

基于改进型 ANFIS 的负荷密度指标求取新方法

周 涑¹, 孙 威², 张 昀¹, 任海军¹, 孙才新¹, 邓景云¹

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030;

2. 湖南省电力公司超高压管理局, 湖南 长沙 410002)

摘要: 针对传统的负荷密度指标的求取方法通常采用经验法或简单类比法, 难以满足精度要求这一不足, 从负荷密度与其影响因素存在着某种非线性关系的角度出发, 提出了一种新颖的、基于自适应神经模糊系统 (ANFIS) 的负荷密度指标求取新方法。该方法用熵权法对影响因素的输入值进行加权处理, 运用 Fletcher-Reeves 共轭梯度法改进 ANFIS 默认的混合学习算法, 建立改进型 ANFIS 预测模型来求取负荷密度, 克服了传统方法输出结果不可量化和精度不高等缺点。通过一个实例验证了该方法的实用性和有效性。

关键词: 空间负荷预测; 负荷密度指标法; 熵权; 自适应神经模糊系统 (ANFIS)

A new method to obtain load density based on improved ANFIS

ZHOU Quan¹, SUN Wei², ZHANG Yun¹, REN Hai-jun¹, SUN Cai-xin¹, DENG Jing-yun¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University,

Chongqing 400030, China; 2. UHV Administration of Hunan Electric Power Company, Changsha 410002, China)

Abstract: The traditional methods to obtain load density are often based on experience or simple comparison, and the results can hardly meet the accuracy requirements. So a novel method to obtain load density based on ANFIS for distribution network is proposed according to the non-linear relation between load density and its influencing factors. The methodology of entropy weight coefficient is firstly used to treat the input value of every influencing factor with its weight, then the improved forecasting model of ANFIS is established to forecast the load density through using Fletcher-Reeves learning algorithm to improve the conventional mixed algorithm, which overcomes the conventional methods' faults such as measurelessness of prediction result and low forecasting accuracy of the prediction model. Finally, the applicability and effectiveness of the method are demonstrated by using a real case.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50607023) and Natural Science Foundation of Chongqing(CSTC) (No. 2006BB2189).

Key words: spatial load forecasting; load density method; entropy weight coefficient; ANFIS

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)01-0029-06

0 引言

近年来, 由于负荷的飞速发展和“智能电网”建设的需要, 空间负荷预测逐渐受到重视。其概念最早是 20 世纪 80 年代由美国的 H.L.Willis 提出^[1], 即不仅要预测负荷的量, 还要预测未来负荷增长的位置。其可以为制定合理的配电网建设规划方案, 为变电站的合理布局、适时的配电网建设、最佳的投资时间以及获得最大的社会效益提供科学的

决策依据。目前国内外常用的空间负荷预测方法有自上而下的用地仿真法^[2-6]和自下而上的负荷密度指标法^[7-13] (有些文献也叫分类分区法)。但是由于我国城市规划的逐渐规范化, 未来城市土地的使用性质基本已经明确, 所以用地仿真法在国内城网规划中的应用比较少, 而负荷密度指标法在配网规划工程实践中得到了越来越广泛的应用。

负荷密度指标法是从规划区各用地面积 (或建筑面积) 的负荷密度出发作预测, 然后乘以其相应面积, 再累加即得到负荷总量。其中, 规划区各地块负荷密度的确定是整个预测工作的关键和难点, 这也是本文研究的重点内容。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50607023); 重庆市自然科学基金资助项目 (CSTC, 2006BB2189)

传统方法在确定负荷密度指标时，主要采用简单计算或类比法^[7-9]，依靠规划人员经验主观判断获得，未对影响各类负荷密度的因素进行理论分析。目前国内出现了少量关于负荷密度选取且综合考虑了负荷密度影响因素的文章^[11-13]。文献[11-12]分别提出了利用模糊综合评判和模糊贴近度理论来求取负荷密度指标，但是其中隶属度函数的选择比较困难，具有较大的主观性。文献[13]提出了基于双层贝叶斯分类的空间负荷预测，但是该方法与文献[11-12]思路一样，都是采取分类来获取负荷密度，即将负荷密度指标的确定作为一个综合评价过程，根据评价结果对待定负荷密度进行归类，然后再加以简单修正得到预测负荷密度值。但是由于密度的“高”、“中”、“低”等级间的划定分界线很模糊，不是一个绝对值，所以密度指标等级范围的划定本身就没有一个精确的标准，且分类后只加以简单修正，其得出的结果误差必然也比较大。针对此情况，本文从负荷密度与其影响因素存在着复杂的非线性映射关系的角度出发，提出了一种基于自适应神经模糊系统（ANFIS）的负荷密度指标求取新方法。

