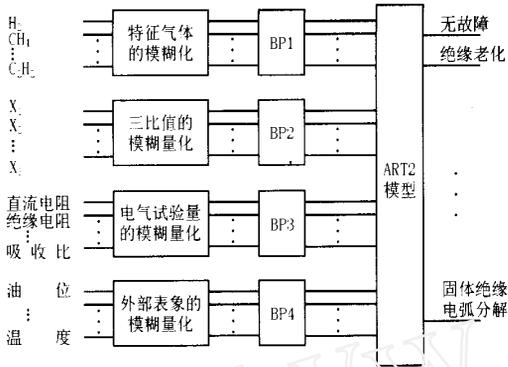


图1 模糊输入的BP-ART2混合神经网络

Fig.1 BF-ART2 hybrid neural network based on fuzzy input

图中 x_1, x_2, x_3 为表 2 中所述的三比值法输入值。

第一块模糊神经网络采用特征气体,如 H_2 、 C_2H_2 、 CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_6 、 CO 及 CO_2 等测定值作为输入,产生一系列的输出;第二块模糊神经网络采用气体三比值法作为输入,产生一系列的输出;第三块模糊神经网络可采用直流电阻、绝缘电阻、吸收比、极化指数、变比、介质损耗 $\tan \delta$ 、水分等电气试验测定值作为输入;第四块模糊神经网络可采用油位、油温度等测定值作为输入。输入模糊化后,送入 BP 神经网络,经处理后,产生一系列结果,送入 ART2 模型中,再经处理后产生诊断结果,输出量有:正常、绝缘老化、绕组匝间短路、分接头接触不良、绝缘击穿、严重受潮、油中局部放电、有载分接开关箱漏油、断线、过热性故障、铁心短路、固体绝缘电弧分解等。

混合神经网络中 BP 神经网络为如图 2 所示三层结构:

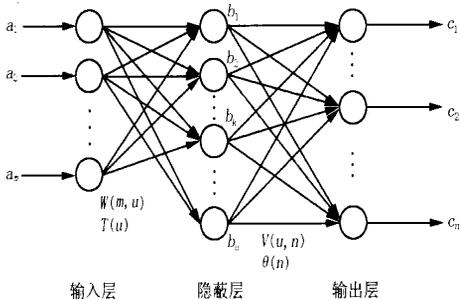


图2 三层前馈型 BP 神经网络

Fig.2 Three-layer-feedforward-type BP neural network

BP1 为 3 层,其输入量为 7 个,第 1 到 3 输入量为 H_2 、总烃及 C_2H_2 测定量,第 4 到 7 输入量为 C_2H_2 、 H_2 、 CH_4 与 C_2H_4 在总烃中所占的比例。隐含层 20 个,输出量为 6 个,分别表示一般过热 (>

500)、局部放电、火花放电、电弧放电与过热兼电弧放电;BP2 也为 3 层,其输入量为 3 个,隐含层 12 个,输出量为 9 个,其输入、输出含义见表 2。BP1、BP2 两类在现场已有应用,因此,其输入、输出及隐含层神经元数量是由经验给出的。由于现场条件的限制,BP3、BP4 输入量、输出量的个数及隐含层数由根据现场实际所能提供的测定数据来确定,仿真中采用介质损耗 $\tan \delta$ 、直流电阻、吸收比、油位、水分的测量值作为输入,网络也采用三层结构,其输入层、隐含层、输出层分别为 3、10、6 和 2、8、5。BP 神经网络采用文献[5]所述的学习算法。由于 BP 算法存在收敛速度慢、学习精度低等问题,本文采用加动量因子及不等权、半随机初始解等方法加以解决,以加快收敛速度。

ART2 神经网络的结构如图 3 所示^[9]:

