

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181221

# 基于粗糙集理论的 t 检验广域保护区域划分方法

李卫国, 运泽健, 张师, 边娣, 张东

(东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

**摘要:** 电力系统广域继电保护中, 合理、正确地实现保护区域划分是提高继电保护选择性和灵敏性的关键。在现代电网基于纵联比较原理来进行广域保护区域的划分方法中, 每个 IED 的保护区域是根据 IED 与线路或母线的关系确定的, 划分原则比较简单。随着互联大电网的逐渐形成, 网架结构复杂化, 拓扑结构多样化, 仅仅根据保护区域划分原则进行简单的保护区域划分已经不适应电力系统广域继电保护区域划分的要求。因此, 提出了一种基于粗糙集理论的 t 检验广域保护区域划分新方法。在系统结构发生变化时, 该方法可以利用粗糙集理论约简冗余信息的功能, 动态地寻找保护范围; 利用 t 检验法最终确定每个 IED 广域保护范围; 通过 CEPRI-36 节点的仿真系统模型进行验证。该方法对保护区域的划分不完全依赖系统结构关系, 对结构多变的网络具有更好的适用性。

**关键词:** 广域继电保护; 保护区域划分; 粗糙集理论; 约简冗余信息; t 检验法

## Partition method of t-test wide-area protection area based on rough set theory

LI Weiguo, YUN Zejian, ZHANG Shi, BIAN Di, ZHANG Dong

(School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

**Abstract:** In the wide area relay protection of power system, reasonable and correct protection area division is the key to improve the selectivity and sensitivity of relay protection. In modern power grid, based on the principle of longitudinal comparison, the partition method of wide-area protection area is carried out, the protection area of each IED is determined according to the relationship between IED and line or bus, and the division principle is relatively simple. With the gradual formation of interconnected large-scale power grid, the network structure is complicated and the topology structure is changeable, simple protection area division based on the principle of protection area division can no longer meet the requirements of wide-area relay protection area division of power system. Therefore, this paper proposes a new method of t-test area partition based on rough set theory. When the system structure changes, this method can use the function of reducing redundant information by rough set theory to find the protection range dynamically; use t-test method to determine the wide-area protection range of each IED; verify it by CEPRI-36 node simulation system model. This method does not depend entirely on the structural relationship of the system to divide the protected area, and has better applicability to the network with changeable structure.

This work is supported by Science and Technology Development Program of Jilin Province — Research on On-line Monitoring and Analytical Technology of Transmission and Transformer Equipment Operation Status (No. 20160307014GX).

**Key words:** wide-area relay protection; protection area division; rough set theory; reduction of redundant information; t-test

## 0 引言

随着电网规模的扩大和拓扑结构的复杂化, 传

统的基于本地电气信息量进行决策和判断的后备保护已不能完全保障互联电网运行的安全性要求, 当严重的停电事故发生时, 无法保证故障的及时切除<sup>[1-5]</sup>。广域保护系统可综合分析多点信息, 对区内或区外发生故障的位置进行准确定位, 较传统保护选择性功能更强, 所以广域保护广泛地应用于大规

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20160307014GX)“输变电设备运行状态在线监测与分析技术研究”

模复杂电网的保护中<sup>[6-7]</sup>。

结合现有广域继电保护的研究, 广域保护的结构大体可分为集中式、分布式和混合式(区域集中式)三类<sup>[8]</sup>。集中式结构由决策主机和分散安装的智能电子装置(Intelligent Electronic Device, IED)组成, 主机汇集经过 IED 处理运算的各安装点电气信息, 经过判别, 确定故障区段, 向相关的 IED 发出动作信息, 跳开断路器。该结构下 IED 之间信息交换量微小。分布式结构与之相反, 没有决策主机, 每个断路器处都装设一个 IED, IED 负责采集安装点信息、运算、传输和故障的定位及判断多重任务, 每个 IED 都与特定区域内的其他 IED 交换信息, 根据预定的算法确定故障位置, 并进行相应的跳闸操作<sup>[9]</sup>。混合式结构中各变电站采用分布式模式, 广域继电保护决策中心采用集中式模式, 这种基于区域集中的分布式终端结构既体现了分布式和集中式相结合的优点, 又能符合大电网通过分区域划分之后的格局<sup>[10-11]</sup>。鉴于集中决策结构对决策主机和通信系统的依赖程度较高, 系统结构纷杂, 工程实施难度较大, 所以在区域电网的广域继电保护系统中分布式和混合式更加适用。本文所提出的算法仅考虑分布式结构, 此方法也同样适用于混合式结构中分布式模式的保护区划分。