1 熵权法基本理论

1.1 熵的定义

熵（Entropy）实质上是对系统状态不稳定性的一种度量，当系统处于 n 种不同状态，每种状态出现的概率为 $P_i (i=1,2,\dots,n)$ 时，该评价系统的熵 H 为：

$$H = -\sum_{i=1}^n P_i \ln P_i \quad (1)$$

其中： $\sum_{i=1}^n P_i = 1, 0 \leq P_i \leq 1$ 。

1.2 熵权法

熵权法是根据被评价对象的指标值构成的判断矩阵来确定指标权重的一种方法，具有较强的客观性，排除了专家意见等容易受主观因素影响的成分。当评价对象在某项指标上的值相差较大时，熵值较小，说明该指标提供的有效信息量较大，该指标的权重也应较大；反之，若某项指标的值相差越小，熵值较大，说明该指标提供的信息量较小，该指标的权重也应较小。所以熵权法赋权主要是根据各指标传递给决策者的信息量大小来确定其权数，它是一种客观赋权方法，故可以利用其来确定各类负荷密度影响因素的权重。

利用熵权法确定影响因素的权重步骤如下：

(1) 设要分析 m 个同类型负荷的地块，每个地

块的负荷密度都有 n 种影响因子，则得到判别矩阵：

$$X = (x_{ij})_{m \times n} = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix}, \text{ 为保证影响因子量}$$

值属性不变和消除不同物理量纲的影响，首先对判断矩阵进行无量纲化处理得到标准化矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$ 。式中： r_{ij} 表示第 j 个评价对象在第 i 个评价指标上的标准值， $r_{ij} \in [0,1]$ 。

(2) 由标准化矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$ 求影响因子的出现概率 P_{ij} ：

$$P_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^m r_{ij}} (i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n) \quad (2)$$

(3) 求第 j 个影响因子输出的熵 E_j ：

$$E_j = -K \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij} (j=1,2,\dots,n) \quad (3)$$

式中： $K = 1/\ln m$ 。由于 $0 \leq P_{ij} \leq 1$ ，所以

$0 \leq K \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij} \leq \ln m$ ，由此可知： $0 \leq E_j \leq 1$ 。

(4) 第 j 个影响因子的熵权 D_j 定义为：

$$D_j = \frac{1 - E_j}{n - \sum_{j=1}^n E_j} (j=1,2,\dots,n) \quad (4)$$

2 自适应神经模糊推理系统

自适应神经模糊推理系统（ANFIS）^[14-17]是一种基于 Takagi-Sugeno 模型的模糊推理系统，它将人工神经网络的自学习功能和模糊推理系统的模糊语言表达能力有机地结合起来，进行优势互补。它采用神经网络来实现模糊推理，将模糊控制的模糊化、模糊推理和反模糊化三个基本过程全部用神经网络来实现；并且利用神经网络的学习机制自动地从输入输出数据中抽取规则，并利用学习算法，依照人类的知识和给定的输入/输出数据对建立起一个输入/输出映射。其中模糊隶属度函数及模糊规则是通过大量已知数据的学习完成的，而不是基于经验或直觉任意给定的。

