

# 基于模糊聚类理论的电网故障元件定位

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, 河北省 保定市 071003)

## Location of Faulty Power Network Component Based on Fuzzy Cluster Analysis

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

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China)

**ABSTRACT:** As for traditional fault location methods utilizing action information of protection, the fault is located after the action of protection is completed, so it is difficult to meet the requirement of wide-area adaptive backup protection in time limit, especially under the condition that the substation DC system is out of work the primary fault is hard to be located by traditional methods. For this reason, based on real-time measurement information from wide-area measurement system (WAMS), the authors propose a method, in which firstly optimal classification of samples consisting of wide-area information is performed by fuzzy C- averaging method, then the faulty component and fault area are located. Simulation results show that the proposed method can locate primary faults rapidly and correctly, and the range evidently affected by the fault can be determined, and the requirement of wide-area adaptive backup protection in time limit can also be met.

**KEY WORDS:** wide-area measurement system (WAMS); fuzzy C- averaging method; location of fault component

**摘要:** 利用保护动作信息量的传统故障定位方法是在保护动作之后完成故障定位的,在时限上难以满足广域自适应后备保护的要求,特别在站用直流电源消失的情况下,传统方法很难定位出原发性故障。针对上述问题,作者基于广域测量系统(wide area measurement system, WAMS)的实时量测信息,提出应用模糊 C 均值法对广域信息数据构成的样本进行最优分类,从而定位出故障元件和故障区域的方法。仿真结果表明,该方法不仅能快速、准确地定位出原发性故障,同时能够界定出受故障影响明显的区域,而且满足广域自适应后备保护的时限性要求。

**关键词:** 广域测量系统; 模糊 C 均值法; 故障元件定位

## 0 引言

广域测量系统(wide area measurement system, WAMS)的出现为电力系统保护的设计提供了一种

新思路。对于广域自适应后备保护来讲,电网故障元件定位和故障区域的界定是对相关后备保护定行修改的前提<sup>[1-3]</sup>。

以往研究的输电网络故障诊断主要是利用现代人工智能技术对一些信息量(主要是各级各类保护装置产生的报警信息、断路器的状态变化信息)进行模拟和分析,并且在信息的利用上较为单一。自适应后备保护的前提是任何情况下(如直流电源消失)都能快速、准确地定位出故障元件,虽然采用人工智能技术的方法优点较多,但这些方法应用到广域自适应后备保护中都有些不足,例如:人工神经网络法具有较好的内插结果,但外推时可能误差较大,学习算法收敛的速度一般比较慢;模糊理论和专家系统结合的方法当系统比较大时完成诊断的速度也比较慢;遗传算法则比较难建立合理的输电网络故障诊断数学模型。最为严重的是当变电站直流电源消失时,因为这些方法都要利用后备保护的信息来定位故障,在耗时上肯定大于后备保护的動作时间,所以后备保护的自适应很难实现<sup>[4-8]</sup>。

现阶段,广域信息在电力系统故障诊断领域的应用多集中在基于多端电气量的输电线路故障测距,而输电网的故障元件定位是故障测距等针对具体故障元件进行处理的前提。广域信息除了能够保证全网状态的实时可观外,在故障发展的过程中能够同步地记录全网各个相量测量单元(phasor measurement unit, PMU)安置点电气量的变化,用于故障定位的信息量很多,这为在线实时定位故障元件提供了多种事实依据<sup>[9-10]</sup>。

为了更好地服务于广域自适应后备保护,克服传统故障元件定位在自适应后备保护中的不足,本文利用 PMU 提供的实时信息构成样本,采用数理统计中的聚类分析对样本进行分类,从而界定出故

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50837002)。

Project Supported by Key Program of National Natural Science Foundation of China (50837002).

