

聚类算法在电网故障元件定位应用中的研究

徐岩, 刘金生, 张亚刚, 王增平

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 利用聚类分析定位故障元件是基于广域测量系统来研究的, 通过对比系统聚类和模糊C均值法在故障元件中的优缺点, 得出当两种方法结合使用时聚类分析定位故障元件的结果更为合理, 并通过例子验证基于聚类分析理论的故障元件定位不仅可以准确地定位出故障元件, 同时可以定位出受故障影响很明显的区域。

关键词: 广域测量系统; 系统聚类; 模糊C均值法; 故障元件定位

Study of application of hierarchical cluster analysis in power net fault location

XU Yan, LIU Jin-sheng, ZHANG Ya-gang, WANG Zeng-ping

(North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: This paper is based on the study of WAMS and the information that this method use comes from PMU. After proved, this paper points out that combined system cluster with fuzzy C-means clustering together for fault location is better than used them singly. And one of the advantages of this method is that this method can not only locate fault elements, but also fault section.

This work is supported by Key Program of National Natural Science Foundation of China (No.50837002).

Key words: WAMS; system cluster; fuzzy C-means clustering; fault location

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)12-0013-06

0 引言

后备保护动作时间一般都在 0.5 s 以上, 传统故障定位依靠保护的動作信息量, 当主保护断路器拒动等情况发生时, 故障定位的时间将大于后备保护的動作时间 (大于 0.5 s), 所以在此情况下自适应后备保护没有时间改变后备保护的定值, 自适应后备保护难以实现^[1]。

广域测量系统(Wide Area Measurement System, WAMS)能够测量到时空坐标下电网全局性的实时动态信息, 它的出现为电力系统后备保护的设计提供了一种新思路。由于广域测量系统所量测的数据传输延时一般在 20~50 ms 以内, 而后备保护的動作时间整定在 0.5 s 以上, 因此在后备保护動作前, 利用广域测量系统提供的系统全局信息完全可以完成故障元件的定位, 从而为自适应后备保护功能的实现奠定基础^[2-4]。

为了更好地为广域自适应后备保护服务, 本文

利用 PMU 提供的实时信息构成样本, 采用数理统计中的系统聚类方法和模糊C均值法对样本进行分类, 对比这两种方法的优缺点, 结合利用这两种方法进行故障元件定位, 最后利用 BPA 软件对 IEEE39 节点系统进行仿真, 结果表明本方法能够很容易、快速的定位出原发性故障。

1 聚类分析介绍

聚类分析是数理统计研究中“物以类聚”的一种理论, 它把一个没有类别标记的样本集按照某种准则划分成若干个子集(类), 使相似的样本尽可能归为一类, 而不相似的样本尽量划分到不同的类中。

系统聚类的计算过程如下:

- 计算故障样本两两之间的距离。
- 构造 N 个类, 每个类只包含一个样品。
- 合并距离最近的两类为一新类。
- 计算新类与当前各类的距离, 判别类的个数是否等于 1, 不为 1 则转向步骤 c。
- 类的个数如果为 1, 结束迭代计算, 决定分类的个数和类, 画聚类图^[5]。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50837002)

模糊分类是指：被分类的对象集合 U 中的对象 u_i 以一定的隶属度隶属于某一类，即所有的对象都分别以不同的隶属度隶属于某一类。因此，每一类就认为是对象集合 U 上的一个模糊子集，于是每一种这样的分类结果所对应的分类就是一个模糊矩阵。

模糊关系的定义： X 、 Y 是论域， $R: X \times Y \rightarrow [0,1]$ 称为从 X 到 Y 的模糊关系。 $R(x, y)$ 称为 x 、 y 具有关系 R 的程度（关联度）。