2.1 经典 ANFIS 的结构

经典的两输入网络结构如图1所示。

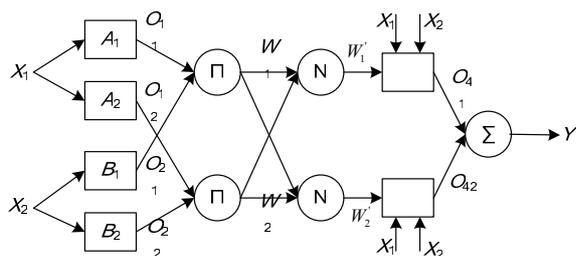


图1 ANFIS系统结构

Fig.1 ANFIS system structure

第一层：输入参数的选择和模糊化。输入变量的选择和模糊化是模糊规则建立的第1步，图1中 X_1 , X_2 为输入变量， A_1 (或 B_1) 为与该节点相关的模糊变量 (如可表示高、中、低)， O_{1i}, O_{2i} 分别是模糊集 A_i 和 B_i 的隶属函数， $i=1, 2$ 。本文中隶属函数选钟形函数^[14-17]。

$$O_{1i} = u_{A_i}(X_1), O_{2i} = u_{B_i}(X_2), i=1, 2 \quad (5)$$

第二层：规则推理层。节点在结构图中用 Π 表示，不同的模糊集合之间组合成相应的规则，规则库由 if - then 规则组成，即：

$$\text{if } X_1 = A_1 \text{ and } X_2 = B_1 \text{ then } Y = aX_1 + bX_2 + c$$

推理机将输入的模糊集合映射成输出的模糊集合，它表示模糊输入与模糊输出的关系。这一层的每个节点输出是所有输入信号的积：

$$W_i = u_{A_i}(X_1) \cdot u_{B_i}(X_2), i=1, 2 \quad (6)$$

每个节点的输出标识一条规则的激励强度。

第三层：激励强度归一化，用 N 表示，输出为：

$$W'_i = \frac{W_i}{W_1 + W_2}, i=1, 2 \quad (7)$$

第四层：模糊规则的输出层。该层每个节点为自适应节点，计算每条规则的贡献，其输出为：

$$O_{4i} = W'_i f_i = W'_i (p_i X_1 + q_i X_2 + r_i), i=1, 2 \quad (8)$$

其中， p_i, q_i, r_i 为参数集，也称为模糊推理规则后件参数，可通过最小二乘法进行辨识。

第五层：解模糊层。该层的输出是所有输入信号的和，即总输出为：

$$Y = \sum_i W'_i f_i = \frac{\sum_i W_i f_i}{\sum_i W_i} \quad (9)$$

2.2 改进型 ANFIS 的学习算法

经典 ANFIS 的学习算法是 BP 算法和最小二乘法相结合的一种混合算法，但是 BP 算法存在收敛速度慢，容易陷入局部最优等缺点。为了弥补其缺点，提高 ANFIS 的函数逼近精度，本文采用共扼梯度法对 ANFIS 训练中使用的 BP 算法进行改进。

共扼梯度法第一步是沿着负梯度方向搜索， $D_0 = G_0 = -\nabla f(W_n)$ ，接着进行线性搜索以确定沿当前搜索方向移动的最优距离：

$$D_n = G_n + \beta_n D_{n-1} \quad (10)$$

其中： D_n 为共扼梯度法的搜索方向； W_n 为当前权重矢量； $\nabla f(W_n)$ 为当前梯度 β_n 采用 Fletcher-通八达 Reeves 共扼梯度法来计算。

$$\beta_n = \frac{G_n^T G_n}{G_{n-1}^T G_{n-1}} \quad (11)$$

在搜索过程中，为使算法能收敛，需对方向进行修正。方法为：每当训练次数为权重数的整数倍时， β_n 取零。同时，在训练的每一步进行判断，如果 $\nabla f(W_n)^T D_n \geq 0$ ，则 $D_n = -\nabla f(W_n)$ ，即新的搜索方向用负梯度方向，从而保证总是沿着误差下降的方向搜索。

3 基于 ANFIS 的负荷密度指标求取新方法的步骤

3.1 负荷密度指标体系的建立

建立负荷密度指标体系的主要目标就是要为下一步确定各类负荷影响因素提供依据，使其有据可查，只需对照归类即可，本文依照以下步骤来完成。

1) 采用负荷密度指标法进行负荷预测时，负荷的精细分类可增强预测的准确性，本文将负荷类型按性质细化为 10 类：工业负荷；居民住宅负荷；行政办公负荷；商业负荷；文化娱乐负荷；研发负荷；教育、医疗、体育等公共设施负荷；市政设施负荷；仓储物流负荷；绿化、广场及道路负荷^[18]。

