

基于模糊神经网络高压电气设备绝缘状况评价方法研究

孙和义¹, 浦昭邦¹, 赵学增²

(1. 哈尔滨工业大学 电气工程与自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 提出了利用模糊逻辑-神经网络分析高压电气设备绝缘参数变化趋势的方法。根据在线监测获得的实时和历史数据确定绝缘参数变化的趋势法,应用隶属函数实现对变化趋势的描述,建立了相应的数学模型。基于模糊神经网络构造了评价绝缘状况的“正常”、“观察”和“检修”的模糊评价体系,把绝缘参数变化归为“减小”、“平稳”和“增大”3 个模糊集合,得到评价设备绝缘状况的变化趋势准则。该方法可用在高压电气设备绝缘在线监测系统中,保证在线监测的准确性和可靠性。

关键词: 在线监测; 变化趋势; 模糊逻辑; 神经网络

中图分类号: TM 85; TP 183 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2007)01-0005-04

模糊逻辑和神经网络都是人类大脑在对处理客观世界问题上所具有的独特方式。模糊理论的提出、发展和完善,很好地解决了人类对模糊信息的描述问题,而神经网络在信息处理方式上也充分体现了人脑对问题并行处理的模式。两者在处理和解决问题时都无需建立对象的精确数学模型,只需根据输入的采样数据进行估计决策;在对信息的加工处理过程中,两者均表现出很强的容错能力^[1-2]。它们的相互结合,能够更好地实现对人类大脑处理问题方式的模拟。因此,模糊逻辑与神经网络的相互融合已成为必然的趋势^[3-7]。本文主要研究利用模糊逻辑-神经网络分析高压电气设备绝缘参数变化趋势的方法。

1 高压电气设备绝缘参数变化趋势

高压电气设备绝缘在线监测主要是通过监测设备的泄漏电流、介质损耗、等值电容、变压器油中某些气体含量等参数的变化判定系统运行状况是否正常^[8-11]。由于设备绝缘情况的变化一般是一个缓慢的渐变过程,瞬间得到的一组绝缘数据并不能有效地反映设备绝缘的真实情况,因此必须对一段时间内的数据进行相关性和趋势变化分析,从而得到各绝缘参数的变化趋势以对设备绝缘状况进行评价。在实验分析中,本文应用电流互感器监测设备的介损值和漏电流。通过监测系统对设备进行每天 24 次巡检得到的设备绝缘参数数据,实现日变化趋势分析;同时把这 24 组数据的平均值作为设备每天的绝缘参数数据,这样可以利用每个月的 30 组数据完成设备的绝缘参数的月变化趋势分析;同理把每个月的绝缘参数平均值作为设备的绝缘参数,并实现设

备绝缘参数的年变化趋势分析。

表 1~3 分别为用过零比较法对牡丹江电业局 110 kV 甲母线 A、B、C 三相电流互感器在线监测 1 天、1 个月和 1 年的数据,所得到的介损值 η 和漏电流 i_L 在 1 天内的变化曲线分别如图 1、2 所示,在 1 年内的变化曲线分别如图 3、4 所示。通过上述方法

表 1 过零比较法对电流互感器在线监测 1 天数据
Tab.1 On-line monitoring data of current transformer in one day with zero passing method