夹角余弦法是一种得到关联度矩阵 R 的方法，如下：

$$r_{ij} = \frac{|u_i \cdot u_j|}{\|u_i\| \cdot \|u_j\|} \quad (1)$$

其中：对象 $u_i = (u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{im})$ ；对象 $u_j = (u_{j1}, u_{j2}, \dots, u_{jm})$ ；

$$\|u_i\| = \left(\sum_{k=1}^m u_{ik}^2 \right)^{\frac{1}{2}}, i=1, 2, \dots, n; \quad (2)$$

$\|u_i\|$ 为特征性指标向量的模（长度）。

模糊 C 均值法（FCM）是一种分类数给定，寻找出对事物最佳分类方案的方法。此类方案是基于目标函数聚类的，求出适当的模糊分类矩阵 R 及聚类中心矩阵 V ，使目标函数

$$\begin{cases} J(R, V) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c (r_{ik})^q (d_{ik})^2 \\ \text{s.t. } R \in M_{fc} \end{cases} \quad (3)$$

达到最小值，其中 q 称为加权指数（一般取 $q=2$ ），而 d_{ik} 表示对象 U_k 与第 i 类聚类中心向量 V_i 的距离，一般定义为：

$$(d_{ik})^2 = \|U_k - V_i\|_A = (u_k - v_i)^T A (u_k - v_i) \quad (4)$$

其中： A 为 $S \times S$ 阶的对称正定矩阵，一般取 A 为单位矩阵，式(4)对应于欧氏距离。

FCM 计算步骤：

a) 给定聚类类别书 C ， $2 \leq c \leq n$ ， n 是数据样本个数，设定迭代停止阈值 ε ，取一个初始聚类原型模式 $V^{(0)}$ ，设置迭代计数器 $b=0$ ；

b) 计算或更新划分矩阵 $R^{(b)}$

$$\begin{cases} r_{ik}^{(b)} = \left\{ \sum_{j=1}^c \left[\left(\frac{d_{ik}^{(b)}}{d_{jk}^{(b)}} \right)^{\frac{2}{m-1}} \right] \right\}^{-1} & d_{ik}^{(b)} > 0 \\ r_{ik}^{(b)} = 1 & d_{ik}^{(b)} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

c) 更新聚类原型模式矩阵 $V^{(b)}$

$$V_i^{(b+1)} = \frac{\sum_{k=1}^n (r_{ik}^{(b+1)})^m \cdot x_k}{\sum_{k=1}^n (r_{ik}^{(b+1)})^m}, i=1, 2, 3, \dots, c \quad (6)$$

d) 如果 $\|V^{(b)} - V^{(b+1)}\| < \varepsilon$ ，则算法停止并输出划分矩阵 R 和聚类模型 V ，否则令 $b=b+1$ ，转向步骤 b)。

模糊聚类在求出满足所要求的最佳模糊分类矩阵和最佳聚类中心矩阵之后，可以按以下判别原则来进行聚类。

设求得的最佳模糊分类矩阵为：

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{c1} & r_{c2} & \dots & r_{cn} \end{bmatrix}, \forall u_k \in U$$

在 R 的第 K 列中，如果 $r_{ik} = \max_{1 \leq j \leq c} (r_{jk})$ ，则将

对象 u_k 归于第 i 类，即对象 u_k 对哪一类的隶属度最大，就将它归到哪一类^[6-7]。

2 基于聚类分析的故障元件定位

聚类分析的样本是由 PMU 得到的实时故障电气量，分类数的确定是聚类分析的关键。本文研究的是节点很多的广域网，因为节点较多，在确定分类数时不能只是划分为故障元件类和非故障元件类两类，而是要求有一定的细化分类，以使运行人员更便于操作。因此希望把样本分成以下四类：故障元件类；受故障影响很明显的元件类；受故障影响不明显的元件类，基本不受故障影响的元件类。