2) 通过对从电力部门的负控、集抄、营销、SCADA 等相关系统和规划建筑部门采集的相关数据进行整理分析，确定各类细分负荷密度的主要影响因素、并保存各类细分负荷密度值和其影响因素值的历史数据。比如，经过分析，可以把影响居民住宅负荷密度的因素定为：人均收入、人口密度、人均电力、电煤价格比率等；把影响商业负荷密度的主要因素定为：地理位置、商场定位、商场面积、当地生活消费水平等；把影响工业负荷密度的主要因素定为：工厂规模、作业方式、当地经济水平、产品定位等。

3) 随着知识手段的不断进步和发展，各类数据越来越容易获得，我们应对每类细分负荷的影响因素不断完善和修正，以使得该体系更加精确、更适应社会的发展和变化。

3.2 利用熵权法确定影响因素的权重

由于我国的特有国情，我国的城市规划中对未来土地的使用性质已有了明确的指定和规划。因此只要对照详细的城市规划图，就可以查到待预测地块在预测年内的负荷类型。然后参照负荷密度指标模型，即可确定该负荷类型的影响因素。

由于负荷密度的各个影响因素对其的影响程度不一样，其相对重要程度也就不一样，所以在求取负荷密度时需要考虑各因素的权重。引入熵值法来确定各影响因素的权重，即利用影响因素信息的价值系数来衡量其对负荷密度的重要程度（价值系数越高，其重要性越大），可以提高预测精度。

3.3 利用自适应神经模糊系统预测待预测地块的负荷密度

由于自适应神经模糊系统（ANFIS）将模糊推理系统中的模糊逻辑规则及隶属度函数参数通过神经网络的自学习来制定，并自动产生模糊规则，克服了模糊控制系统中模糊推理规则主要根据专家经验设计的缺点，且又继承了神经网络在未知非线性的建模方面已显示出好的性能，具有以任意精度逼近非线性函数的能力。与 BP 神经网络相比，具有更强的自学习能力、鲁棒性和自适应性，所以本文采用自适应神经模糊推理系统（ANFIS）来预测负荷密度，其步骤如下：

1) 确定输入/输出向量和输入数据：以待预测的该类负荷密度的各个影响因素作为输入向量；以待预测地块的负荷密度作为输出向量；以经过熵权法加权处理的各影响因素数据集作为输入数据。

2) 模型初始化：由 Matlab7.0 模糊系统工具箱里的 `genfis1()` 函数生成 Takagi-sugeno 模糊推理系统结构及初值，其中可以指定 ANFIS 中的初始输入变量的隶属度函数的数目、类型和输出隶属度函数的类型。本文算例中，由于输入变量的模糊划分为“很低”、“低”、“中”、“高”、“很高”，所以每个输入变量的隶属度函数指定为五个，类型指定为钟形隶属度函数。

3) 建立 ANFIS 模型（多输入单输出）：利用上述改进算法来完成对输入输出数据对的建模，从数据集中提取相应信息（模糊规则）。通过学习能够有效地计算出隶属度函数的最佳参数，使得设计出来的 Takagi-sugeno 型模糊推理系统能够最好地模拟出希望的或者实际的输入输出关系。

期间系统通过数据的训练和学习，自动生成科学的、符合实际的模糊规则。如在预测居民负荷地块的负荷密度时，ANFIS 的模糊规则通过对大量已知数据的学习完成后，其规则之一表现形式为：

if 人口密度‘中’； and 人均收入‘高’； and 人均电量‘中’； and 煤电价格比增长率‘中’； then 该地块的负荷密度值会‘高’，经反模糊化后就可得到一具体数据值。

