

基于粗糙集理论和故障信息网的电网故障诊断方法

王林先¹, 李乃永²

(1. 积成电子股份有限公司, 山东 济南 250100; 2. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 在系统发生复杂故障或开关、保护存在较多误动、拒动以及因信道干扰而发生信息丢失等诸多不确定因素的影响下, 仅仅利用开关和保护信息的诊断方法难以得出正确的结论。针对此问题, 文章提出了一种综合利用电网故障信息的诊断方法。首先以保护、断路器作为条件属性, 故障区域作为决策属性, 考查各种故障情况并建立决策表。然后利用基于可辨识矩阵和信息熵的属性约简方法提取最佳属性的约简组合, 根据故障信息分析处理的结果修正约简组合中相应的属性值, 最后按决策规则表进行故障诊断。运用 VC++ 编写了基于该方法的故障诊断软件, 算例结果表明, 该方法正确、有效, 能提高系统的容错性, 有效地弥补了利用开关、保护信息诊断的局限性, 具有较好的实用价值。

关键词: 故障诊断; 故障信息分析; 粗糙集; 容错性

A power network fault diagnosis method based on rough set theory and fault information networks

WANG Lin-xian¹, LI Nai-yong²

(1. Integrated Electronic Systems Lab Co., Ltd, Jinan 250100, China;

2. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: When complex fault occurs or uncertain factors appear, such as mal-operation, miss operation and missing messages because of channel disturbance, the existing power system diagnosis methods based on switch and protection messages do not reach correct conclusions. To settle this problem, this paper proposes a new method to diagnose faults in power network in which the fault information can be made good use of. At first, the protections and circuit breakers are taken as conditional attributes and faulty region as decision-making attribute to investigate various faults and establish decision table. By use of attribute reducing method based on cognizable matrix and information entropy, the optimal attribute reduction combination is extracted. Then using the result of the fault information analysis, the values in the optimal attribute reduction combination are amended. Finally, the diagnosis result could be given by the decision table. The practical fault diagnosis software is programmed based on VC++ 6.0. Results of calculation examples show that the method is correct and effective, can improve the fault tolerance capability, and can remedy limitations of using the protection and switch messages for fault diagnosis effectively, so the method is available.

Key words: fault diagnosis; fault information analysis; rough set; fault-tolerance capability

中图分类号: TM71; TM76 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)08-0059-05

0 引言

随着电力系统自动化水平的提高, 投入电网的各种保护、自动装置、故障录波器等设备越来越多, 当电网发生故障时, 会有大量丰富的故障信息送入调度中心, 这为以快速定位故障区域、识别故障元件为目的的故障诊断提供了前提条件。为了提高故障诊断的准确性和快速性, 国内外学者已先后提出了多种电网故障诊断方法, 如专家系统^[1]、模糊理论、人工神经网络、Petri网、优化理论、信息理论

等。这些方法各有特点, 也得到了一定的应用, 但在故障信息具有保护、断路器拒动、误动或通信线路传输错误等不确定因素时难以保证容错性。

文献[2]采用粗糙集理论进行电网故障诊断, 大大提高了诊断的容错性。但当丢失或出错的故障信息是关键信息时诊断结果会受到影响。随着继电保护及故障录波信息网的建立, 采用嵌入式以太网通信技术和数据压缩解压技术, 丰富的录波信息为进一步诊断提供了基础。

本文尝试综合分析处理故障信息, 运用粗糙集

理论的方法解决电网故障诊断的上述问题,首先保护动作分析模块根据故障录波数据判断保护是否正确动作,将修正后的故障信息存入相应的模块,然后用历史故障样本建立决策表,采用基于可辨识矩阵和信息熵的属性约简算法提取最佳属性约简组合,最后利用最佳属性约简组合形成的约简决策表进行电网的故障诊断。