利用相电流突变量作为该算法的启动元件，将启动前两个周波的故障电气量和启动后几个周波的故障电气量作为样本，将样本代入系统聚类计算过程中迭代计算得到分类过程，利用已知的分类数，确定系统聚类的分类。将样本和初始分类数代入 FCM 计算过程中进行迭代计算，得到 FCM 的分类。分类得到之后，各类的意义如下：计算各类包含的样本均值，如果样本是电压标么值，均值最小的一类是故障元件类，均值次小的一类是受故障影响明显的元件类，均值次大的是受故障影响不明显的元件类，均值最大的一类是基本不受故障影响的元件类；如果样本是电流标么值，则与电压的相反。通过以上分析，可以得到聚类分析应用在电网故障定

位的优点, 即它不仅能够定位出故障元件, 而且能够定位出受故障影响很明显的区域。

3 系统聚类和模糊聚类的对比

系统聚类计算各个样本之间的距离, 利用样本距离远近来分类, 是纯粹的数字上的划分, 缺点是对于处于类边缘的样本没有进行合理的考虑。而在利用聚类分析定位故障元件时, 有些与故障元件不属于同一断面的元件受故障的影响可能也很大, 由它们的故障电气量组成的样本就处于类边缘, 此时如果单纯依靠数字上的划分, 它们可能就不能划分到受故障影响很大的区域类; 或者某个与故障点同一断面的元件的样本数据和其他处于该断面中的元件的数据相差很大, 那么该元件也是处于类边缘, 可能就不会被划分到受故障影响很大的元件类中。利用聚类分析定位故障元件时, 不希望将故障元件同一断面的元件划分到故障元件类, 由于系统聚类单纯依靠各个样本之间的距离来分类, 所以利用系统聚类方法得到的故障元件类不包含有故障元件同一断面的元件, 这是系统聚类的优点。

模糊分类是将所有的对象都分别以不同的隶属度隶属于某一类, 所以模糊分类的一个好处是能够合理的划分处于类边缘的数据。模糊 C 均值法将处于类边缘的数据模糊化, 使处于类边缘的数据不再单一的属于某一类, 而是以一定的隶属度隶属于某些类。对于上段所说的处于类边缘的样本, 模糊 C 均值法将它们模糊化, 使这些处于类边缘的样本不再单一的被划分为某一类, 而是以一定的隶属度隶属于四类, 这是模糊 C 均值法的优点。当与故障点同一断面的元件的样本和故障元件的样本在数值上相差很小时, 这几个与故障点同一断面的元件的样本就是处于类边缘的数据, 利用模糊 C 均值法, 可能将这几个元件划分到故障元件类。

FCM 在故障定位唯一性上不如系统聚类高, 作为改进, 模糊聚类法虽然能够利用关联度矩阵来提高故障元件定位的唯一性, 但是效果有限。模糊关联度矩阵 R 中的元素 $r_{i,j}$ 越接近于 1, 表示对象 u_i , u_j 之间的关系越密切; $r_{i,j}$ 越接近于 0, 表示对象 u_i , u_j 之间的关系越疏远, 所以通过关联度矩阵 R 可以判别出一些故障元件。元件故障后, 故障元件电气量的突变最为厉害, 故障元件与其他元件的关联度可能变得最小, 所以通过比较关联度矩阵行元素均值就能找到故障元件, 均值最小的一行所代表的元件就是故障元件。但是仅仅通过关联度矩阵来定位故障元件, 效果不好, 主要体现在: (1) 如果母线

故障时, 故障母线所连线路的电流幅值都变得很大, 通过关联度矩阵只能找到与其他线路电流幅值差异最大的线路, 不能够定位出故障元件。(2) 关联度矩阵的定义方法有很多种, 某些定义方法可能不能准确定位出故障元件, 例如利用夹角余弦法就不能准确定位出第四节例子的故障元件, 第四节例子关联度矩阵行元素均值最小的是 BUS23-BUS24, 该线路不是故障线路。