广域继电保护算法研究主要集中在三个方面: 基于广域电流差动的广域保护算法、基于距离元件的广域保护算法和基于纵联比较原理的广域保护算法。其中, 文献[12]提出了广域电流差动保护区划分专家系统, 该系统可以根据系统元件的状态信息及拓扑连接关系, 在线确定各元件的电流差动主、后备保护区, 为基于图论方法的保护区划分在实际系统中的应用奠定了基础; 文献[13]介绍了基于电流差动原理的保护区划分原则和 IED 关联域划分的方法, 并以双母线结构的电网为例详细说明了 IED 关联域的搜索过程, 通过对搜索到的关联 IED 按照保护区划分原则进行分区, 实现了相关 IED 保护区的划分; 文献[14]提出了基于综合阻抗比较原理的广域保护算法, 该算法根据差流启动的不同情况以及拓扑结构, 通过专家系统决策自动形成保护区 I、II、III, 可以采用不同保护区的测量信息进行分相保护综合阻抗计算, 实现广域多信息后备保护方案, 较好地克服了传统后备保护基于就地信息在测量信息错误和变电站直流消失等情况下保护失效的特点; 文献[15]提出了基于纵联比较原理的广域继电保护系统, 通过比较故障相邻区域多测点的故障方向信息, 能准确地判断出故障位置并采取相应的保护策略, 该算法需要的信息量少, 原

理简单可靠, 在缺少某个方向元件信息的不利情况下仍然能够正常工作, 在分布式结构中, 可极大地提高后备继电保护系统的性能。但是该算法仅依靠保护区的划分原则对简单或不经常变动的系统进行保护区的划分, 缺少可以适用于电力系统实际运行的保护区划分方法。

本文针对该问题提出了一种基于粗糙集理论的 t 检验保护区划分方法, 此方法遵循基于广域纵联比较原理的保护区划分原则, 可以不完全依赖系统的拓扑结构, 实现保护区的动态划分。

## 1 广域保护区的划分原则

结合广域继电保护的快速主保护和对相邻设备的故障提供快速后备保护的功能, 对每个 IED 进行保护区划分。

**快速主保护区:** 该保护区与传统主保护相同, 对 IED 所在线路或变压器提供主保护功能。除此之外, 母线故障时要求所有与母线相连的断路器断开, 因此, IED 的主保护区也包括与其相连的母线。

**后备保护区:** 保护区与传统后备保护相同, 要求超过相关 IED 下一级线路或元件的末端, 即 IED 的对侧母线与下一级的线路或元件。同时, IED 要为对侧 IED 提供后备保护, 所以后备保护区应为与快速主保护区相连的所有线路或母线。

IED1 的主保护和后备保护范围如图 1 所示。

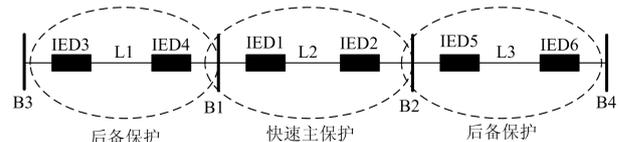


图 1 广域继电保护区域划分原则

Fig. 1 Principle of division of wide-area relay protection area

## 2 基于粗糙集理论的 t 检验区域划分方法

由于故障点附近区域内的元件受故障的影响最大, 所以, 如果在满足保护区划分原则的前提下, 对于变化的网络结构, 逐一假设各元件故障, 结合粗糙集理论冗余元件的约简过程对大量无关元件进行筛选, 确定受故障影响显著的元件, 缩小被测 IED 保护区元件的范围; 再用 t 检验法对约简集合中所包含的属性元件逐个进行检验; 最终根据线路与母线的连接关系, 确定被测 IED 的最终保护区, 实现不完全依赖系统结构关系, 对网架结构频繁发生变化的系统合理地进行保护区的动态划分。具体流程如图 2 所示。