1 粗糙集及基于可辨识矩阵和信息熵的最佳属性约简方法

粗糙集理论是研究不完整数据及不精确知识的表达、学习、归纳的一套方法,能在保留关键信息的前提下对知识进行处理,并求得知识的最小表达^[3]。

4元组 $S=(U, A, V, f)$ 为一个知识表达系统,其中:
 $U = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ 为对象的有限集合,称为论域;
 A 为非空有限集合,称为属性集合, $A = B \cup C$ 且 $B \cap C = \emptyset$, $B = (a_1, a_2, \dots, a_m)$ 和 $C = \{d\}$ 分别称为条件属性集和决策属性集,本文中保护、断路器作为条件属性,故障区域作为决策属性;
 V 为属性 A 的值域:
 $f: U \times A \rightarrow V$ 是一个信息函数, U 中任一元素 u_j 取属性 a_j , 在 V 中有唯一确定值 $f(u_j, a_j)$ 。令 G 为一族等价关系, G 中所有等价关系的交集称为 G 上的不可分辨关系,用 $I(G)$ 表示,若存在 $r \in G, Q = G - r, Q \subseteq G, Q$ 是独立的,满足 $I(Q) = I(G)$, 则称 Q 为 G 的一个约简,用 $R(G)$ 表示,全部约简的交集定义为 G 的核,记为 $O(G), O(G) = \bigcap R(G)$ 。

国内外学者提出了一系列属性约简算法,本文采用最常用的基于可辨识矩阵的属性约简方法^[4]。可辨识矩阵定义如下:决策表 S 的可辨识矩阵 $M_D = (m_{ij})_{n \times n}$ 是一个 $n \times n$ 阶矩阵,其第 i 行第 j 列元素由决策表的第 i 行和第 j 行通过比较得到:

$$m_{ij} = \begin{cases} \{a \in A: f(u_i, a_k) \neq f(u_j, a_k)\}, f(u_i, d) \neq f(u_j, d) \\ 0 & f(u_i, d) = f(u_j, d) \\ -1 & f(u_i, a_k) = f(u_j, a_k) \text{ 且 } f(u_i, d) \neq f(u_j, d) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)表明,可辨识矩阵的元素由3种值组成:当决策表的2条记录之间条件属性值不完全相同且决策属性值也不同时,该元素值为属性值不同的条件属性组合;当2条记录之间决策属性值相同时,该元素值为0;当2条记录之间条件属性值完全相同但决策属性值不同时,说明这2条记录属于冲突记录,可将这种情况标记为-1。

经过约简可得到多个属性约简组合,本文选取

平均互信息最小的组合作为最佳属性约简组合。其基本步骤为:首先计算每组属性约简组合中两两属性之间的互信息,然后将其相加取平均值,得到每组的平均互信息,最后将每组的平均互信息进行比较,最小者即为近似相互独立的属性组合,以此作为最佳属性约简组合,再将该约简组合进行值约简,得到最终的约简结果。

基于信息熵的互信息定义如下^[5]:等价关系 $G(U|I(G)) = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 的信息熵用 $H(G)$ 表示,等价关系 $Q(U|I(Q)) = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$, 相对于等价关系 G 的条件熵用 $H(Q|G)$ 表示,则等价关系 $G、Q$ 之间的互信息定义为

$$H(G) = -\sum_x P(x) \log_2 P(x) \quad (2.1)$$

$$H(Q|G) = -\sum_x P(x) \sum_y P(y|x) \log_2 P(y|x) \quad (2.2)$$

$$I(Q, G) = H(Q) - H(Q|G) = \sum_{x,y} P(x,y) \log_2 \frac{P(x,y)}{P(x)P(y)} \quad (2.3)$$

式中: P 表示求概率。

2 基于故障信息网的信息分析处理

2.1 故障信息的分类

电网故障信息根据信息记录的对象可分为开关动作、保护动作、故障录波3类信息。

开关动作信息记录断路器的动作情况和时间,断路器动作只有开、合2个状态;保护动作信息记录保护装置中各个保护模块的动作情况和时间,保护动作信息包含1个事件ID,通常要根据保护装置的型号查询保护事件对照表得到动作的含义和说明;故障录波信息记录元件故障时的相关电流和电压模拟量及数字量的实时值,通常故障录波信息是以 COMTRADE 标准格式传输和存储的。

在电网发生故障后,利用故障录波信息可以进行录波分析并对保护动作分析评判^[6]。根据保护动作分析的结果可以修正误动、拒动的保护动作信息,从而进行更加准确的故障诊断。