时刻	$\eta/\%$			i_L/mA		
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
8:00	0.301	0.296	0.289	12.24	10.85	9.56
9:00	0.305	0.232	0.312	11.96	12.36	10.85
10:00	0.273	0.242	0.265	12.96	11.25	13.78
11:00	0.254	0.231	0.235	13.12	13.56	11.54
12:00	0.215	0.258	0.279	11.63	14.25	12.03
13:00	0.315	0.261	0.296	14.23	14.12	11.98
14:00	0.200	0.294	0.236	12.15	13.85	13.98
15:00	0.217	0.209	0.259	10.96	12.99	12.57
16:00	0.243	0.310	0.236	11.98	13.21	11.52
17:00	0.196	0.241	0.287	13.96	14.44	12.02
18:00	0.237	0.265	0.303	11.54	13.75	11.88
19:00	0.285	0.300	0.214	10.25	13.02	12.64
20:00	0.236	0.295	0.263	13.54	12.42	12.74
21:00	0.201	0.243	0.245	12.85	12.31	11.65
22:00	0.256	0.215	0.251	11.96	12.47	12.97
23:00	0.247	0.213	0.296	10.78	12.01	10.83
00:00	0.285	0.243	0.265	11.56	12.35	10.58
1:00	0.210	0.253	0.212	11.01	13.08	11.95
2:00	0.263	0.289	0.216	10.85	11.54	11.36
3:00	0.231	0.278	0.245	12.65	11.23	10.45
4:00	0.196	0.265	0.211	14.01	11.85	10.68
5:00	0.203	0.207	0.232	12.59	10.36	11.08
6:00	0.216	0.245	0.235	9.89	10.89	10.63
7:00	0.286	0.218	0.208	10.54	11.01	10.87
均值	0.244 6	0.254 3	0.253 8	12.050 4	12.465 4	11.672 5
方差	0.037 6	0.031 5	0.031 9	1.215 5	1.184 0	1.074 1

对参数值变化曲线进行分析,该设备在 1 天内的 2 组曲线参数变化平稳,而该设备的 B 相介损值在 1 年内的变化处于逐渐上升趋势,因此该设备绝缘状况较差,为非正常运行状态。

表 2 过零比较法对电流互感器在线监测
1 个月数据(2004 年 4 月)

Tab.2 On-line monitoring data of current transformer in one month with zero passing method(April, 2004)

日期	$\eta/\%$			i_L/mA		
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
1	0.244 6	0.254 3	0.253 8	12.050 4	12.465 4	11.672 5
2	0.245 3	0.253 0	0.251 1	12.152 1	12.562 3	11.527 0
3	0.244 1	0.249 8	0.256 9	12.071 4	12.402 5	11.784 5
4	0.244 0	0.268 8	0.249 9	12.187 4	12.635 8	11.641 2
5	0.244 5	0.254 4	0.253 6	11.968 5	12.421 5	11.608 7
6	0.243 9	0.251 2	0.254 8	12.102 7	12.712 3	11.568 9
7	0.243 8	0.258 7	0.256 1	11.936 5	12.423 6	11.527 4
8	0.244 8	0.260 2	0.260 2	12.064 5	12.487 2	11.625 4
9	0.245 6	0.241 1	0.257 8	12.253 4	12.468 5	11.684 7
10	0.246 2	0.243 9	0.253 3	12.107 7	12.365 2	11.548 1
11	0.241 5	0.256 6	0.251 3	12.096 8	12.598 7	11.713 4
12	0.244 7	0.257 8	0.254 1	12.311 5	12.501 2	11.465 1
13	0.245 4	0.254 7	0.258 7	12.066 1	12.321 4	11.484 1
14	0.242 8	0.246 5	0.256 4	12.106 3	12.402 3	11.625 4
15	0.243 4	0.249 7	0.253 9	12.254 1	12.452 1	11.720 1
16	0.240 8	0.258 0	0.250 5	12.211 0	12.461 8	11.813 3
17	0.246 6	0.251 1	0.251 8	12.036 2	12.564 8	11.647 7
18	0.244 1	0.253 8	0.262 4	12.085 6	12.615 4	11.501 7
19	0.245 1	0.256 7	0.254 7	12.096 5	12.421 1	11.607 8
20	0.243 3	0.259 9	0.248 7	12.112 5	12.468 5	11.689 9
21	0.242 9	0.257 4	0.254 8	12.096 1	12.472 8	11.538 4
22	0.244 6	0.254 1	0.256 8	12.048 7	12.450 2	11.487 6
23	0.245 3	0.256 3	0.254 2	12.058 4	12.538 4	11.652 2
24	0.241 9	0.260 3	0.254 4	12.354 7	12.332 6	11.747 5
25	0.242 2	0.260 1	0.259 8	12.302 2	12.302 9	11.724 1
26	0.244 4	0.249 9	0.251 4	12.087 7	12.389 7	11.754 8
27	0.245 0	0.255 4	0.256 1	12.068 9	12.422 1	11.621 5
28	0.247 9	0.257 4	0.254 8	12.102 3	12.401 5	11.587 4
29	0.248 2	0.258 6	0.254 7	12.105 5	12.508 4	11.684 1
30	0.246 7	0.253 0	0.250 7	12.201 3	12.445 8	11.651 4
均值	0.244 5	0.254 8	0.254 6	12.123 2	12.467 2	11.630 2
方差	0.001 7	0.005 5	0.003 2	0.097 3	0.094 6	0.093 1