利用聚类分析定位故障元件时, 将 FCM 和系统聚类两种方法结合使用效果更好, 不仅确定故障元件的唯一性大为提高, 而且系统聚类结果还可以作为 FCM 结果的一个验证。两种方法聚类的是同一个样本数据, 首先利用系统聚类和模糊 C 均值法对样本分别进行分类, 得到两种分类结果, 如果这两个方法得到的结果相同, 则使模糊 C 均值法得到的故障元件类作为最终输出结果。如果这两个方法得到的结果不同, 则利用系统聚类得到的故障元件类作为故障元件定位的结果, 而受故障影响很明显的区域按如下法则算: 首先 FCM 得到的故障元件加上 FCM 得到的受故障影响很大的元件, 再减去系统聚类得到的故障元件, 那么得到的元件就作为受故障影响很大的元件。以上结论通过下面的例子验证。

4 例子验证

以 IEEE39 节点为例, IEEE39 节点系统如图 1 所示。当线路 BUS17-BUS18 中间发生 A 相接地短路故障时, 零序电流和负序电流数据如表 1 所示。表 1 数据由 BPA 仿真得到, 利用这些数据作为样本进行系统聚类和模糊 C 均值法聚类。

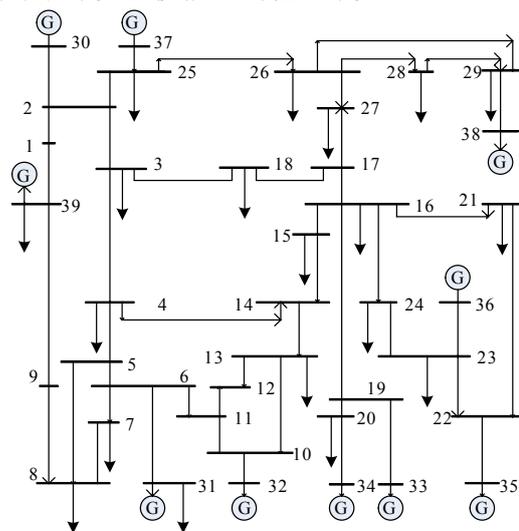


图 1 IEEE39 节点系统图

Fig.1 IEEE-39 bus system

表 1 各条线路不同周波电流幅值
Tab.1 Current of each line in different cycle

A

线路名	线路 编号	零序电流故 障后 0 周波	零序电流故 障后 1 周波	零序电流故 障后 2 周波	零序电流故 障后 3 周波	负序电流故 障前 1 周波	负序电流故 障后 0 周波	负序电流故障 后 1 周波	负序电流故 障后 2 周波
BUS1-BUS2	1	729.61	729.64	729.74	729.90	0.00	334.00	334.02	334.06
BUS1-BUS39	2	729.61	729.64	729.74	729.90	0.00	334.00	334.02	334.06
BUS2-BUS3	3	1 442.83	1 442.90	1 443.10	1 443.42	0.00	944.84	944.88	945.01
BUS2-BUS25	4	244.49	244.50	244.53	244.59	0.00	87.57	87.57	87.58
BUS3-BUS4	5	976.98	977.02	977.15	977.37	0.00	855.10	855.14	855.26
BUS3-BUS18	6	2 575.18	2 575.30	2 575.65	2 576.22	0.00	2 291.54	2 291.65	2 291.96
BUS4-BUS5	7	931.13	931.18	931.30	931.51	0.00	494.26	494.29	494.35
BUS4-BUS14	8	87.61	87.61	87.63	87.65	0.00	21.83	21.83	21.84
BUS5-BUS6	9	188.49	188.48	188.52	188.56	0.00	238.89	238.90	238.93
BUS5-BUS8	10	657.94	657.97	658.06	658.21	0.00	259.35	259.36	259.40
BUS6-BUS7	11	520.37	520.40	520.47	520.58	0.00	203.14	203.15	203.17
BUS6-BUS11	12	360.85	360.87	360.91	361.00	0.00	125.57	125.57	125.59