障元件和故障区域,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方便、快捷地定位出原发性故障,并且在时间上能够满足广域自适应后备保护的要求。

### 1 模糊 C 均值法介绍

聚类分析是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。

模糊分类是指:被分类的对象集合矩阵  $U$  中的对象  $U_i$  以一定的隶属度隶属于某一类,即所有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  $U$  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<sup>[11-13]</sup>。

模糊 C 均值法(fuzzy C mean, FCM)是一种在分类数给定的前提下,确定事物最佳分类方案的方法。最佳分类方案根据目标函数进行聚类,通过求取适当的模糊分类矩阵  $R$  及聚类中心矩阵  $V$ ,使目标函数达到最小值。目标函数的一般形式如下:

$$J(R, V) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c (r_{ik})^q (d_{ik})^2$$

s.t.  $R \in M_{fc}$

式中:  $q$  称为加权指数(一般取  $q=2$ );  $r_{ik}$  为对象  $U_k$  隶属于第  $i$  类的隶属度;  $c$  为聚类别数;  $n$  为样本个数;  $d_{ik}$  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

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

其中:  $A$  为  $S \times S$  阶的对称正定矩阵,一般取  $A$  为单位矩阵,上式对应于欧氏距离。 $M_{fc}$  为  $U$  被分成  $c$  类的模糊分类空间。

$$M_{fc} = \{r_{ij} \in [0,1], \forall i, j\}$$

$$\sum_{i=1}^c r_{ij} = 1, \forall j; \sum_{j=1}^c r_{ij} > 0, \forall i\}$$

模糊 C 均值法计算步骤如下:

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

2) 计算或更新划分矩阵  $R^{(b)}$ 。

$$\begin{cases} r_{ik}^{(b)} = [\sum_{j=1}^c (d_{ik}^{(b)} / d_{jk}^{(b)})^{2/(q-1)}]^{-1}, & d_{ik}^{(b)} > 0 \\ r_{ik}^{(b)} = 1, & d_{ik}^{(b)} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

3) 更新聚类原型模式矩阵  $V^{(b+1)}$ 。

$$V_i^{(b+1)} = \frac{\sum_{k=1}^n [(r_{ik}^{(b)})^q \cdot U_k]}{\sum_{k=1}^n (r_{ik}^{(b)})^q}, \quad i=1,2,3,\dots,c \quad (2)$$

4) 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 2)。

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

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

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<sup>[14-15]</sup>。

### 2 基于 FCM 的电网故障元件定位

聚类分析的样本是由各个 PMU 上传的实时故障特征量组成的。当故障发生后,电网一定区域内元件的电压、电流标幺值会产生突变,按照变化的大小可以对元件进行归类。分类数的确定是聚类分析的关键,它需要由电力系统实际应用情况来决定。对于节点数较少的电网,一般只要求分为 2 类,因为从根本上说小型电力系统只要求区分出故障元件和非故障元件。而本文研究的是节点很多的复杂大电网,在确定分类数时不能只考虑分成故障元件类和非故障元件类,而是要求在一定程度上将分类细化,从而使所得结论对运行人员的操作更有帮助。因此,本文将样本分成以下 4 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以及基本不受故障影响类。即分类数定为 4。

本文利用相电流突变量启动故障元件定位算法,将启动时刻前 2 个周期的电气量和启动时刻后  $N$  个周波的电气量组成样本( $N$  小于故障切除时的周期数),将样本和初始分类数带入 FCM 中进行迭代计算得到分类。分类得到之后,各类的意义如下:计算各类包含的样本的均值,对于 WAMS,如果样本是电压标幺值,均值最小的一类是故障元件,均值次小的一类是受故障影响明显的元件,均值次大的是受故障影响不明显的元件,均值最大的一类是

基本不受故障影响的元件；如果样本是电流标幺值，均值最大的一类是故障元件，均值次大的一类是受故障影响明显的元件，均值次小的是受故障影响不明显的元件，均值最小的一类是基本不受故障影响的元件。