2.2 保护动作分析原理及方法

2.2.1 数据的标准化和预处理

保护动作分析的数据源是故障录波数据,故障录波数据由头文件、配置文件和数据文件按一定的格式组成,如果录波文件与标准格式存在差异时需进行格式转换。

选取与保护配置(如过流保护、距离保护等类型)相应的滤波算法(如全、半周傅氏算法、半周积分算法等)对录波数据进行滤波。

2.2.2 保护动作分析基本算法

录波数据经预处理后,可根据保护的构成原理

进行相关电气量参数的计算^[7]。

① 相量突变量算法

故障时刻的检测采用突变量检测算法。以电流 i 为例,当采样值连续3点满足式(3)时表示故障检出

$$\|i(k-N)-i(k-2N)\|-|i(k)-i(k-N)|\geq k_f I_{dz} \quad (3)$$

式中: N 为每工频周期的采样点数; k_f 为突变量定值调节系数; I_{dz} 为突变量启动定值。通常情况下 $k_f = 1$, 当检测到系统发生振荡后 k_f 值自动上调, 以防止振荡过程中引起突变量算法误启动。

② 基频分量算法

采用的算法是全周傅氏算法, 以正弦 - 余弦函数为样品函数, 根据正弦、余弦函数的正交特性, 经过推导可得到离散化形式的计算式, i 次电压谐波分量的实部值 U_{Ri} 、虚部值 U_{Ii} 分别为

$$U_{Ri} = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u(k\Delta t) \cos\left(\frac{2\pi ik}{N}\right) \quad (4)$$

$$U_{Ii} = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u(k\Delta t) \sin\left(\frac{2\pi ik}{N}\right) \quad (5)$$

式中: Δt 为采样时间间隔。该算法的优点是当输入信号中除基频分量外只包含恒定直流分量和整次谐波分量时计算精度很高, 并且对其它分次谐波分量也有良好的抑制效果。

③ 故障类型与相别判断

软件中采用如下算法进行故障选相:

1) 接地与否判别

通常采用稳态量与故障突变量相结合的方式判别接地故障, 即

$$(\Delta I_0 \geq \varepsilon_1) \wedge (I_0 \geq \varepsilon_2) \wedge (U_0 \geq \varepsilon_3) \quad (6)$$

式中: ε_1 、 ε_2 、 ε_3 为设置的定值; I_0 为零序电流; ΔI_0 为零序电流的突变量; U_0 为零序电压。加入零序电压作为判断条件可防止发生相间短路时由于电流互感器暂态过程的不平衡造成短时出现 I_0 而引起误判断。

2) 单相接地判别

单相故障一般采用相电流差突变量选相方法, 实用化的单相接地故障选相判据如下:

A相接地判据为

$$(m|\Delta I_b - \Delta I_c| \leq \Delta I_a - \Delta I_b) \wedge (m|\Delta I_b - \Delta I_c| \leq \Delta I_c - \Delta I_a)$$

B相接地判据为

$$(m|\Delta I_c - \Delta I_a| \leq \Delta I_b - \Delta I_c) \wedge (m|\Delta I_c - \Delta I_a| \leq \Delta I_a - \Delta I_b)$$

C相接地判据为

$$(m|\Delta I_a - \Delta I_b| \leq \Delta I_c - \Delta I_a) \wedge (m|\Delta I_a - \Delta I_b| \leq \Delta I_b - \Delta I_c)$$

式中: ΔI_a 、 ΔI_b 、 ΔI_c 为三相电流突变量; m 为调节系数, 在大多数电力系统结构下可按 $4 \leq m \leq 8$

取值。

3) 两相接地短路相别判别

当已判别为接地短路但三个单相接地判据都不满足时即可判别为两相接地短路。软件中通过对零序电压和相电压进行相位比较来实现故障选相。

4) 三相短路判别

当不是接地短路时可先判断是否为三相短路, 采用短数据窗计算 $|\Delta I_a|$ 、 $|\Delta I_b|$ 、 $|\Delta I_c|$, 当三者都大于整定值时即可判断为三相短路。