BUS7-BUS8	13	446.69	446.71	446.77	446.87	0.00	93.54	93.54	93.56
BUS8-BUS9	14	956.80	956.84	956.97	957.19	0.00	143.85	143.85	143.87
BUS9-BUS39	15	693.33	693.37	693.46	693.62	0.00	146.98	46.98	147.00
BUS16-BUS19	16	169.46	169.46	169.49	169.53	0.00	864.59	864.63	864.75
BUS16-BUS17	17	1 942.73	1 942.82	1 943.08	1 943.51	0.00	3 028.05	3 028.19	3 028.60
BUS15-BUS16	18	1 042.40	1 042.44	1 042.58	1 042.82	0.00	754.12	754.16	754.26
BUS14-BUS15	19	823.59	823.63	823.74	823.93	0.00	422.20	422.22	422.27
BUS13-BUS14	20	543.10	543.13	543.21	543.33	0.00	407.86	407.88	407.94
BUS10-BUS13	21	496.88	496.90	496.96	497.08	0.00	357.13	357.15	357.20
BUS10-BUS11	22	496.85	496.88	496.95	497.06	0.00	128.05	128.06	128.08
BUS16-BUS21	23	361.61	361.63	361.67	361.76	0.00	699.73	699.76	699.85
BUS16-BUS24	24	272.72	272.72	272.76	272.82	0.00	333.50	333.51	333.56
BUS17-BUS18	25	3 856.47	3 856.65	3 857.17	3 858.03	0.00	3 979.77	3 979.95	3 980.49
BUS17-BUS27	26	1 841.98	1 842.06	1 842.31	1 842.72	0.00	963.73	963.77	963.90
BUS21-BUS22	27	218.95	218.96	218.99	219.04	0.00	429.10	429.12	429.18
BUS22-BUS23	28	73.71	73.71	73.73	73.74	0.00	30.28	30.28	30.29
BUS23-BUS24	29	31.26	31.26	31.27	31.27	0.00	403.41	403.43	403.48
BUS25-BUS26	30	152.74	152.75	152.77	152.80	0.00	379.18	379.20	379.25
BUS26-BUS27	31	1 519.90	1 519.97	1 520.17	1 520.51	0.00	802.09	802.12	802.23
BUS26-BUS28	32	676.69	676.72	676.81	676.96	0.00	211.83	211.84	211.87
BUS26-BUS29	33	671.51	671.54	671.64	671.79	0.00	198.83	198.84	198.87
BUS28-BUS29	34	168.27	168.27	168.30	168.33	0.00	194.00	194.01	194.03