以上分类结果表明，聚类分析理论在电网故障元件定位方面有着突出的优势。基于该理论的故障定位算法不仅能够准确可靠地定位出故障元件，而且能界定受故障影响最大的区域。

### 3 算法有效性分析

#### 3.1 计算时限

本文研究是为广域自适应后备保护服务的，因此在后备保护动作之前要完成以下工作：定位出故障元件和受故障影响明显的区域，改变后备保护的定值。后备保护动作时限一般是 1 s，所以对于基于聚类分析理论的故障定位在时间上有要求。因为 WAMS 高速数据传输的数据更新时间是 20~50 ms，需要故障后 2~3 个周期的数据，而后备保护定值的更改同样需要时间，所以利用 FCM 定位出故障元件的时间应该小于 750 ms。对样本进行聚类分析并定位故障元件的整个过程所消耗的时间均满足要求，如 IEEE39 节点系统的耗时在 62~159 ms 之间。

#### 3.2 连锁故障

广域自适应后备保护的最终目标是防止连锁故障，从而避免引起大面积停电。连锁故障往往是在原发性故障的基础上发展而来的，所以本文主要是找出原发性故障，不过多涉及连锁故障的情况。

#### 3.3 主保护开关拒动或站用直流电源消失

PMU 能够测量线路的电流相量，当线路故障发生后没有出现主保护拒动、误动、站用直流电源消失时，断路器切除故障线路，PMU 测得故障线路电流相量为零，这不需要任何数学方法就能判别出故障元件；当故障发生后出现了保护拒动等情况时，仅找出断路器切除的元件是不够的，需要找出原发性故障，这里我们采用模糊聚类分析方法来实现。通过以上分析，可以得出：聚类分析理论的故障定位主要研究的是当发生主保护开关拒动或站用直流电源消失等情况时对原发性故障的定位。

在以往的故障定位研究中，定位原发性故障是个难点，而且时间上也不能够满足广域自适应后备保护的要求。本文方法能够快速定位原发性故障，

因为利用的信息量是 PMU 的电流、电压等故障特征量，当站用直流电源消失时，因 PMU 配置冗余性很高，这些量可以由相邻的 PMU 计算得到。原发性故障定位可以利用故障前后几个周期的数据进行聚类分析得到，样本指标选用电压、电流。原发性故障定位完成之后，实际故障切除的区域可以由 PMU 测量线路的电流相量得到，如果测得线路的电流为 0，则这些线路是实际切除故障的区域。原发性故障的定位可以通过第 4 节的例子来验证。

#### 3.4 广域信息部分缺失或信息错误

如果通信发生短时故障，为数不多的几个数据出现错误或者丢失时，因为样本指标的个数较多，1 个样本的 1 个指标数据出错或者丢失对该样本的特征改变不是很明显，所以利用聚类分析进行故障定位有很好的容错性，它能够正确定位出故障元件和故障区域，可以通过第 4 节的例子来验证。

#### 3.5 故障特征量的利用

系统出现故障后，电压、电流、有功、无功、频率等出现了突变，利用不同的故障特征量进行聚类的效果是不同的。通过仿真实验得到线路各种故障情况下容易被聚类分析识别的故障特征量：1) 单相接地短路时，利用负序电流、负序电压、零序电流、零序电压能够得到较好的聚类结果，非故障相电流得到的结果不正确；2) 两相短路时，选用负序电流、负序电压聚类效果比较好；3) 母线三相短路时，选用电流标幺值和电压标幺值聚类效果比较好；4) 线路三相短路时，选用电流标幺值和电压标幺值聚类效果比较好。

从容错性上分析，如果容易辨识的故障特征量在聚类分析中利用得越多，其容错性就越高。利用的故障特征量多主要体现在样本指标上，样本指标可以是多种故障特征量的组合，也可以是多种故障特征量多个周期的组合。