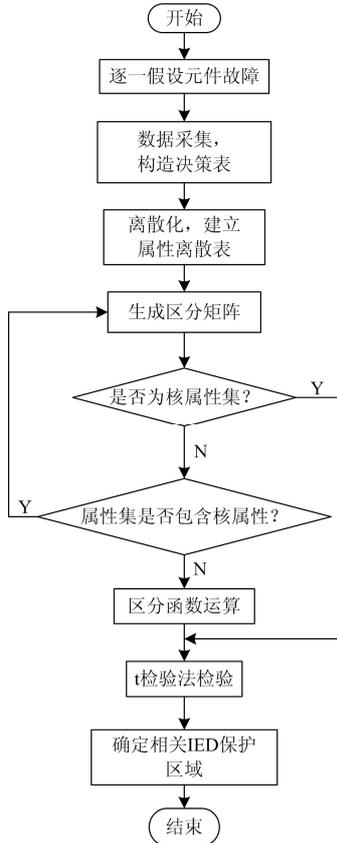


图 2 被测 IED 保护区域界定方法流程图

Fig. 2 Flow chart of under-test IED protection area definition

### 3 冗余元件的约简

粗糙集理论是一种处理模糊和不确定性知识的数学工具，主要思想是在保持分类能力不变的前提下，通过知识约简导出问题的决策或分类规则，主要内容包括构造决策表、属性离散化、区分矩阵约简运算三部分<sup>[16-17]</sup>。目前，粗糙集理论已在风速预测、负荷预测、故障诊断等方面得到应用<sup>[18-22]</sup>。

本文中利用粗糙集理论根据非故障元件电气量受故障元件电气量影响的大小，去除冗余信息，明确故障范围。

#### 3.1 构造决策表

信息系统(知识表达系统)  $S = (U, A, V, f)$ ，其中： $U$  为对象的非空有限集合，称为论域； $A$  为属性的非空有限集合； $V = \bigcup_{a \in A} V_a$ ， $V_a$  是属性  $a$  的值域； $f: U \times A \rightarrow V$  是一个信息函数，为每个对象的每个属性赋予一个信息值，即  $\forall a \in A, x \in U, f(x, a) \in V_a$ ，若  $A = C \cup D$ ， $C \cap D = \emptyset$ ，则这样的信息系统称为决策表，决策表是一类特殊而重要的信息系统，其中  $C$  为条件属性集， $D$  为决策属性集。本文以被测 IED 所在线路的负序电流增量  $\Delta I_i$  为决策属性集

$D = \{d\}$ ，其余元件负序电流增量  $\Delta I_1, \dots, \Delta I_{i-1}, \Delta I_{i+1}, \dots, \Delta I_n$  构成条件属性集  $\{c_1, c_2, \dots, c_{n-1}\}$ ，属性集  $A = C \cup D$ 。设线路被测 IED 在线路  $h_i$  上， $\Delta I_i$  为线路  $h_i$  上负序电流增量，则所构成的决策表如表 1 所示。表 1 中的行代表发生故障的线路或变压器(不包括被测 IED 所在线路)；列代表发生故障的各条线路或变压器负序电流的增量。因为当故障发生时，故障点附近元件的电气量(电流)会发生显著变化，因此，该表可以表征线路或变压器与故障点的关联程度。

表 1 决策表

Table 1 Decision table

|           | $\Delta I_1$ | ... | $\Delta I_{i-1}$ | $\Delta I_{i+1}$ | ... | $\Delta I_n$ | $\Delta I_i$ |
|-----------|--------------|-----|------------------|------------------|-----|--------------|--------------|
| $h_1$     |              |     | $x_1$            |                  |     |              |              |
| $\vdots$  |              |     | $\vdots$         |                  |     |              |              |
| $h_{i-1}$ |              |     | $x_{i-1}$        |                  |     |              |              |
| $h_{i+1}$ |              |     | $x_{i+1}$        |                  |     |              |              |
| $\vdots$  |              |     | $\vdots$         |                  |     |              |              |
| $h_n$     |              |     | $x_n$            |                  |     |              |              |

#### 3.2 连续属性离散化

粗糙集理论只适用于离散属性的约简<sup>[23]</sup>，但是统计表中的负序电流增量  $\Delta I$  为连续属性，因此需要进行连续属性的离散化。以表 1 中  $\Delta I_{i-1}$  列为例，确定每列属性值 ( $x_1 \sim x_n$ ) 中的最大值  $x_{\max}$  和最小值  $x_{\min}$ 。具体步骤如下：设定划分数目  $k$  (通常在取最大值和最小值的简单平均值时取  $k = 2$ )，计算区间增量  $l$ ，如式(1)；计算等分点的值，如式(2)；判断各组属性的每个属性值  $x_k$  位于的等分点区间，确定离散化后的决策表属性值  $p$ ，如式(3)；用离散化后的属性值构成离散属性表，如表 2。

$$l = (x_{\max} - x_{\min}) / k \quad (1)$$

$$\begin{cases} c_0 = x_{\min} \\ c_k = c_{k-1} + l \\ c_k = x_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} c_{k-1} < x < c_k \text{ 时, } p = k - 1 \\ x = c_n \text{ 时, } p = n - 1 \end{cases} \quad (3)$$