5) 两相短路相别判别

当不是接地短路且判别不是三相短路时即可判别为两相短路; 两相不接地短路的突出特点是健全相电流故障分量远小于故障相电流的故障分量, 根据这一特征可确定故障相别。

3 基于粗糙集理论和故障信息网的电网故障诊断方法

3.1 基本思想

利用粗糙集约简得到的规则库进行诊断时, 一般采用将实时故障信息与规则库中的规则进行匹配得出诊断结果的方法。但当系统发生复杂故障或开关、保护存在较多误动、拒动以及因信道干扰而发生信息丢失时, 这种规则匹配的方法很容易出现错误。

因此首先进行故障信息分析并对保护动作分析评判。根据保护动作分析的结果可以修正误动、拒动或丢失的保护动作信息, 从而可以进行更加准确的故障诊断。

因此本文尝试先将故障信息进行分析处理后, 再用粗糙集理论的方法解决电网故障诊断问题。

3.2 算法流程

本文所述算法的流程如图1所示。

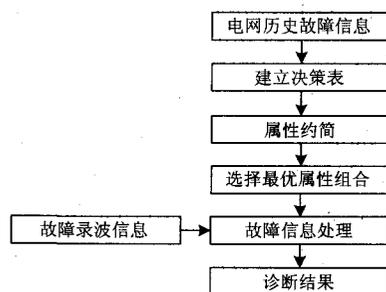


图1 电网故障诊断流程

Fig.1 Flow chart of power network fault diagnosis

3.2.1 基于粗糙集理论的知识提取

1) 根据电网历史故障样本建立决策表。首先, 针对一个局部电网, 根据历史故障信息选取训练样

本集; 然后, 以保护、断路器动作信息作为条件属性, 以故障元件作为决策属性, 建立决策表。

2) 建立决策表的可辨识矩阵 $M_D = (m_{ij})_{n \times n}$;

3) 若可辨识矩阵 $M_D = (m_{ij})_{n \times n}$ 中存在单属性元素, 则将其放入集合 K , 集合 K 为核属性集合, 转步骤4), 否则, 建立可辨识矩阵中各个非零元素的析取逻辑表达式 $L_{ij} = \bigvee a_i$, 其中 a_i 为非零元素 m_{ij} 中的属性项, 转步骤5)。

4) 对任意的 $K_i \in K (i=1,2,\dots,n)$, 若 $K_i \in M_D$, 则令 M_D 中与 K_i 对应的元素 $m_{ij} = 0$, 得到新矩阵 M'_i ; 对于矩阵 M'_i 中的所有非零元素建立相应的析取逻辑表达式 $L_{ij} = \bigvee a_i$, 其中 a_i 为非零元素 m_{ij} 中的属性项。

5) 将所有的析取表达式 L_{ij} 进行合取运算, 得到一个合取范式 $L = \wedge L_{ij}$ 。

6) 将合取范式 L 转换为析取范式的形式, 得到 $L' = \bigvee L_i$ 。

7) 将核属性集合 K 中的元素加入 L' 中的每个合取项, 则每个合取项就对应一个属性约简的结果, 得到约简集合 R_i 。

8) 若属性约简组合 R_i 唯一, 则 $R_{mai} = R_i$, 为最佳属性约简组合; 若属性约简组合 R_i 不唯一, 则用式(2)计算条件属性之间的依赖度, 平均值最小的即为所求的最佳属性约简组合 R_{mai} , 并将 R_{mai} 进行值约简。

3.2.2 故障信息分析处理

1) 将 3.2.1 得到的最佳属性约简组合中保护动作属性放入集合 P 中。

2) 若 $P_i \in P (i=1,2,\dots,n)$ 属于高频或差动保护这样的 2 组式保护, 转步骤 3), 否则读取相对应的故障录波数据, 转步骤 4)。