#### 3.6 母线故障

利用模糊聚类对非线路故障的分析类似于对线路故障的分析。例如对于母线三相短路，故障后，启动元件启动故障定位程序，程序选择广域信息构成样本(主要是利用广域信息的母线电压标幺值和线路电流标幺值)，对样本进行聚类分析，得到分类结果，找出故障元件类与受故障影响很明显的元件类。该方法对于非线路故障的适用性将通过 4.3 节进行验证。

### 4 仿真验证

#### 4.1 主保护断路器拒动而后备保护动作的情况

本文以 IEEE39 节点系统为例, IEEE39 节点系统的网络图见图 1。线路 17-18 距离首端 40%处发生三相短路, 第 4 个周期母线 17 侧断路器正常动作, 母线 18 侧断路器拒动, 第 30 个周期后备保护切除母线 3 侧断路器。电压数据如表 1 所示, 数据都是由 BPA 仿真得到。利用故障前 1 个周期和故障后 3 个周期的数据进行聚类分析。

初始化聚类类别数  $c=4$ , 数据样本个数  $n=39$ , 样本特征值维数  $m=4$ , 选择迭代停止条件  $\|V^{(b)} - V^{(b+1)}\| < \varepsilon$ , 并设定迭代停止阈值  $\varepsilon=0.0005$ ,