表 2 属性离散表

Table 2 Attribute discrete table

| 对象(x)    | $c_1$    | $c_2$    | ... | $c_n$    | $d$      |
|----------|----------|----------|-----|----------|----------|
| 1        | $p_{11}$ | $p_{12}$ | ... | $p_{1x}$ | $D_1$    |
| 2        | $p_{21}$ | $p_{22}$ | ... | $p_{2x}$ | $D_2$    |
| $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$ |     | $\vdots$ | $\vdots$ |
| $n$      | $p_{n1}$ | $p_{n2}$ | ... | $p_{nx}$ | $D_n$    |

### 3.3 区分矩阵属性约简

用区分矩阵<sup>[24]</sup>对离散属性值进行化简, 得到由被测 IED 所在线路附近元件组成的约简属性集合。设  $c_{(x)}$  为对象  $x$  在条件属性  $c$  上的值;  $D_x$  为对象  $x$  在决策属性  $d$  上的值, 表示区分矩阵中第  $i$  行、第  $j$  列的元素; 用式(4)生成区分矩阵  $\Delta$ ,  $\Delta$  为对称阵。

$$(m_{ij}) = \begin{cases} \{c \in C : c_{(x_i)} \neq c_{(x_j)}\}, D_{(x_i)} \neq D_{(x_j)} \\ 0, D_{(x_i)} = D_{(x_j)} \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $i, j = 1, 2, 3, \dots, n$ 。

$$\Delta = \begin{bmatrix} 0 & m_{12} & \cdots & \cdots & \cdots & m_{1n} \\ m_{21} & 0 & \cdots & m_{ij} & \cdots & m_{2n} \\ \cdots & \cdots & 0 & \cdots & c_k & \cdots \\ \cdots & m_{ji} & \cdots & 0 & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & c_k & \cdots & 0 & \cdots \\ m_{n1} & m_{n2} & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

单个属性集  $\{c_k\}$  为核属性, 必须保留, 同时采用式(6)对不包含核属性且  $m_{ij} \neq 0$  的属性组合  $M^*$  表示为合取范式  $P$  的形式, 再将  $P$  转化为析取范式的形式, 并进行化简。

$$P = \prod_{i,j=1,2,\dots,n} \sum m_{ij}, m_{ij} \in M^* \quad (6)$$

通过区分矩阵的约简, 可以确定核属性的值, 对属性组合  $M^*$  化简可获得约简属性表。约简属性表中包含的属性与核属性组成了约简属性集合, 简化了寻找保护区域元件的复杂性。

## 4 广域保护区域的确定

t 检验法可以检验具有相同方差的两正态均值差的假设<sup>[25]</sup>。结合上述思路, 可以通过 t 检验法在某元件故障时, 挑选出附近区域内电气量变化水平显著的元件, 组成与该元件相关 IED 的保护区域。

本文用 t 检验法对上一步产生的约简集中的元件做进一步的筛选, 同样以故障后电流量变化的显著水平作为研究对象。假设元件  $i$  发生故障, 故障发生后, 将收集到的约简集合元件的电流变化量组成事故样本, 记为

$$E = \{\Delta I_1, \Delta I_2, \dots, \Delta I_{i-1}, \Delta I_{i+1}, \dots, \Delta I_n\} \quad (7)$$

式中,  $n$  为事故样本点个数。

假设样本  $E$  中的元件 1 为故障元件, 利用 t 检验法对假设是否成立进行判断, 具体描述如下。

$$G_1 : \{\Delta I_1\} \sim N(\mu_1, \sigma^2)$$

$$G_2 : \{\Delta I_2, \dots, \Delta I_{i-1}, \Delta I_{i+1}, \dots, \Delta I_{n-1}\} \sim N(\mu_2, \sigma^2) \quad (8)$$

式中:  $\mu_1$ 、 $\mu_2$  分别为两总体的均值;  $\sigma^2$  为两总体方差; 总体  $G_1$  样本容量为 1, 总体  $G_2$  样本容量为  $n-2$ 。

设置检验问题如下。

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 \text{ (电流量没有显著增加);}$$

$$H_1 : \mu_1 > \mu_2 \text{ (电流量显著增加).}$$

检验统计量  $t$  的求取如式(9)。

$$t = \frac{(\bar{x} - \bar{y})}{s_w \sqrt{1 + \frac{1}{n-2}}} \sim t_\alpha(n_1 + n_2 - 1) \quad (9)$$