表 3 过零比较法对电流互感器
在线监测 1 年数据

Tab.3 On-line monitoring data of current transformer in one year with zero passing method

月份	$\eta/\%$			i_L/mA		
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
1	0.244 7	0.254 0	0.254 9	12.332 5	12.426 5	11.012 3
2	0.244 3	0.241 6	0.253 3	12.626 8	12.369 8	12.415 1
3	0.243 4	0.235 4	0.258 7	12.827 4	12.451 3	11.982 4
4	0.244 5	0.254 8	0.254 6	12.123 2	12.467 2	11.630 2
5	0.243 8	0.282 6	0.251 3	11.840 1	12.635 2	11.481 3
6	0.244 0	0.296 0	0.252 4	12.656 0	12.754 8	11.874 3
7	0.241 3	0.325 8	0.254 7	12.352 3	13.454 9	12.328 4
8	0.244 9	0.335 1	0.259 8	12.156 6	13.847 8	12.218 4
9	0.243 3	0.346 1	0.254 6	12.943 2	14.021 3	11.987 8
10	0.248 9	0.326 8	0.253 3	12.336 8	14.231 6	11.035 1
11	0.246 5	0.391 0	0.254 1	11.745 6	14.841 6	11.684 3
12	0.243 6	0.389 5	0.253 6	12.138 9	14.874 5	12.384 1
均值	0.244 4	0.306 6	0.254 6	12.340 0	13.364 7	11.836 1
方差	0.001 9	0.054 4	0.002 4	0.370 3	0.967 6	0.484 4

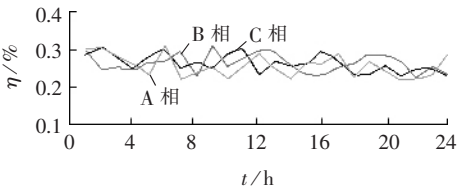


图 1 1 天内介损值变化曲线

Fig.1 Medium wastage curve within a day

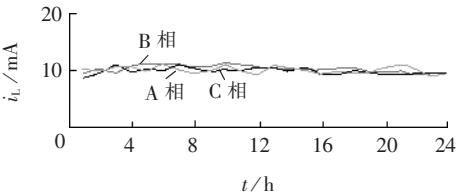


图 2 1 天内漏电流变化曲线

Fig.2 Leakage current curve within a day

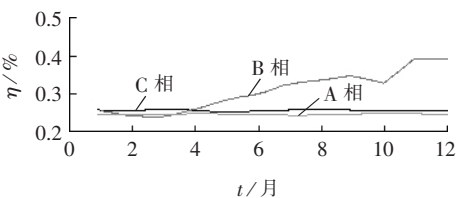


图 3 1 年内介损值变化曲线

Fig.3 Medium wastage curve within a year

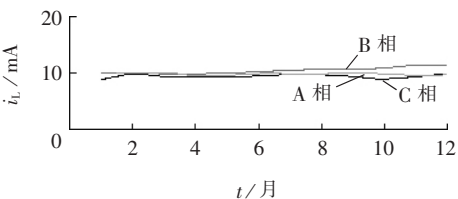


图 4 1 年内漏电流变化曲线

Fig.4 Leakage current curve within a year

设备绝缘参数 Φ_m 的日变化趋势、月变化趋势和年变化趋势有 7 种基本变化趋势,如图 5 所示。

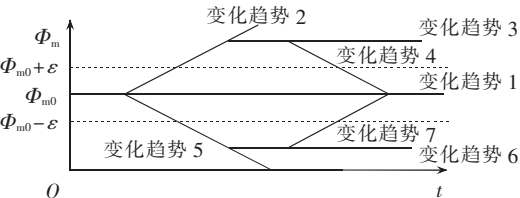


图 5 设备绝缘参数变化趋势示意图

Fig.5 Change tendency of equipment insulation parameters

2 基于模糊神经网络绝缘参数变化趋势分析

根据上述对设备绝缘参数基本变化趋势的分析,可以应用隶属函数实现对这些变化趋势的描述,从而反映设备的绝缘状况。

选取被监测设备的绝缘参数作为论域 $V, \Delta x$ 为进行变化趋势分析的一组设备绝缘参数与这组参数平均值的差所构成的数据,那么模糊集合 F 表示绝缘参数变化“减小”的集合,即表示设备绝缘不正常,