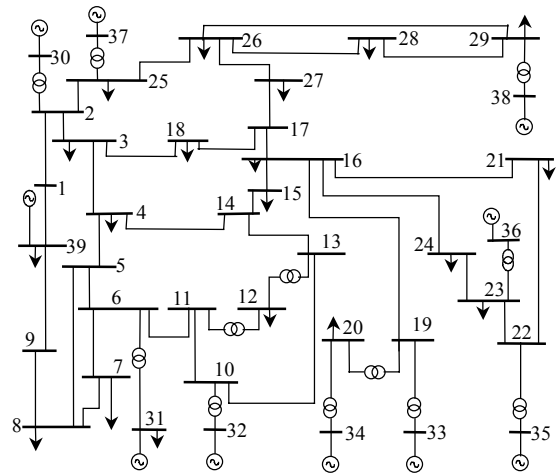


图 1 IEEE 39 节点系统  
Fig. 1 IEEE 39 bus system

表 1 各个节点不同周期的电压值  
Tab. 1 Voltage of each node in different cycle

节点	电压值/pu								
	故障前 1个周期	故障后 第0个周期	故障后 第1个周期	故障后 第2个周期	母线 17 侧断路器 跳开前 1 周期	母线 17 侧断路器 跳开(第 4 周期)	后备保护 切除前 1 周期	后备保护切除 (第 30 个周期)	后备保护切除 后 1 周期
1	1.031 9	0.861 4	0.861 3	0.860 9	0.859 3	0.911 2	0.800 0	0.897 7	0.889 4
2	1.008 2	0.644 8	0.644 7	0.644 2	0.642 2	0.750 1	0.662 4	0.885 6	0.879 2
3	0.935 9	0.397 2	0.397 1	0.396 8	0.395 6	0.474 0	0.414 4	0.814 0	0.807 4
4	0.901 3	0.542 2	0.542 0	0.541 6	0.540 0	0.674 9	0.579 5	0.772 1	0.764 9
5	0.917 6	0.642 3	0.642 1	0.641 7	0.639 6	0.756 5	0.633 1	0.769 7	0.761 2
6	0.925 6	0.659 8	0.659 6	0.659 1	0.657 0	0.773 2	0.648 0	0.776 4	0.767 9
7	0.899 6	0.651 5	0.651 3	0.650 8	0.648 8	0.755 9	0.624 0	0.747 3	0.738 4
8	0.897 6	0.655 5	0.655 3	0.654 8	0.652 7	0.756 6	0.621 5	0.743 4	0.734 2
9	0.987 6	0.857 9	0.857 7	0.857 4	0.855 9	0.909 4	0.788 7	0.855 9	0.847 2
10	0.950 7	0.669 1	0.669 0	0.668 5	0.666 7	0.806 7	0.697 7	0.815 8	0.808 30
11	0.940 6	0.664 0	0.663 8	0.663 4	0.661 5	0.793 8	0.679 1	0.800 6	0.792 81
12	0.924 5	0.639 7	0.639 5	0.639 1	0.637 3	0.778 8	0.671 0	0.791 3	0.783 92
13	0.941 1	0.638 0	0.637 9	0.637 5	0.635 7	0.791 4	0.686 7	0.810 1	0.802 93
14	0.923 8	0.565 3	0.565 2	0.564 8	0.563 2	0.759 2	0.665 7	0.802 4	0.795 8
15	0.921 3	0.446 8	0.446 8	0.446 5	0.445 4	0.829 5	0.767 4	0.839 7	0.835 5
16	0.946 9	0.409 0	0.408 9	0.408 7	0.408 0	0.884 0	0.834 5	0.881 5	0.878 3
17	0.949 2	0.137 5	0.137 5	0.137 4	0.137 1	0.884 8	0.832 5	0.881 6	0.878 2
18	0.937 6	0.106 8	0.106 7	0.106 7	0.106 3	0.127 4	0.111 4	0	0
19	0.990 2	0.651 0	0.651 0	0.650 8	0.650 3	0.953 2	0.920 3	0.945 9	0.943 7
20	0.900 8	0.645 6	0.645 6	0.645 6	0.645 3	0.874 3	0.848 4	0.866 2	0.864 3
21	0.959 5	0.525 3	0.525 2	0.525 0	0.524 3	0.910 5	0.867 5	0.902 1	0.899 4
22	1.012 5	0.667 1	0.667 1	0.666 9	0.666 2	0.975 2	0.938 5	0.962 9	0.960 8
23	1.008 1	0.667 9	0.667 8	0.667 6	0.666 9	0.971 4	0.935 3	0.959 2	0.957 2
24	0.959 4	0.448 0	0.447 9	0.447 8	0.447 0	0.900 3	0.852 1	0.895 6	0.892 5
25	1.024 9	0.667 6	0.667 6	0.667 4	0.666 5	0.821 7	0.759 0	0.934 9	0.929 7
26	1.006 3	0.505 0	0.504 9	0.504 7	0.503 5	0.892 2	0.830 7	0.924 3	0.920 2
27	0.973 5	0.333 9	0.333 8	0.333 7	0.332 9	0.883 1	0.826 3	0.899 0	0.895 2
28	1.026 1	0.653 4	0.653 2	0.652 8	0.651 3	0.941 3	0.880 5	0.945 0	0.941 4
29	1.033 3	0.701 2	0.701 0	0.700 6	0.699 0	0.957 9	0.898 8	0.954 4	0.951 0
30	1.047 0	0.824 5	0.824 4	0.824 1	0.822 9	0.889 2	0.833 3	0.968 7	0.964 5
31	0.982 0	0.813 9	0.813 7	0.813 2	0.811 2	0.885 2	0.770 8	0.842 8	0.835 8
32	0.983 0	0.802 6	0.802 5	0.802 1	0.800 7	0.891 3	0.803 7	0.872 5	0.866 8
33	0.997 0	0.764 1	0.764 0	0.763 9	0.763 4	0.972 5	0.949 6	0.965 4	0.963 9
34	1.012 0	0.797 7	0.797 7	0.797 7	0.797 7	0.991 6	0.968 2	0.981 3	0.979 3
35	1.049 0	0.795 9	0.795 8	0.795 7	0.795 1	1.023 2	0.994 1	1.009 5	1.008 0
36	1.063 0	0.855 8	0.855 7	0.855 6	0.855 0	1.042 4	1.018 4	1.029 9	1.028 7
37	1.027 0	0.786 8	0.786 7	0.786 4	0.785 2	0.887 9	0.835 2	0.952 4	0.949 2
38	1.026 0	0.785 7	0.785 6	0.785 2	0.783 7	0.971 7	0.920 8	0.957 4	0.954 8
39	1.030 0	0.981 7	0.981 6	0.98 5	0.981 0	0.998 0	0.954 6	0.979 1	0.975 9