3) 读取高频或差动保护这样的 2 组式保护的 GPS 信号, 然后将故障信息在时间轴上进行同步。

4) 根据 2.2 所介绍的方法对录波数据进行处理计算, 并查询保护的逻辑和定值, 根据当前状态比较整定值和整定时间, 确定保护状态。

5) 根据保护动作分析的结果修正上述最佳属性约简组合 R_{mai} 中的属性值。然后根据规则库进行电网的故障诊断。

4 仿真算例

针对本文提出的方法, 笔者基于 VC++ 编写了故

障诊断软件, 并用图2所示电网进行了仿真分析。

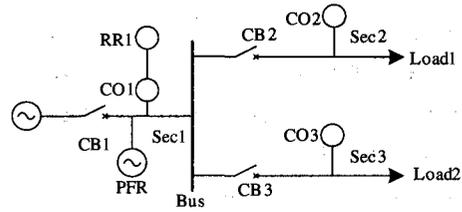


图 2 简单配电系统

Fig.2 A test distribution network

图2为简单配电系统, 3个区域Sec1、Sec2和Sec3, 分别配有过流保护CO1, CO2和CO3, Sec1配有距离保护RR1, 为Sec2和Sec3提供后备保护。CB1, CB2和CB3是断路器, PFR为电力故障录波器, 记录Sec1、Sec2和Sec3区域故障前后的电气模拟量。根据保护动作原理, 可以得到表1所示的由7个电网故障样本组成的决策表, 其条件属性分别为断路器CB1、CB2、CB3, 过流保护CO1、CO2、CO3, 距离保护RR1, 条件属性取值为“0”或“1”, 其中“1”表示断路器由闭合变位为断开或保护动作, “0”表示断路器未变位或保护未动作。决策属性为故障区域, 分别为线路Sec1、Sec2、Sec3、Sec2/3(表示故障发生在Sec2或Sec3)、No(表示无故障)。

对于表1中由7个样本组成的决策表, 按照第一节的结构方法, 建立可辨识矩阵 $M_D = (m_{ij})_{n \times n}$ 如式(7)所示。

表 1 电网故障诊断的决策表

Tab.1 Decision table of electric network fault diagnosis

样本序号	CB1	CB2	CB3	CO1	RR1	CO2	CO3	故障区域
1	1	0	0	1	0	0	0	Sec1
2	0	1	0	0	0	1	0	Sec2
3	0	0	1	0	0	0	1	Sec3
4	1	0	0	0	1	1	0	Sec2
5	1	0	0	0	1	0	1	Sec3
6	1	0	0	0	1	0	0	Sec2/3
7	0	0	0	0	0	0	0	NO

对决策表进行属性约简, 可得到 3 个属性约简:

{CO1,CB1,CO2,CO3};

{RR1,CB1,CO2,CO3};

{CO1,RR1,CO2,CO3}.

经计算, 三组约简组合的平均互信息为 0.0769, 0.1022, 0.0772, 因此最佳属性约简组合为 {CO1,CB1,CO2,CO3}。由它所形成的最佳约简决策表如表 2 所示。

0	CB1, CB2, C01, C02	CB1, CB3, C01, C03	C01, RR1, C02	C01, RR1, C03	C01, RR1	CB1, C01
0	CB2, CB3, C02, C03	0	CB1, CB2, RR1, C02, C03	CB1, CB2, RR1, C02, C03	CB1, CB2, RR1, C02	CB2, C02
0	0	CB1, CB3, RR1, C02, C03	0	CB1, CB3, RR1, C03	CB1, CB3, RR1, C03	CB3, C03
0	0	0	C02, C03	C02	C02	CB1, RR1, C02
0	0	0	0	C03	C03	CB1, RR1, C03
0	0	0	0	0	0	CB1, RR1
0	0	0	0	0	0	0

表 2 最佳约简决策表

Tab.2 Best reduction decision table

样本序号	CO1	CB1	CO2	CO3	故障区域
1	1	1	0	0	Sec1
2	0	0	1	0	Sec2
3	0	0	0	1	Sec3
4	0	1	1	0	Sec2
5	0	1	0	1	Sec3
6	0	1	0	0	Sec2/3
7	0	0	0	0	NO

将表 2 进行值约简, 得到最终故障诊断决策表如表 3 所示。

表 3 最终故障诊断决策表

Tab.3 Final decision table of electric network fault diagnosis

样本序号	CO1	CB1	CO2	CO3	故障区域
1	1	*	*	*	Sec1
2	*	*	1	*	Sec2
3	*	*	*	1	Sec3
4	0	1	0	0	Sec2/3
5	*	0	0	0	NO