$F=\{\mu_F(\Delta x)|\Delta x\in V\}$, $\mu_F(\Delta x)$ 为“减小”变化趋势的隶属函数,其表达式见式(1)。

$$\mu_F(\Delta x)=\begin{cases} 1 & \Delta x < a \\ \frac{b-\Delta x}{b-a} & a\leq \Delta x < b \\ 0 & b\leq \Delta x \end{cases} \quad (1)$$

模糊集合 S 表示绝缘参数变化“平稳”的集合,即表示设备绝缘正常, $S=\{\mu_S(\Delta x)|\Delta x\in V\}$, $\mu_S(\Delta x)$ 为“平稳”变化趋势的隶属函数,其表达式见式(2)。

$$\mu_S(\Delta x)=\begin{cases} 0 & \Delta x < a \\ \frac{\Delta x-a}{b-a} & a\leq \Delta x < b \\ 1 & b\leq \Delta x < c \\ \frac{\Delta x-d}{c-d} & c\leq \Delta x < d \\ 0 & \Delta x \geq d \end{cases} \quad (2)$$

模糊集合 T 表示绝缘参数变化“增大”的集合,即表示设备绝缘不正常, $T=\{\mu_T(\Delta x)|\Delta x\in V\}$, $\mu_T(\Delta x)$ 为“增大”变化趋势的隶属函数,其表达式如式(3)所示。

$$\mu_T(\Delta x)=\begin{cases} 0 & \Delta x < c \\ \frac{\Delta x-c}{d-c} & c\leq \Delta x < d \\ 1 & \Delta x \geq d \end{cases} \quad (3)$$

式(1)~(3)的隶属函数曲线如图 6 所示。上述 3 个公式中的 a, b, c 和 d 是一组可变参数,它们的变化可刻画绝缘参数的变化趋势。但获得这些参数(a, b, c, d)还有一定的困难。利用神经网络具有学习的能力,根据历史数据训练神经网络,训练好的网络隐含样本数据所表达的模糊规则。考虑到在线监测过程中,将不断获得新的数据,进而利用神经网络的在线学习能力,可以进一步提高网络的在线评价能力。

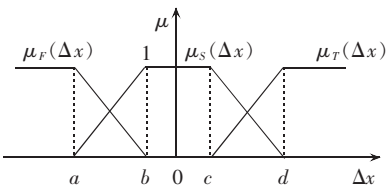


图 6 绝缘参数变化趋势隶属函数
Fig.6 Membership function for tendency of insulation parameter change

3 网络的仿真学习、训练及仿真分析结果

本文采用如图 7 所示的 3 层 BP 神经网络,该网络由输入层、隐含层和输出层神经元组成^[12-13]。输入信号 $X=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 向前传播到隐层,经隐含层节点作用函数把信息传播到输出层的神经单元,最后输

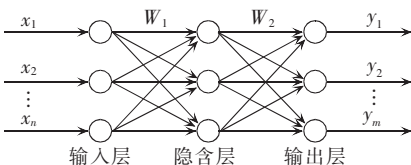


图 7 等价神经网络
Fig.7 Equivalent neural network

出结果。隐含层激励函数采用 Sigmoid 函数 $\phi(x)=\text{tansig}(x)=\frac{2}{1+\exp(-2x)}-1$, 输出层的激励函数采用线性函数 $\psi(x)=x$, 网络为充分连接,即网络单元之间的连接为相邻层节点之间的连接,本层节点互不相连,并接受来自前一层全部节点的输出^[14-15]。