系统利用这些最佳参数和模糊规则来有效地模拟负荷密度与其影响因素的非线性关系，使系统输出值无限逼近其实际值。

4) 把待预测地块相对应的属性数据值载入改进型 ANFIS 模型中，我们就能得到待预测地块的负荷密度输出值。

3.4 基于改进型 ANFIS 的负荷密度指标求取新方法的总体流程

综合上述三个部分，基于 ANFIS 的负荷密度指标求取新方法的总体流程见图 2。

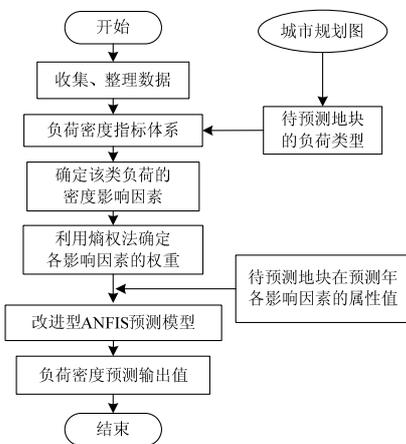


图 2 基于 ANFIS 的负荷密度指标求取新方法总体流程
Fig.2 Flow of the method to obtain load density based on ANFIS

4 算例分析

本文以预测居民负荷密度为例，对本文的模型和算法进行验证和分析。由上可知，参照负荷密度指标体系后，以人口密度 A_1 (人/ km^2)、人均收入 A_2 (元)、人均电量 A_3 (kWh)、煤电价格比增长率 A_4 (%)，作为 ANFIS 预测模型的输入向量。

收集 100 个居民负荷样本如表 1。

利用式 (12) 将输入/输出量归一化到 [0,1] 区间。

$$\bar{x}_i = \frac{x_i}{|x_{\max}|} \quad (12)$$

其中， x_{\max} 表示各影响因素值的最大值。

按照公式 (2) ~ (4) 逐次计算，即可得到影响因素的熵值 E_j 及熵权 D_j 如表 2 所示，其中易看出式中 $m=100$ ， $n=4$ 。

表 1 样本数据
Tab.1 Sample data

序号	A_1	A_2	A_3	A_4	C
1	17 312	2 882.3	623	1.621	11.59
2	17 632	4 929.9	993	1.115	22.23
3	15 865	2 619.3	629	1.692	9.13
4	30 652	1 353.0	529	1.526	11.52
5	19 714	5 063.1	1 013	1.056 9	26.14
6	16 600	1 222.7	1 019	2.263	2.55
7	29 309	1 122.0	537	1.677	10.36
8	16 459	2 327.5	661	1.579	13.82
9	16 055	1 187.1	1 029	2.163	2.63
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
99	31 952	1 269.9	542	1.773	11.67
100	16 150	4 838.5	1 033	1.016	27.64

表 2 影响因素的熵值及熵权

Tab.2 Entropy value and entropy weight of influencing factors

	A_1	A_2	A_3	A_4
熵值 E_j	0.982 7	0.930 8	0.983 5	0.987 2
熵权 D_j	0.149 6	0.597 6	0.142 0	0.110 7

将每个影响因素的值与其对应的熵权相乘，得到新的加权输入矩阵，以此作为ANFIS预测模型的输入数据。

按照3.3节步骤3)建立ANFIS模型(四输入单输出)来进行仿真分析。以上面100数据与其对应的熵权相乘得到的加权输入矩阵作为训练样本，以待预测地块2008年的属性数据作为验证(检验)样本。其中每个输入变量的隶属度函数为五个，类型指定为钟形隶属度函数，输出变量的隶属度函数类型为线型隶属度函数，训练次数为200，学习算法采用共扼梯度法改进的学习算法。

已知该待预测的空间地块在待预测年(本文选取的是2008年)里各因素属性值为： $\{28126, 1235, 402, 2.089\}$ ，以该数据作为验证数据，载入ANFIS模型中，我们可以得到其输出值为： 8.13 kW/km^2 ，与实际负荷密度为 8.32 kW/km^2 相比，相对误差为2.28%。

如我们采用ANFIS默认的混合学习算法，得到输出值为 8.06 kW/km^2 ，相对误差为3.23%。两者算法的训练误差曲线如图3、4。

如果对上述输入数据不经熵权法加权处理，得到的输出值为： 8.96 kW/km^2 ，其相对误差为7.69%。可见，引入熵权法和改进的学习算法能提高预测精度，三者比较如表3所示。