加权指数  $q=2$ 。将上述数据代入式(1)及式(2)中进行迭代运算, 所得分类结果如下: 1) 第 1 类, 母线 2、5、6、7、8、10、11、12、13、14、19、20、22、23、25、28、29; 2) 第 2 类, 母线 17、18; 3) 第 3 类, 母线 1、9、30、31、32、33、34、35、36、37、38、39; 4) 第 4 类, 母线 3、4、15、16、21、24、26、27。计算 4 类样本均值, 得到结果为: 0.728 9、0.327 4、0.875 3、0.575 7。由于是电压标幺值, 类均值最小的是第 2 类, 它是故障区域; 类均值次小的是第 4 类, 这是受故障影响很明显的母线。这与线路 17-18 距离首端 40% 处发生三相短路相符, 计算耗时为 0.124 s。因为 30 个周期之后, 线路 17-18 和 3-18 电流为 0, 所以它们是实际被切除的线路。

## 4.2 广域信息部分缺失或信息错误的情况

线路 17-18 距离首端 40% 处发生三相短路, 母线 18 第 2 个周期的数据因 PMU 短时通信故障得不到, 仿真时将第 2 个周期的数据置为零, 将表 1 中母线 18 第 2 个周期的数据 0.106 7 置成 0。利用故障前 1 个周期和故障后 2 个周期的数据进行聚类。

利用模糊 C 均值法得到的分类结果与 4.1 得到的分类结果相同, 但是分类矩阵和聚类中心矩阵与 4.1 节不相同。广域信息错误时, 其分析方法与数据丢失时的分析方法相同。通过以上分析说明利用聚类分析进行故障定位有很好的容错性。

## 4.3 聚类结果汇总

线路 17-18 发生各种故障时和母线 17 发生三相短路故障时聚类结果如表 2 所示。

表 2 模糊聚类仿真结果

Tab. 2 Summary of fuzzy cluster results

故障类型	故障元件	受故障影响很明显的元件	受故障影响不大的元件	基本不受故障影响的元件	计算耗时/ms
线路 17-18 中间发生 A 相接地短路	线路 17-18	线路 3-18、2-3、16-17、17-27、26-27	线路 1-2、1-39、3-4、4-5、5-8、6-7、8-9、9-39、15-16、14-15、13-14、10-13、10-11、26-28、26-29	其余线路	62.0
线路 17-18 首端保护出口处发生 BC 两相接地短路	线路 17-18	同上	同上	其余线路	140.0
线路 17-18 首端保护出口处发生 BC 两相短路	母线 17、18	母线 3、4、14、15、16、21、24、26、27	母线 2、5、6、7、8、10、11、12、13、19、20、22、23、25、28	其余母线	125.0
母线 17 发生三相短路故障	母线 17	母线 16、18、27	母线 2、3、4、14、15、19、21、22、23、24、25、26、28、29	其余母线	159.0

## 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 均值法对广域信息数据构成样本进行最优分类, 能快速、准确地界定故障元件以及故障区域。通过 BPA 仿真计算的结果表明, 在直流电源消失、保护拒动、广域信息部分缺失或信息错误等情况下, 本文方法不仅能够准确定位出原发性故障, 而且能满足广域自适应后备保护的时限性要求。

本文所做工作是在假设电力系统全网配置 PMU 的前提下进行的, 考虑到 PMU 配置的经济性与信息的冗余性, 广域信息的边界划分、构成方式和冗余机制等问题还有待进一步研究。