在绝缘参数变化趋势评判中,评判网络第 1 层作为评判模式的输入层 $X=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 输入向量各元素 $\{x_i\}$ 对应网络输入神经元,输出层向量 $Y=\{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ 中的元素 $\{y_j\}$ 对应不同评判模式,中间为隐含层,用来提取输入信号中的相关特性,构成诊断模型^[16]。

针对 A 相介质损耗的日变化趋势,建立一个评判网络,输入层节点 24 个,输入向量 $X=\{x_1, x_2, \dots, x_{24}\}$, 由每一测试时刻的测试数据构成;输出层节点 7 个,输出向量 $Y=\{y_1, y_2, \dots, y_7\}$, 每一元素对应一种评判模式;隐含层节点 12 个。训练时,每一组数据,对应模式 $y_j=1$, 其余各元素 $y_j=0$; 7 种模式各选取 45 组数据,共计 315 组,采用 BP 算法训练网络。选取训练数据以外的数据进行测试,以直方图的形式表示。

选取训练数据以外的数据进行测试,输出结果如表 4 所示(n 为输出模式, N 为输出值)。从表中可以看出,被检测系统处于第 3 种变化趋势。训练时间的数量级是分钟级,测试时间的数量级是秒级。

表 4 输出结果
Tab.4 Output results

<i>n</i>	<i>N</i>	<i>n</i>	<i>N</i>	<i>n</i>	<i>N</i>
1	0.008	3	0.973	6	0.005
		4	0.005	7	0.002
2	0.003	5	0.004		

被监测设备各相的介质损耗、泄漏电流等绝缘参数的日、月和年变化趋势,都可以按照上述方式构造评判网络。

对于被监测设备的介质损耗、泄漏电流等绝缘参数的变化趋势,得到下列评价准则:

- a. 符合变化趋势 1、变化趋势 4 和变化趋势 7 的情况,标志设备绝缘状况良好,设备为正常运行状态,模糊评价绝缘系统为“正常”;
- b. 符合变化趋势 2 和变化趋势 5 的情况,标志设备绝缘状况较差,设备为不正常运行状态,应采取 措施,停止运行,进行检修,模糊评价绝缘系统为“检修”;
- c. 符合变化趋势 3 和变化趋势 6 的情况,标志设备绝缘状况可能出现问题,对设备运行状态应注意观察,根据参数的进一步变化作出判断,模糊评价绝缘系统为“观察”。

4 结语

本文建立了一个通过对一段时间内设备绝缘参数的相关性和趋势变化分析的设备绝缘状况评价方法。提出了基于模糊逻辑-神经网络变化趋势预测

方法和绝缘参数数据的梯形隶属函数,构造了评价绝缘状况的“正常”、“观察”和“检修”的模糊评价体系,把绝缘参数变化归为“减小”、“平稳”和“增大”3个模糊集合。得到了评价设备绝缘状况的变化趋势准则,并应用到高压电气设备绝缘在线监测系统中,保证了长期在线监测的准确性、可靠性。

参考文献:

- [1] WANG Ping, XU Jun. A novel recognition method for electronic noise using artificial neural network and fuzzy recognition [J]. Sensors and Actuators B - Chemical, 1996, 37(3): 169-174.
- [2] 赵振宇, 徐用懋. 模糊理论和神经网络的基础与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [3] WARD B H. A survey of new techniques in insulation monitoring of power transformers[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2001, 17(3): 16-23.
- [4] 俞晓冬, 孙莹, 臧宏志. 基于粗糙集与模糊神经网络的变压器故障诊断方法[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(2): 15-17.
YU Xiao-dong, SUN Ying, ZANG Hong-zhi. Transformer fault diagnosis based on rough set theory and neural fuzzy network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(2): 15-17.
- [5] 吴欣, 张博, 陈涛. 基于神经网络的大规模模拟电路故障检测系统[J]. 计算机测量与控制, 2004, 12(11): 1049-1051.
WU Xin, ZHANG Bo, CHEN Tao. Large scale analog circuit fault diagnosis based on neural network [J]. Computer Measurement & Control, 2004, 12(11): 1049-1051.
- [6] 常炳国, 晏磊, 毛节泰, 等. 模糊神经网络观测器在变压器状态监控中的应用[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2003, 39(1): 37-39.
CHANG Bing-guo, YAN Lei, MAO Jie-tai, et al. Observer with fuzzy neural networks for monitoring the operation-state of transformer [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2003, 39(1): 37-39.
- [7] 赵庆波, 周元冰, 郭蓉, 等. 模糊神经网络在电力系统边际电价预测中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(7): 45-48.
ZHAO Qing-bo, ZHOU Yuan-bing, GUO Rong, et al. Application of fuzzy neural network in power system marginal price forecasting [J]. Power System Technology, 2004, 28(7): 45-48.
- [8] 孙和义, 赵学增, 代礼周, 等. 高压电气设备泄露电流检测传感器的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2001, 33(5): 661-665.
SUN He-yi, ZHAO Xue-zeng, DAI Li-zhou, et al. Divulge current transducer for high-voltage electric equipment [J]. Journal