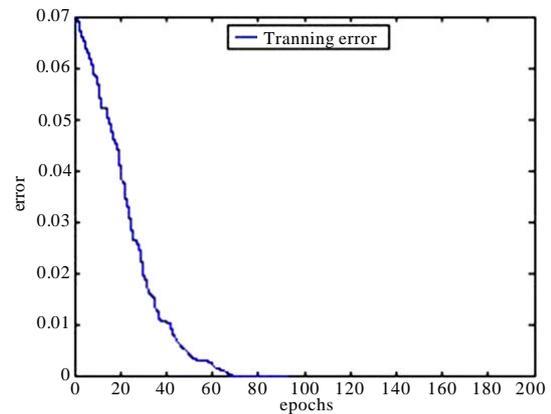


图 3 改进学习算法的训练曲线

Fig.3 The training curve of improved algorithm

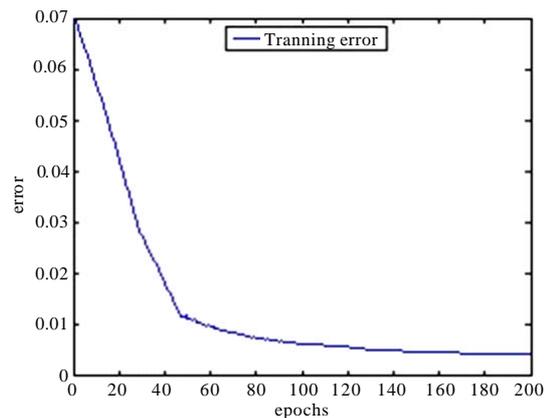


图 4 默认混合算法的训练曲线

Fig.4 The training curve of mixed algorithm

表 3 三者误差比较

Tab.3 The comparison of three errors

	未引入熵权 和改进算法	引入熵权和 混合算法	引入熵权和 改进算法
相对误差	7.69%	3.23%	2.28%

5 结论

1) 本文在确定影响因素的权重时引入信息论中的熵值理论，通过信息熵反映实测数据本身的效用值确定权重，充分考虑了各个影响因素对负荷密度的影响程度，使得权重的分配有了一定的理论依据，同时也有效地提高了预测精度。

2) 由于ANFIS中的模糊隶属度函数及模糊规则是通过大量已知数据的学习完成的，且又继承了神经网络在未知非线性的建模方面已显示出好的性能，具有以任意精度逼近任意线性和非线性函数等功能，本文利用它建立模型，从负荷密度与其影响因素之间的非线性映射关系的角度出发求取负荷密

度,不同于以往“归类再修正”的方法,为求取负荷密度指标法提供了一种新思路和新方法。

3) 本文使用Fletcher-Reeves共轭梯度法改进了ANFIS原始的学习算法,克服了BP算法容易陷入局部最优的缺点,加快ANFIS的收敛速度,提高其函数逼近精度。

4) 本文提出的基于改进型ANFIS的负荷密度指标求取新方法克服了以往通过简单类比或经验选取密度指标的主观随意性太大、结果欠量化等问题,具有输出直观、精度较高等优点,因此有很强的理论性和实用性。