式中:

$$\begin{cases} \bar{x} = \Delta I_1 \\ \bar{y} = \frac{\Delta I_2 + \Delta I_3 + \dots + \Delta I_{i-1} + \Delta I_{i+1} + \dots + \Delta I_n}{n-2} \end{cases} \quad (10)$$

$$s_w = \frac{(n-3) \sum_{k=1}^{n-2} (\Delta I_k - \bar{y})^2}{n-2} \quad (11)$$

取显著性水平  $\alpha = 0.1$ , 当  $t \geq t_\alpha(n-2)$  时, 说明总体  $G_1$ 、 $G_2$  均值差异较大, 元件 1 受元件  $i$  故障影响明显, 即元件 1 为故障元件; 如果  $t < t_\alpha(n-2)$ , 则总体  $G_1$ 、 $G_2$  均值差异较小, 元件 1 受元件  $i$  故障影响不明显, 即元件 1 不是故障元件。

将筛选出的元件与相关的母线根据保护区域划分的基本原则, 完成相关 IED 保护区域的划分, 从而当假设故障点真正发生故障时, 相应的 IED 动作, 切除故障元件, 实现保护功能。

## 5 算例分析

本文基于 CEPRI-36 节点系统变化前后结构的不同, 分别对全网络元件逐一进行故障设置(本文未考虑充分, 采用手动设置故障), 通过 PSASP 仿真, 收集全网络的负序电流数据, 采用基于粗糙集理论的 t 检验区域界定方法实现了广域保护区域的动态划分, 验证此方法的正确性和适用性。结构未改变的 CEPRI-36 节点系统如图 3 所示。

AC 表示交流线路, BUS 表示母线, T2W 表示变压器, 断路器位于被测线路相关的 IED 安装位置(本文只标识了被测线路的 IED, 其他线路与此类似, 未标出)。本文以 IED27 的广域保护区域划分为例, 进行仿真验证。

由于 IED27 位于线路 AC28 上, 因此, 将  $\Delta I_{28}$  作为决策属性  $\{D\}$ , 其余元件负序电流增量作为条



区分矩阵  $A$  中的核属性为  $c_{29}$ , 采用式(6)对不包含核属性且  $m_{ij} \neq 0$  的属性组合  $M_1^*$  进行化简, 得到的约简结果如表 4。

表 4 约简结果表

Table 4 Reduction results table

| 区间编号 | 1           | 2           | 3              | 4              |
|------|-------------|-------------|----------------|----------------|
| 约简集合 | $c_1c_{10}$ | $c_8c_{13}$ | $c_{12}c_{14}$ | $c_{16}c_{29}$ |

表 4 中的约简结果与核属性共同组成约简集合  $\{c_1, c_8, c_{10}, c_{12}, c_{13}, c_{14}, c_{16}, c_{29}\}$ 。根据上述 t 检验方法, 假设线路 AC28 发生故障, 对约简集合包含的元素逐一检验, 得到判别结果, 如表 5 所示。

表 5 t 检验表

Table 5 Table of t-test

| 假设故障元件编号 | t 统计量计算值 | 假设检验结果 |
|----------|----------|--------|
| AC10     | -0.52    | 接受     |
| AC21     | 0.78     | 拒绝     |
| AC24     | 0.43     | 拒绝     |
| AC26     | 0.56     | 拒绝     |
| AC27     | -0.57    | 接受     |
| AC29     | 0.39     | 拒绝     |
| AC31     | 0.69     | 拒绝     |
| T2W4     | 0.94     | 拒绝     |

表 5 中“接受”表示接受假设  $H_0$ , 电流量未发生显著变化; “拒绝”表示拒绝假设  $H_0$ , 接受假设  $H_1$ , 电流量发生显著变化。

由表 5 确定了电流显著变化元件为 AC21、AC24、AC26、AC29、AC31、T2W4。根据上述电流显著变化元件的线路与母线关系, 确定 IED27 广域保护区划分如表 6 所示。

表 6 系统结构改变前 IED27 保护区划分结果

Table 6 IED27 protection area division results before system structure change

| 保护区类型  | 被保护元件 |       |
|--------|-------|-------|
| 快速主保护区 | AC28  | BUS21 |
| 后备保护区  | AC21  | AC31  |
|        | AC24  | T2W4  |
|        | AC26  | BUS19 |
|        | AC29  | —     |

当系统结构发生改变后, 如图 4 所示(去除母线 BUS21, 将线路 AC26、AC28、AC31 由星形结构改为角形连接, 线路 AC21 由 BUS19 转接到 BUS16, 形成新的子环网络)。位于结构变动区域的部分元件负序电流量较之前变化比较明显, 其余元件的负序电流量变化不是很显著, 决策表变化不是很大。(本文未列出对系统改变后的决策表)。