4.1 利用系统聚类

计算样本之间的的距离用欧氏距离计算。

$$d_{ij} = [\sum_{k=1}^p (x_{ik} - x_{jk})^2]^{1/2} \quad (7)$$

式中： x_{ij} 表示第 i 个样品的第 j 个指标； d_{ij} 表示第 i 个样品与第 j 个样品之间的距离。

类与类之间的距离定义用最短距离法，类与类之间的距离等于类 G_p 和类 G_q 中最邻近的两个样品的距离，

$$D(p, q) = \min \{d_{jl} \mid j \in G_p, l \in G_q\} \quad (8)$$

将公式 (7) 和 (8) 代入系统聚类计算过程中得到结果如下：系统聚类图如图 2 所示，横坐标代

表线路编号, 编号所代表的对应线路参照表 1 前两列。纵坐标表示两类之间的欧氏距离, 例如 32 和 33 聚为一类, 之间的欧氏距离 0.024 8。

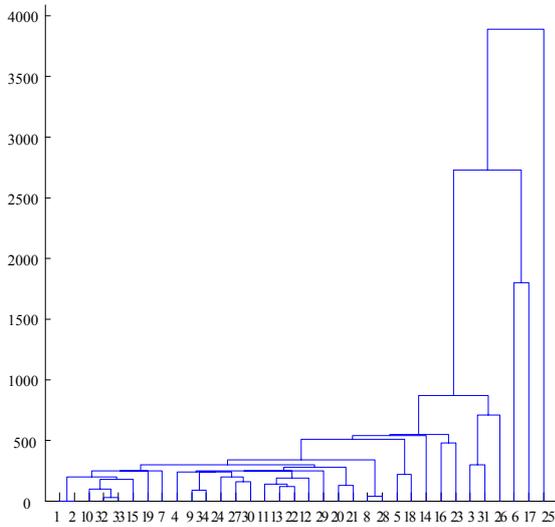


图 2 系统聚类图

Fig.2 Hierarchical clustering plot

分类的目的是为了区分出故障元件, 受故障影响明显的区域, 受故障影响不明显的区域以及基本不受故障影响的区域, 故将样本分成四类, 计算结果如表 2 所示。BUS17-BUS18 类的均值最大, 故线路 BUS17-BUS18 是故障元件, 这与实际故障相符。

4.2 FCM

初始化聚类类别数 $c = 4$, 数据样本个数 $n = 34$, 样本特征值维数 $m = 8$, 选择迭代停止条件 $\|V^{(b)} - V^{(b+1)}\| < \varepsilon$, 并设定迭代停止阈值

$\varepsilon = 0.0005$, 加权指数 $q = 2$, 初始聚类中心矩阵 $V(0)$ 为表一中第一行、第三行、第四行、第五行元素所组成的矩阵。

将上述数据代入式 (5) 及式 (6) 中进行迭代运算, 经过 83 次迭代运算之后, 算法收敛, 计算结果如表 2 所示。因为类 BUS17-BUS18、BUS16-BUS17 均值最大, 所以是故障元件类。类 BUS2-BUS3、BUS3-BUS18、BUS17-BUS27、BUS26-BUS27 均值次大, 所以是受故障影响很明显的区域。

4.3 两种方法得到结果的对比

FCM 把受故障影响最大的线路 BUS16-BUS17 误认为是故障线路, 这是模糊化类边缘数据的结果, 同时系统聚类得到的受故障影响很大的区域很狭隘, 这是没有将类边缘数据模糊化的结果。

4.4 聚类分析定位故障元件的结果

通过对比以上结果, 发现利用系统聚类得到的故障元件和利用 FCM 得到的故障元件不同, 所以把由系统聚类得到的故障元件作为聚类分析故障元件定位的结果, 即认为线路 BUS17-BUS18 故障。受故障影响很明显的区域为: FCM 得到的故障元件与受故障影响很大的元件之和减去系统聚类得到的故障元件, 即 BUS16-BUS17、BUS2-BUS3、BUS3-BUS18、BUS17-BUS27、BUS26-BUS27。这种情况带有偶然性, 一般情况下, FCM 和系统聚类得到的故障元件是相同的, 此时, 聚类分析定位故障元件的结果就以 FCM 得到的分类为准。

表 2 聚类分析定位故障元件的结果

Tab.2 Result of fault location based on cluster analysis

	故障元件类	受故障影响很明显的类	受故障影响很小的类	基本不受故障影响的类
系统聚类	BUS17-BUS18	BUS16-BUS17	BUS3-BUS18	其余的线路
模糊 C 均值法	BUS17-BUS18 BUS16-BUS17	BUS2-BUS3、BUS3-BUS18、 BUS17-BUS27、BUS26-BUS27	BUS2-BUS25、BUS4-BUS14、BUS5-BUS6、BUS6-BUS11、 BUS7-BUS8、BUS16-BUS19、BUS16-BUS21、 BUS16-BUS24、BUS21-BUS22、BUS22-BUS23、 BUS23-BUS24、BUS25-BUS26、BUS28-BUS2	其余的线路
处于类边缘的元件	BUS16-BUS17	BUS17-BUS27、BUS26-BUS27 BUS2-BUS3		
最终输出结果	BUS17-BUS18	BUS16-BUS17、BUS2-BUS3、 BUS3-BUS18、BUS17-BUS27、 BUS26-BUS27		