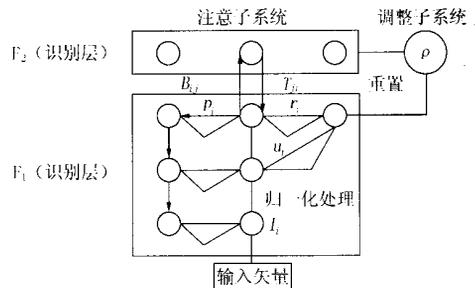


图3 典型的单 ART2 神经网络结构

Fig.3 Configuration of typical single ART2 neural network

自适应共振理论 ART2 具有快速的学习算法,且无需大量样本,在故障在线识别领域有很大的应用潜力。图 3 是典型的单 ART2 神经网络结构,适用于模拟向量输入。网络可分为注意子系统和调整子系统两部分,前者完成输入向量的相似度匹配及竞争选择,后者检验输入模式与长期记忆模式之间的相似度是否达到满意的程度,并根据检验结果作出相应处理,成功或重置。提取的特征向量 I_i 输入 F_1 层(比较层)。在 F_1 层通过向量归一化和非线性变换经迭代得到稳定的中层模式 u ,并经 p 送入 F_2 层(识别层),由 F_2 层经竞争选择激活 F_2 层候选模式(本文中对应故障类型),得到系统的短期记忆。 F_2 层的输出经长期记忆加权后反馈回 F_1 层,反馈信息与 u 一起送入调整子系统,检验系统长期记忆模式与输入模式的相似程度,若通过相似程度检验,则可确定输入模式属于 F_2 层的候选模式,并按快速学习算法,一步完成权值的学习;若未通过检验,则强迫 F_2 层重置并选择下一输出节点,若所有的输出节点都不能通过匹配检验,则增加一个新的输出节点

即另一新类。

在应用 ART2 时必须注意的是 (相似测度警戒限,为 0 到 1 之间的正数) 的选择。值决定了网络对输入模式进行分类的间隔大小,直接影响分类性能。若选得太小,分类粗糙,不能把不同故障类型区分开;若选得太大,分类又太细,则同一故障类型可能被划分到不同输出模式中,引起错分。的选择没有一定的规则,需要在具体应用中调整。本文中取 0.5 即可达到较满意的分类效果。ART2 网络参考了文献[10]所述的学习算法。

变压器故障诊断过程属于一个非平稳、非线性的随机过程。在学习阶段,通过对足够量的样本训练,逐层调整接点权重和阈值,直至误差达到精度要求。在工作期间,投入不同的测试样本,进行故障诊断模式识别,最终实时判别故障类型和故障可能发生的位置。

3 知识处理

3.1 特征气体的模糊知识表示

参考表 1,建立 H_2 、总烃(CH_4 、 C_2H_2 、 C_2H_4 、 C_2H_6 、 CO 、 CO_2)和 C_2H_2 的隶属函数 I_{aa1} 、 I_{aa2} 、 I_{aa3} ,其函数分布分别为:

$$I_{aa1}, I_{aa2} = \begin{cases} 0.005x & 0 & x & 100 \\ 0.01x-0.5 & 100 & x & 150 \end{cases} \quad (1)$$

$$I_{aa3} = \begin{cases} 1 & x & 150 \\ 0.2x & 0 & x & 0.1 \\ 1 & x & 3 \end{cases} \quad (2)$$

$$I_{ab1} = \begin{cases} 0 & 0 & x & 0.1 \\ 1 - e^{-0.5(x-0.1)^2} & 0.1 & x & 3 \end{cases} \quad (3)$$

$$I_{ab2} = \begin{cases} 1 & x & 3 \\ 0.5 & 0 & x & 0.1 \\ 0 & 0.1 & x & 3 \end{cases} \quad (4)$$

$$I_{ab3} = \begin{cases} 1 & x & 1 \\ 0 & 0 & x & 1 \\ 1 - e^{-(x-1)^2} & 1 & x & 3 \end{cases} \quad (5)$$

$$I_{ab3} = \begin{cases} 1 & x & 3 \end{cases} \quad (5)$$

表 1 氢、烃类气体特征划分

Tab. 1 Key-gas demarcation for hydrogen and hydrocarbon

成分	正常值	要注意值	故障值
H_2	100 以下	100 ~ 200	200 以上
总烃	100 以下	100 ~ 200	200 以上
C_2H_2	5 以下	5 ~ 10	10 以上

3.2 三比值法模糊知识表示

参照表 2,采用升半正态分布函数,可以对具有

较弱的数值持不敏感态度,而对足以淹没噪声的较大数值持较敏感态度。分布函数如式(1)~(5)所示。

表 2 三比值法故障特征

Tab. 2 Fault features of three-ratio method

$x_1 = \frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$x_2 = \frac{CH_4}{H_2}$	$x_3 = \frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	诊断结果
$x_1 < 0.1$	$0.1 \leq x_2 < 1$	$1 \leq x_3 < 3$	低温过热 (<150℃)
$x_1 < 0.1$	$x_2 \geq 1$	$x_3 < 1$	低温过热 (150 ~ 300℃)
$x_1 < 0.1$	$x_2 \geq 1$	$1 \leq x_3 < 3$	中温过热 (300 ~ 700℃)
$x_1 < 0.1$	$x_2 \geq 1$	$x_3 \geq 3$	高温过热 (>700℃)
$0.1 \leq x_1 < 3$	$x_2 < 3$	无关	过热兼电弧放电
$0.1 \leq x_1 < 3$	$x_2 < 1$	无关	高能量局部放电
$1 \leq x_1 < 3$	$x_2 < 0.1$	$1 \leq x_3 < 3$	火花放电
$x_1 \geq 3$	$x_2 \geq 1$	无关	过热兼低能放电
$x_1 \geq 3$	$x_2 < 1$	无关	低能放电