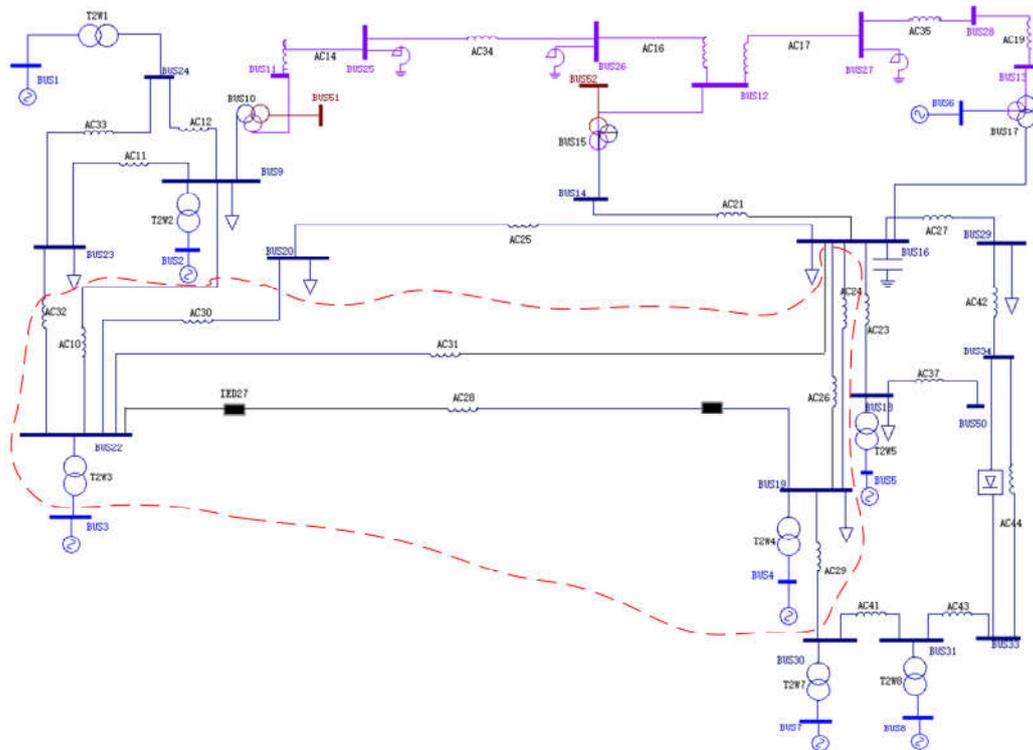


图 4 系统结构改变后的 CEPRI-36 节点系统

Fig. 4 CEPRI-36 node system after system structure change

采用上述步骤得到系统改变后的区分矩阵为  $\Delta_2$  (本文  $\Delta_2$  只显示包含核属性的部分矩阵)。

$$\Delta_2 = \begin{bmatrix} \{c_4c_{27}c_{28}\} & \{c_4c_5c_{27}c_{29}\} \\ \{c_5c_{28}\} & \{c_{29}\} \\ \{c_6c_{28}c_{29}\} & \{c_5c_6\} \end{bmatrix} \quad (13)$$

区分矩阵中的核属性集仍为  $\{c_{29}\}$ ，采取上述步骤对属性组合  $M_2^*$  进行化简，得到化简结果与核属性组成的约简集合  $\{c_1c_9c_{10}c_{12}c_{14}c_{15}c_{16}c_{17}c_{28}c_{29}\}$ ，用 t 检验法对约简集合包含的元件进行检验，得到的判别结果如表 7 所示。

表 7 系统改变后的 t 检验结果

Table 7 Results of t-test after system change

| 假设故障<br>元件编号 | t 统计量<br>计算值 | 假设检<br>验结果 |
|--------------|--------------|------------|
| AC10         | 0.83         | 拒绝         |
| AC24         | 1.74         | 接受         |
| AC26         | 0.92         | 拒绝         |
| AC29         | 1.19         | 拒绝         |
| AC30         | 0.52         | 拒绝         |
| AC31         | 1.04         | 拒绝         |
| AC32         | 0.81         | 拒绝         |
| T2W3         | 0.68         | 拒绝         |
| T3W4         | 1.26         | 拒绝         |