值得说明的是,影响负荷密度指标的因素和负荷密度指标体系的建立不是唯一和固定的,是随着社会的发展和变化而变化,因此还需要在实际工作不断修正和完善。

参考文献

- [1] Willis H L, James E D, Northcote-green. Spatial electric load forecasting: a tutorial review [J]. Proceedings of the IEEE, 1983, 71(2):232-253.
- [2] 程其云, 张晓星, 周淙, 等. 基于粗糙集数据挖掘的配电网小区空间负荷预测方法研究[J]. 电工技术学报, 2005, 20(5): 98-102.
CHENG Qi-yun, ZHANG Xiao-xing, ZHOU Quan, et al. Spatial load forecasting method for distribution net based on rough set data mining approach[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(5): 98-102.
- [3] Chow Mo-Yuen, Tram Hahn. Methodology of urban redevelopment considerations in spatial load forecasting[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(2): 996-1001.
- [4] 杨薛明, 苑津莎, 王剑锋, 等. 基于云理论的配电网空间附和预测方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(6): 30-36.
YANG Xue-ming, YUAN Jin-sha, WANG Jian-feng, et al. A new spatial forecasting method for distribution network based on cloud theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(6): 30-36.
- [5] Wu Hung-Chih, Lu Chan-Nan. A data mining approach for spatial modeling in small area load forecast[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(2):516-521.
- [6] 周淙, 李健, 孙才新, 等. 基于粗糙集和元胞自动机的配电网空间负荷预测[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 68-73.
ZHOU Quan, LI Jian, SUN Cai-xin, et al. Spatial load forecasting for distribution networks based on rough sets and cellular automata[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(25): 68-73.
- [7] 王成山, 黄纯华, 葛少云, 等. 一个实用的城市电力负荷密度预测系统[J]. 电力系统自动化, 1992, 16(6): 41-46.
WANG Cheng-shan, HUANG Chun-hua, GE Shao-yun, et al. A practical forecasting system for urban electric load density[J]. Power System Technology, 1992, 16(6): 41-46.
- [8] 李洪发, 刘中胜, 王江福. 小区负荷密度指标法在格尔木城区电网负荷预测中的应用[J]. 青海电力, 2007, 26(2): 30-33.
LI Hong-fa, LIU Zhong-sheng, WANG Jiang-fu. Application of district load density index method in power grid load forecast of ge'ermu urban areas[J]. Qinghai Electric Power, 2007, 26(2): 30-33.
- [9] 黄磊, 程浩忠, 欧阳武, 等. 城市高负荷密度地区 220/20 kV 供电方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(20): 1-6.
HUANG Lei, CHENG Hao-zhong, OUYANG Wu, et al. 220/20 kV power supply scheme in high load density urban areas[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(20): 1-6.
- [10] 吴斌, 陈章潮, 包海龙. 基于人工神经网络及模糊算法的空间负荷预测[J]. 电网技术, 1999, 23(11): 1-4.
WU Bin, CHEN Zhang-chao, BAO Hai-long. Spatial electric load forecasting based on artificial neural networks and fuzzy algorithm[J]. Power System Technology, 1999, 23(11): 1-4.
- [11] 符杨, 曹家麟, 谢楠, 等. 基于模糊综合评判的负荷密度指标选取新方法[J]. 电网技术, 2007, 31(18): 19-22.
FU Yang, CAO Jia-lin, XIE Nan, et al. A novel fuzzy comprehensive evaluation based method to select load density and index[J]. Power System Technology, 2007, 31(18): 19-22.
- [12] 杨帆, 吴耀武, 雄信银, 等. 用自适应模糊推理系统预测电力短期负荷[J]. 高电压技术, 2007(4): 129-133.
YANG Fan, WU Yao-wu, XIONG Xin-yin, et al. Short-term load forecasting in power system based on adaptive network-based fuzzy inference system[J]. High Voltage Engineering, 2007 (4) : 129-133.
- [13] 陶文斌, 张粒子, 潘弘, 等. 基于双层贝叶斯分类的空间负荷预测[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(7): 13-17.
TAO Wen-bin, ZHANG Li-zi, PAN Hong, et al. Spatial electric load forecasting based on double-level Bayesian classification[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(7): 13-17.
- [14] 王洪彬, 周晖, 王毅, 等. 基于 ANFIS 的电力客户信用判别模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(1): 33-36.
WANG Hong-bin, ZHOU Hui, WANG Yi, et al. Study on discriminant model of electric customers' credit based on ANFIS[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(1): 33-36.