3.3 电气试验数据的模糊处理

3.3.1 直流电阻^[2]

测量直流电阻一般可用于分析断线、导线断股或脱焊、匝间短路、分接头接触不良等故障。GB 规定,一般各相测得值(要换算到 20 时的对应值)相互差值应小于平均值的 4%,线间测得的相互差值应小于平均值的 2%。实际的差值应与出厂试验记录的记录实测值相比较。

3.3.2 绝缘电阻、吸收比及极化指数^[2]

测量绕组绝缘电阻、吸收比及极化指数可以作为发现变压器绝缘击穿、大范围受潮故障的一个手段。按 GB 规定,绝缘电阻不应低于出厂试验值的 70%。吸收比 $k = R_{60} / R_{15} > 1.3$,认为变压器没有受潮现象。极化指数的状态见表 3。

表 3 极化指数与变压器绝缘状态的关系

Tab. 3 Relations between transformer insulation status

变压器绝缘状态	极化指数 (R_{10min} / R_{1min})
危险	< 0.1
不良	1.0 ~ 1.1
可疑	1.1 ~ 1.25
较好	1.25 ~ 2.0
好	> 2.0

3.3.3 介质损耗 $\tan \delta$ ^[3]

测量介质损耗 $\tan \delta$ 对于判断变压器绝缘老化,受潮等整体状况有一定作用。一般情下 $\tan \delta$ (要换算到 20℃ 时的对应值) 小于 3% 为良好,大于 3% 小于 6% 为要注意,大于 6% 说明不良。

3.3.4 水分^[4]

测量水分主要用来判断变压器受潮情况。一般

情况下水分小于 35 ppm 为良好,大于 35 ppm 小于 50 ppm 为要注意,大于 50 ppm 说明不良。

4 仿真

在对历年电力变压器有关技术刊物及相应资料

上公布的故障实例进行统计后,选取了经实际检验验证证明结论较明确的 811 台次故障变压器的数据,经随机选取后组成的训练样本集及检验样本集内各故障类型的分布情况见表 4。

根据本文所述的模型,判断结果如表 5 所示。

表 4 各种故障类型在样本集中的分布情况

Tab. 4 Distribution of fault types in training sample and verifying sample

故障类型	导电回路过热	导磁回路过热	涉及固体绝缘放电	不涉及固体绝缘放电	分接故障	引线故障	绕组低温故障	铁芯故障	露磁过热	围屏过热	匝间短路	引线闪络	悬浮放电	油中局放	分接开关渗漏
训练样本	209	186	93	91	117	78	14	129	57	23	36	34	61	21	9
检验样本	65	79	47	41	25	35	5	53	26	12	20	15	24	13	4

表 5 诊断结果

Tab. 5 Results of this diagnostic method

检验项目	分接故障	引线故障	绕组低温故障	铁芯故障	露磁过热	围屏过热	匝间短路	引线闪络	悬浮放电	油中局放	分接开关渗漏
待检样本	25	35	5	53	26	12	20	15	24	13	4
正判台数	20	27	4	47	20	10	17	12	21	10	3
正判率/%	80.0	77.1	80.0	88.7	76.9	83.3	85.0	80.0	87.5	76.9	75.0

由表 5 可见,基于模糊输入的 BP-ART2 混合神经网络用于电力变压器故障诊断的诊断正确率较高,对于诸如分接或引线等导电回路过热故障以及匝间短路或引线闪络等涉及固体绝缘的放电故障的诊断正确性方面有较明显的提高,这说明本方法用于变压器故障诊断确实能够取得较好的诊断效果。

5 结论

本文的目的是找到一种用于电力变压器故障诊断的新型有效方法,为此,采用 BP-ART2 混合神经网络用于此目的。该方法充分利用 BP 神经网络和 ART2 模型的优点,克服了各自的不足之处,对电力变压器故障诊断工作是一种新的尝试。仿真结果可以发现,应用此方法可以收到良好的效果。

参考文献:

- [1] 刘增良(LIU Zeng-liang). 模糊技术与神经网络技术选编(4)(Selection and Edition of Fuzzy and Neural Networks Technology, Part Four) [M]. 北京:北京航空航天大学出版社(Beijing:Beijing University of Astronautic and Aeronautic Press), 1999.
- [2] 保定天威集团大型变压器公司(Baoding Tianwe: Transformer corporation). 变压器试验技术(Transformer Experiment Technology) [M]. 北京:机械工业出版社(Beijing:China Machine Press), 2003.