根据线路与母线的关系，确定当系统结构发生改变后，IED27 的保护区域如表 8 所示。

表 8 系统结构改变后的 IED27 区域划分结果

Table 8 Results of IED27 wide-area protection area division after system change

| 保护区域类型  | 被保护元件 |       |
|---------|-------|-------|
| 快速主保护区域 | AC28  | BUS22 |
|         | AC10  | AC31  |
|         | AC24  | AC32  |
| 后备保护区域  | AC26  | T2W3  |
|         | AC29  | T2W4  |
|         | AC30  | BUS19 |

表 6 和表 8 的保护区域划分结果说明：当系统结构发生改变时，该方法依然可以正确判断各条线路 IED 的广域保护区域，符合保护区域划分的基本原则。

基于粗糙集理论的 t 检验保护区域划分方法的优势是不完全依赖于系统拓扑结构进行保护区域的划分，利用粗糙集理论与 t 检验法的相关公式通过层层分析计算得到的准确结果来确定相关 IED 的保护元件，条理清晰，在规模较大的实际电力系统中，

当系统改变需要重新分区时，不会发生分区错误的情况。并且该方法直接采用各个元件的电气量进行具体分析计算，不需要通信通道大量地搜索信息，减少了复杂系统中信息传输的时间，因此该保护区域划分方法快速，可以在电力系统进入下一个状态前实现相关 IED 的保护区域划分。

## 6 结论

1) 本文提出的基于粗糙集理论的 t 检验广域保护区域划分方法对拓扑结构实时变化的系统进行动态划分，为基于纵联比较原理的广域保护系统在拓扑结构复杂多变的实际电力系统中的应用奠定了基础。

2) 该方法利用粗糙集理论和 t 检验原理的具体公式通过约简计算和逐一检验得到相关 IED 的具体保护元件，确定相关 IED 的具体保护范围。当系统拓扑结构发生改变，需要重新分区时，避免了例如专家系统依赖传输通道搜索、比较信息出现分区错误和分区缓慢的不足。

3) 在今后的研究中，有望将该保护区域划分方法作为计算模块应用于 Agent 等智能计算机系统中，通过计算机进行故障设置和分析计算，实现该保护区域划分方法的全自动化。

## 参考文献

- [1] 罗剑波, 郁琛, 谢云云, 等. 关于自然灾害下电力系统安全稳定防御方法的评述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 158-170.  
LUO Jianbo, YU Chen, XIE Yunyun, et al. A review on risk assessment of power grid security and stability under natural disasters[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 158-170.
- [2] 严佳梅, 许剑冰, 倪明, 等. 通信系统中断对电网广域保护控制系统的影响[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 17-24.  
YAN Jiamei, XU Jianbing, NI Ming, et al. Influence of communication system interruption on wide area protection and control system of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 17-24.
- [3] 王婷, 张侃君, 文博, 等. 大型变压器中性点串接抑制直流电流电容后对继电保护影响分析[J]. 中国电力, 2017, 50(7): 164-168, 174.  
WANG Ting, ZHANG Kanjun, WEN Bo, et al. Analysis of the influence of large transformer neutral point series