- of Harbin Institute of Technology, 2001, 33(5): 661-665.
- [9] 孙和义, 浦昭邦, 聂鹏. 容性设备介质损耗角在线检测中的干扰抑制新方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(3): 67-70.
SUN He-yi, PU Zhao-bang, NIE Peng. A new interference reduction method in dielectric loss tangent online monitoring for capacitive equipment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(3): 67-70.
 - [10] 罗华煜, 关根志, 易小羽. 基于接地线电流法的电力电缆绝缘在线监测[J]. 高电压技术, 2005, 31(11): 63-65.
LUO Hua-yu, GUAN Gen-zhi, YI Xiao-yu. Study of on-line monitoring of XLPE power cable by earth line current method [J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(11): 63-65.
 - [11] 熊浩, 孙才新, 廖瑞金, 等. 基于核可能性聚类算法和油中溶解气体分析的电力变压器故障诊断研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(20): 162-165.
XIONG Hao, SUN Cai-xin, LIAO Rui-jin, et al. Study on kernel-based possibilistic clustering and dissolved gas analysis for fault diagnosis of power transformer [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(20): 162-165.
 - [12] de RAJAT K, PAL N R, PAL S K. Feature analysis: neural network and fuzzy set theoretic approaches [J]. Pattern Recognition, 1997, 30(10): 1579-1590.
 - [13] ROSANDICH R G. HAVNET: a new neural network architecture for pattern recognition [J]. Neural Networks, 1997, 10(1): 139-151.
 - [14] RAY K S, GHOSHAL J. Neural fuzzy approach to pattern recognition [J]. Neural Networks, 1997, 10(1): 161-182.
 - [15] GUEZ A, NEVO I. Neural networks and fuzzy logic in clinical laboratory computing with application to integrated monitoring [J]. Clinica Chemical Acta, 1996, 248(1): 73-90.
 - [16] 孙和义. 高压电气设备绝缘在线检测技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004.
SUN He-yi. A study on online monitoring of insulation quality of high voltage electric power equipment [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2004.

(责任编辑: 康鲁豫)

作者简介:

孙和义(1954-), 男, 黑龙江绥滨人, 教授, 博士, 研究方向为测控技术与仪器;

浦昭邦(1944-), 男, 辽宁普兰店人, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为测控技术与仪器;

赵学增(1961-), 男, 黑龙江宾县人, 教授, 博士, 研究方向为测控技术与仪器(E-mail: zhaoxz@hit.edu.cn)。

Insulation status estimation for high voltage electric equipment based on fuzzy neural network

SUN He-yi¹, PU Zhao-bang¹, ZHAO Xue-zeng²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. School of Mechatrolcal Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The fuzzy logic-neural network is used to analyze the tendency of insulation parameter change of HV (High Voltage) electric equipment. Using the membership function to describe the variation tendency based on the real time and historic data obtained by on-line monitoring, the corresponding mathematic model is built. The insulation status is classified into 'normal', 'observe' and 'repair' for estimation system based on fuzzy neural network and the parameter change into 'down', 'smooth' and 'up' for getting estimation rules. It can be applied in on-line insulation status monitoring system for HV electric equipment with the veracity and reliability ensured.

Key words: on-line monitoring; variation tendency; fuzzy logic; neural network