## 参考文献

[1] 刘振亚. 加快建设坚强国家电网、促进中国能源可持续发展[J]. 中国电力, 2006, 39(9): 1-3.  
[2] 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): 65-71.  
Xu Huiming, Bi Tianshu, Huang Shaofeng, et al. A wide area backup protection scheme based on flow transferring relativity factor [J]. Power System Technology, 2006, 30(15): 65-71(in Chinese).  
[3] 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): 44-49.  
Xu Shukai, Xie Xiaorong, Xin Yaozhong. Present application situation and development tendency of synchronous phase measurement technology based wide area measurement system[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 44-49(in Chinese).  
[4] 张友军, 李鹏, 徐迪飞, 等. 基于人工神经网络的输电线路故障定位方法[J]. 机电工程技术, 2004, 33(2): 50-53.  
Zhang Youjun, Li Peng, Xu Difei, et al. A fault location algorithm for circuit line based on ANN[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2004, 33(2): 50-53(in Chinese).  
[5] 张东英, 柳焯, 杨以涵. 解释型变电站故障诊断专家系统[J]. 华北电力大学学报, 1998, 25(1): 1-7.  
Zhang Dongying, Liu Zhuo, Yang Yihan. Explanation fault diagnosis expert system for substation[J]. Journal of North China Electric Power University, 1998, 25(1): 1-7(in Chinese).  
[6] 王绍部, 龚庆武, 舒乃秋, 等. 基于进化算法的模糊抗差理论在输电线路故障定位中应用[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(3): 44-47.  
Wang Shaobu, Gong Qingwu, Shu Naiqiu, et al. Application of evolutionary algorithm based fuzzy robust theory in transmission line fault locating[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(3): 44-47(in Chinese).

- [7] 郭壮志, 陈波, 刘灿萍, 等. 基于遗传算法的配电网故障定位[J]. 电网技术, 2007, 31(11): 88-92.  
Guo Zhuangzhi, Chen Bo, Liu Canping, et al. Fault location of distribution network based on genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2007, 31(11): 88-92(in Chinese).
- [8] 卫志农, 何桦, 郑玉平. 配电网故障区间定位的高级遗传算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 127-130.  
Wei Zhinong, He Hua, Zheng Yuping. A refined genetic algorithm for the fault sections location[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 127-130(in Chinese).
- [9] 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 Dongqing, Miao Shihong, Lin Xiangning, et al. Development of a novel backup protection system based on optic-fiber network [J]. Power System Technology, 2006, 30(7): 77-81(in Chinese).
- [10] 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): 47-52.  
Chang Naichao, Lan Zhou, Gan Deqiang, 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): 47-52(in Chinese).
- [11] 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: 50-61.
- [12] 张尧庭, 方开泰. 多元统计分析引论[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 290-316.
- [13] 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, 23(8): 5-7.  
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, 23(8): 5-7(in Chinese).
- [14] 陈凯, 朱杰, 王豪行. 复杂系统故障诊断中的模糊聚类方法[J]. 上海交通大学学报, 1998, 32(6): 61-64.  
Chen Kai, Zhu Jie, Wang Haoxing. Fuzzy clustering for complicated system diagnosis[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1998, 32(6): 61-64(in Chinese).
- [15] 钱政, 黄兰, 严璋, 等. 集成模糊数学与范例推理的变压器故障诊断方法[J]. 电网技术, 2001, 25(9): 24-27.  
Qian Zheng, Huang Lan, Yan Zhang, et al. A fault diagnosis method for power transformer integrating fuzzy theory with case-based reasoning[J]. Power System Technology, 2001, 25(9): 24-27(in Chinese).



徐岩

收稿日期: 2009-12-18。

作者简介:

徐岩(1976—), 男, 副教授, 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工作;

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工作, 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;

王增平(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事微机保护、变电站综合自动化等方面的研究。

(责任编辑 李兰欣)