(下转第 39 页 continued on page 39)

方法的结果对故障位置进行判断。

参考文献

- [1] 陈平, 葛耀中, 徐丙垠, 等. 现代行波故障测距原理及其在实测故障分析中的应用-D型原理[J]. 继电器, 2004, 32 (3): 14-17, 28.
CHEN Ping, GE Yao-zhong, XU Bing-yin, et al. Modern travelling wave-based fault location principle and its applications to actual fault analysis—type D principle[J]. Relay, 2004, 32 (3): 14-17, 28.
- [2] 葛耀中, 徐丙垠, 陈平. 利用暂态行波测距的研究[J]. 西安交通大学学报, 1995, 29 (3): 70-75.
GE Yao-zhong, XU Bing-yin, CHEN Ping. Study of fault location based on traveling waves[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1995, 29 (3): 70-75.
- [3] BO Z Q, WELLER G, JIANG F, et al. Application of GPS based fault location scheme for distribution system[C]. //1998 International Conference on Power System Techonlogy Proceedings. Beijing(China): 1998: 53-57.
- [4] GALE P F, TALOR P V, HITCHIN C. Traveling wave fault locator experience on Eskom's transmission network[C]. //Seventh International Conference on Developments in Power System Protection. Amsterdam (Netherlands): 2001: 327-330.
- [5] 邓军波, 施围. 输电线路接地故障行波测距新方法[J]. 继电器, 2000, 28(8): 16-18.
DENG Jun-bo, SHI Wei. A new technique of earth fault location[J]. Relay, 2000, 28(8): 16-18.
- [6] 蒋涛, 陆于平. 不受波速影响的输电线路单端行波故障测距研究[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(12): 29-32.
JIANG Tao, LU Yu-ping. Study of fault locating based on single terminal traveling waves avoiding wave speed influence[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24 (12): 29-32.
- [7] 董新洲, 刘建政, 余学文. 电线路暂态电压行波的故障特征及其小波分析[J]. 电工技术学报, 2001, 16(3): 57-61, 74.
DONG Xin-zhou, LIU Jian-zheng, YU Xue-wen. Fault characteristics and wavelets analysis of the transient voltage travelling waves[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2001, 16 (3): 57-61, 74.
- [8] 董新洲. 小波理论应用于输电线路故障测距研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 1996.
DONG Xin-zhou. Application of wavelet transform to transmission line fault location [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1996.
- [9] 郭方正. 双端行波故障测距方法的深入研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.
GUO Fang-zheng. Study of fault locating based on double terminal traveling waves[D]. Jinan: Shandong University, 2007.
- [10] 马丹丹, 王晓茹. 基于小波模极大值的单端行波故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(3): 55-59.
MA Dan-dan, WANG Xiao-ru. Single terminal methods of traveling wave fault location based on wavelet modulus maxima[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(3): 55-59.
- 收稿日期: 2010-01-10; 修回日期: 2010-03-30
作者简介:
尹晓光 (1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: xingtai1984@126.com
宋琳琳 (1985-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护;
尤志 (1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。
- (上接第 34 页 continued from page 34)
- [15] 杨伟, 彭丽, 张俊芳, 等. 基于模糊神经网络的自适应单相自动重合闸[J]. 继电器, 2005, 13(15): 66-70.
- [16] 雷绍兰, 孙才新, 周淙, 等. 基于径向基神经网络和自适应神经模糊系统的电力短期负荷预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 78-82.
LEI Shao-lan, SUN Cai-xin, ZHOU Quan, et al. Short-term load forecasting method based on RBF neural network and ANFIS system[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 78-82
- [17] 郭恒, 罗可. ANFIS 在短期负荷预测中的应用[J]. 高电压技术, 2006, 32(8): 105-107.
GUO Heng, LUO Ke. Application of adaptive neuro-fuzzy inference system to short-term load forecasting[J]. High Voltage Engineering, 2005, 25(22): 78-82.
- [18] 孙旭, 任震. 空间负荷预测在城市电网规划中的应用[J]. 继电器, 2005, 33(14): 46-49.
SUN Xu, REN Zhen. Application of spatial forecasting in urban power network planning[J]. Relay, 2005, 33(14): 46-49.
- 收稿日期: 2010-01-13
作者简介:
周淙 (1973-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力地理信息系统、配电网规划、电气设备在线监测与故障诊断; E-mail: zhouquan@cqu.edu.cn
孙威 (1983-), 男, 硕士, 研究方向为电力地理信息系统在配电网中的应用、配电网空间负荷预测。