5 结论

传统故障定位方法主要以保护开关量作为信息量,在时限上不能满足广域自适应后备保护的要求。在 PMU 广泛应用的实际背景下,本文将广域信息量引入到故障定位领域,利用模糊 C 均值法和系统聚类法进行最优分类,对比这两种方法的特点,结合使用这两种方法实现了故障元件以及故障区域的界定。通过 BPA 仿真验证,两种方法结合使用能够快速、准确地定位出故障元件和故障区域。

参考文献

- [1] 许树楷, 谢小荣, 辛耀中. 基于同步相量测量技术的广域测量系统应用现状及发展前景[J]. 电网技术, 2005, 29 (2): 45-49.
XU Shu-kai, XIE Xiao-rong, XIN Yao-zhong. Present application situation and development tendency of synchronous phase measurement technology based wide area measurement system[J]. Power System Technology, 2005, 29 (2): 45-49.
- [2] 常乃超, 兰洲, 甘德强, 等. 广域测量系统在电力系统分析及控制中的应用综述[J]. 电网技术, 2005, 29 (10): 46-50.
CHANG Nai-chao, LAN Zhou, GAN De-qiang, et al. A survey on applications of wide-area measurement system in power system in power system analysis and control[J]. Power System Technology, 2005, 29 (10): 46-50.
- [3] 王冬青, 苗世洪, 林湘宁, 等. 基于光纤网的后备保护系统的研制[J]. 电网技术, 2006, 30 (7): 77-81.
WANG Dong-qing, MIAO Shi-hong, LIN Xiang-ning, et al. Development of a novel backup protection system based on optic fiber network[J]. Power System Technology, 2006, 30 (7): 77-81.
- [4] 徐慧明, 毕天姝, 黄少锋, 等. 基于潮流转移因子的广域后备保护方案[J]. 电网技术, 2006, 30 (15): 69-75.
XU Hui-ming, BI Tian-shu, HUANG Shao-feng, et al. A wide area backup protection scheme based on flow transferring relativity factor[J]. Power System Technology, 2006, 30(15): 69-75.
- [5] 张尧庭, 方开泰. 多元统计分析引论[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
ZHANG Yao-ting, FANG Kai-tai. Introduction of multivariate statistical analysis[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [6] 高新波. 模糊聚类分析及其应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
GAO Xin-bo. The analysis and application of fuzzy cluster[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004.
- [7] 顾洁, 崔旻. 电力系统中长期负荷预测的最大模糊熵模型研究[J]. 电力自动化设备, 2003, 21 (8): 55-60.
GU Jie, CUI Min. Study on maximum fuzzy entropy model of mid-and long-term load forecast in power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 21 (8): 55-60.

收稿日期: 2009-08-20; 修回日期: 2009-11-20

作者简介:

徐岩 (1976-), 男, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事电力系统继电保护, 变电站综合自动化方面的教学和研究; E-mail: xy19761001@yahoo.com.cn

刘金生 (1986-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统继电保护方面的研究; E-mail: liujinsheng322@yahoo.com.cn

张亚刚 (1978-), 男, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护和非线性复杂系统理论。

(上接第 12 页 continued from page 12)

QIN Zhen-fang, YUE Shun-min, YU Yi-xin, et al. Price elasticity matrix of demand current retail power market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (5): 16-19.

- [12] Conejo A J, Carrion M. Risk-constrained electricity procurement for a large consumer[J]. IEE Proc-Gener, Transm, and Distrib, 2006,153(4).

收稿日期: 2009-07-23; 修回日期: 2009-11-19

作者简介:

侯贺飞 (1986-), 女, 硕士研究生, 主要从事电力市场与电力交易优化研究; E-mail: houhefei86@163.com

刘俊勇 (1963-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力市场、电力系统稳定与控制。