- suppressing DC current capacitance on relay protection[J]. *Electric Power*, 2017, 50(7): 164-174.
- [4] 李保杰, 刘岩, 李洪杰, 等. 从乌克兰停电事故看电力信息系统安全问题[J]. *中国电力*, 2017, 50(5): 71-77.  
LI Baojie, LIU Yan, LI Hongjie, et al. Security issues of power information system from Ukrainian blackout accidents[J]. *Electric Power*, 2017, 50(5): 71-77.
- [5] MALLIKARJUNA B, VARMA P V V, SAMIR S D, et al. An adaptive supervised wide-area backup protection scheme for transmission lines protection[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 2(2): 229-244. DOI: 10.1186/s41601-017-0053-1.
- [6] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 广域继电保护故障区域的自适应识别方法[J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(16): 15-20.  
LI Zhenxing, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Adaptive identification method for wide area relay protection fault area[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(16): 15-20.
- [7] WU S. An adaptive limited wide area differential protection for power grid with micro-sources[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 2(2): 220-228. DOI: 10.1186/s41601-017-0052-2.
- [8] 孔德洪, 吕飞鹏. 基于区域多信息融合的广域后备保护算法[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(4): 26-32.  
KONG Dehong, LÜ Feipeng. An algorithm of wide area protection based on regional multi information fusion[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(4): 26-32.
- [9] 刘育权, 华煌圣, 李力, 等. 多层次的广域保护控制体系架构研究与实践[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(5): 112-122.  
LIU Yuquan, HUA Huangsheng, LI Li, et al. Research and application of multi-level wide-area protection system[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(5): 112-122.
- [10] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 分区域广域继电保护的系统结构与故障识别[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(28): 95-103.  
LI Zhenxing, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. System structure and fault identification of wide area relay protection in sub-regions[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(28): 95-103.
- [11] LIN Xiangning, LI Zhengtian, WU Kecheng, et al. Principles and implementations of hierarchical region defensive systems of power grid[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2009, 24(1): 30-37.
- [12] 苏盛, LI K K, CHAN W L, 等. 广域电流差动保护区划分专家系统[J]. *电网技术*, 2005, 29(3): 58-61, 66.  
SU Sheng, LI K K, CHAN W L, et al. An expert system for wide area current differential protection area[J]. *Power System Technology*, 2005, 29(3): 58-61, 66.
- [13] 丛伟, 潘贞存, 赵建国, 等. 基于电流差动原理的广域继电保护系统[J]. *电网技术*, 2006, 30(5): 91-95, 110.  
CONG Wei, PAN Zhencun, ZHAO Jianguo, et al. Wide-area relay protection system based on current differential principle[J]. *Power System Technology*, 2006, 30(5): 91-95, 110.
- [14] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 基于综合阻抗比较原理的广域继电保护算法[J]. *电工技术学报*, 2012, 27(8): 179-186.  
LI Zhenxing, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Wide-area relay protection algorithm based on integrated impedance comparison principle[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2012, 27(8): 179-186.
- [15] 丛伟, 潘贞存, 赵建国. 基于纵联比较原理的广域继电保护算法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(21): 8-14.  
CONG Wei, PAN Zhencun, ZHAO Jianguo. Research on wide area relay protection algorithm based on longitudinal comparison principle[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(21): 8-14.
- [16] 苗夺谦, 李道国. 粗糙集理论、算法与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 150-170.
- [17] 张文修, 吴志伟, 梁吉业, 等. 粗糙集理论与算法[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 1-115.
- [18] 陈毅波, 郑玲, 姚建刚. 基于粗糙集理论与 D-S 证据理论改进的多元回归负荷预测方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(6): 62-67.  
CHEN Yibo, ZHENG Ling, YAO Jianguo. Improved multiple regression load forecasting method based on rough set theory and D-S evidence theory[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(6): 62-67.
- [19] 尹东阳, 盛义发, 蒋明洁, 等. 基于粗糙集理论-主成分分析的 Elman 神经网络短期风速预测[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(11): 46-51.  
YIN Dongyang, SHENG Yifa, JIANG Mingjie, et al. Short-term wind speed forecasting using Elman neural

- network based on rough set theory and principal components analysis[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 46-51.
- [20] 刘兴杰, 岑添云, 郑文书, 等. 基于模糊粗糙集与改进聚类的神经网络风速预测[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3162-3169.
- LIU Xingjie, CEN Tianyun, ZHENG Wenshu, et al. Neural network wind speed prediction based on fuzzy rough set and improved clustering[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3162-3169.
- [21] 熊浩, 李卫国, 畅广辉, 等. 模糊粗糙集理论在变压器故障诊断中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 141-147.
- XIONG Hao, LI Weiguang, CHANG Guanghui, et al. Application of fuzzy rough set theory in transformer fault diagnosis[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7): 141-147.
- [22] 孙秋野, 张化光, 戴璟. 基于改进粗糙集约简算法的配电系统在线故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(7): 58-64.
- SUN Qiuye, ZHANG Huaguang, DAI Jing. On-line fault diagnosis of distribution system based on improved rough set reduction algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(7): 58-64.
- [23] 高贇, 侯媛彬. 连续量信息表决策值的离散化方法[J]. 西安科技大学学报, 2004, 24(4): 486-491.
- GAO Yun, HOU Yuanbin. Discretization method for decision value of continuous quantity information table[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2004, 24(4): 486-491.
- [24] 黎平, 宋坤, 肖白, 等. 基于粗糙集理论的关联聚类中长期负荷预测法[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(1): 43-47, 66.
- LI Ping, SONG Kun, XIAO Bai, et al. Medium and long-term load forecasting using associated clustering based on rough sets[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(1): 43-47, 66.
- [25] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 1989.
- 
- 收稿日期: 2018-09-27; 修回日期: 2018-11-19
- 作者简介:
- 李卫国(1970—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 副教授, 研究方向电力系统广域继电保护; E-mail: 1677493048@qq.com
- 运泽健(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向电力系统广域继电保护. E-mail: 1141442531@qq.com
- (编辑 魏小丽)