- [3] 郭喜庆(GUO Xi-qing). 高电压设备绝缘与故障分析(High Voltage Equipment Insulation and Fault Analysis) [M]. 北京:水利水电出版社(Beijing:Hydraulic and Electric Power Press), 1995. 77-111.
- [4] 日本电气书院(Japan Electrical Institute). 电气设备故障检测手册(Notebook of Electric Accessory Fault Analysis) [M]. 钱汝立,等译(QIAN Ru-li, et al Trans). 北京:水利水电出版社(Beijing:Hydraulic and Electric Power Press), 1983. 127-144.
- [5] 韩晓萍,徐建政(HAN Xiao-ping, XU Jian-zheng). 基于综合特征输入的 DGA 在变压器故障诊断中的应用(Application of Dissolved Gas Analysis Based on Comprehensive Characteristic Input to Transformer Fault Diagnosis) [J]. 山东工业大学学报(Journal of Shandong University of Technology), 2001, 31(6): 506-510.
- [6] 关杰林,徐国禹(GUAN Jie-lin, XU Guo-yu). 模糊神经网络在变压器故障诊断中的应用(The Application of Fuzzy Neural Networks for Power Transformer Fault Diagnosis) [J]. 重庆大学学报(Journal of Chongqing University), 1997, 20(6): 73-76.
- [7] 张慧媛,丁扬,等(ZHANG Hui-yuan, DING Yang, et al). 基于模糊神经网络的变压器故障诊断新方法(New Method Based on Fuzzy Neural Networks for Transformer Fault Diagnosis) [J]. 华北电力大学学报(Journal of North China Electric Power University), 1998, 25(2): 6-10.

(下转第 69 页 continued on page 69)

ture. Beijing:2002.

收稿日期: 2003-07-21; 修回日期: 2003-10-19

作者简介:

施莉(1979-),女,硕士研究生,研究方向为继电保护

的新原理和新技术;

赵东成(1979-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统故障诊断;

杨明玉(1963-),女,硕士,讲师,研究方向为微机保护及人工智能在电力系统中的应用。

Discussion on hidden failures in relay protection of power systems

SHI Li¹, ZHAO Dongcheng², YANG Mingyu¹

(1. North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. Northeast China Institute

of Electric Power Engineering, Jilin 132000, China)

Abstract: This paper introduces the problem of hidden failures in relay protection of power systems. Based on the concept and characteristics of hidden failures, the method to evaluate the hazard of hidden failures is put forward. The supervision and control of hidden failures will lower the occurrence of hidden failures, consequently the chances of the wide area system failures are reduced. At the same time, the status of application of hidden failure analysis in current power systems is described briefly.

Key words: electric power system; relay protection; hidden failures; wide-area failures; vulnerability; supervision and control

(上接第 18 页 continued from page 18)

- [8] 杨尔辅,等(YANG Er-fu, et al). 应用 BP-ART 混和神经网络的推进系统状态监控实时系统(Real-time System for Condition Monitoring of Propulsion System Using BP-ART Hybrid Neural Networks) [J]. 推进技术(Journal of Propulsion Technology), 1999, 20(6):10-15.
- [9] 袁曾任(YUAN Ceng-ren). 人工神经元模型及其应用(Artificial Neure Model and Application) [M]. 北京:清华大学出版社(Beijing: Tsinghua University Press), 1999. 311-316.
- [10] 张立明(ZHANG Li-ming). 人工神经网络的模型及其应

用(Artificial Networks Model and Application) []. 上海:复旦大学出版社(Shanghai: Fudan University Press), 1992. 134-136.

收稿日期: 2003-07-09; 修回日期: 2003-09-23

作者简介:

高如新(1978-),男,硕士研究生,主要从事单片机开发、工业过程控制、电网故障诊断方面的研究;

王福忠(1961-),男,教授,主要从事单片机开发、故障诊断及直线电机研究与控制方面的研究。

Application of BP-ART2 hybrid neural network for power transformer synthetic fault diagnosis based on fuzzy input

GAO Ru-xin, WANG Fu-zhong, RAN Zheng-yun

(Jiaozuo Institute of Technology, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: Based on fuzzy theory and neural network theory, a new method for power transformer fault diagnosis is introduced. According to methods of DGA, electrical experiment and environmental characteristics, a fuzzy input based BP-ART2 model is presented. This model can deal with uncertain factors effectively and timely, and be of high ability to synthetic fault diagnosis of power transformer.

The project is supported by Henan Technologies R&D programme(No. 0124140156).

Key words: fuzzy control; BP neural network; ART2 model; fault diagnosis; power transformer