表 4 Sec1 区域故障时电压和电流计算结果表

Tab.4 Calculation results of fault current and voltage in Sec1

模拟量名称	单位	故障前			故障后					动作逻辑
		第3周波	第2周波	第1周波	第1周波	第2周波	第3周波	第4周波	第5周波	
Bus U_a	V	55.766	55.766	55.720	37.303	37.928	37.696	4.371	0.950	$CO1=(I_a \geq k_{rel} I_{dz}) \cup (I_b \geq k_{rel} I_{dz}) \cup (I_c \geq k_{rel} I_{dz})$ 其中 $I_{dz} = 5 A$, $T_{dz} = 0 s$, $k_{rel} = 1.1$
Bus U_b	V	55.901	55.903	55.880	54.191	54.202	54.011	55.404	55.752	
Bus U_c	V	56.605	56.620	56.605	54.633	54.674	54.590	56.126	56.280	
Sec1 I_a	A	1.020	1.032	1.040	9.731	9.351	9.162	0.002	0.001	
Sec1 I_b	A	1.022	1.016	1.014	1.099	1.026	0.974	0.894	0.961	
Sec1 I_c	A	1.013	1.007	1.009	1.801	1.696	1.682	0.939	0.971	
Sec1 I_o	A	0.000	0.001	0.000	7.366	7.134	7.106	0.838	0.836	

以 Sec1 区域发生故障为例, 设保护定值 $I_{dz} = 5 A$, $T_{dz} = 0 s$ 。选取适当的系统元件参数进行故障仿真, PFR 记录的故障信息进行滤波后计算的测量值、动作逻辑如表 4 所示(均为二次值)。通过故障信息分析, 可以准确的判断出 Sec1 区域发生故障, 故障相别为 A 相, 即 $CO1=1$ ($\because I_a > k_{rel} I_{dz}$)、 $CB1=1$, 这样当开关、保护误动、拒动以及因信道干扰而发生信息出错丢失, 根据保护动作分析结果, 仍然可以得到正确的诊断结果。

5 结论

(1) 本文提出了先将故障信息进行分析处理再用粗糙集理论的电网故障诊断方法, 先利用粗糙集进行属性约简, 再根据故障录波信息进行故障信息分析处理, 然后修正属性约简决策表中的保护动

作、开关动作属性值, 最后由规则库得出诊断结果, 可以大大提高系统在关键信息出错或丢失情况下的容错性。

(2) 利用粗糙集属性约简减少了诊断的必需的条件属性, 基于故障录波数据的故障信息处理分析保证了条件属性值的准确, 该方法在不影响精度的情况下, 提高了故障诊断的速度。

(3) 算例分析表明, 该方法大大提高了系统的容错性, 而且诊断速度快, 精度高, 具有较好的实用价值。

参考文献

- [1] 周明, 任建文, 李庚银, 等. 基于模糊推理的分布式电力系统故障诊断专家系统[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(24): 33-36.

(下转第 67 页 continued on page 67)

保护器可以在复杂的农村电网和多变的气候条件下保证供电的可靠性,大大方便了用户的使用。通过采用硬件和软件控制跳闸相结合的办法,在发生触电或漏电过大时能及时地进行跳闸操作,避免事故的发生。具有工作性能好,成本低、易普及、可靠性高和操作简便等特点,而且通过采用节能技术,减少了保护器的功耗。因此,该漏电保护器应用前景广阔,能满足市场的需求。

参考文献

- [1] 寇瑞,杨跃军. 剩余电流动作保护装置正确与错误接线分析[J]. 电力学报, 2005, 20(3):300-302.
KOU Rui, YANG Yue-jun. The Analysis on Right and Wrong Wiring of the Residual-current Protecting Equipment[J]. Journal of Electric Power, 2005, 20(3):300-302.
- [2] Mitolo M. Shock Hazard in the Presence of Protective Residual Current Devices[A]. In: ICPS 2007, IEEE/IAS[C]. 2007.1-6.
- [3] GB6829-95, 剩余电流动作保护器的一般要求[M]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
GB6829-95, General Requirements for Residual Current Operated Protective Devices[M]. Beijing: Standards Press of China, 1995.
- [4] 李奎,陆俭国,瞿建喜. 智能化漏电保护器的研究[J]. 机床电器, 2002, (4):7-9.

LI Kui, LU Jian-guo, QU Jian-xi. Research of Intelligent Leakage Current Protector Device[J]. Machine Tool Electric Apparatus, 2002, (4):7-9.

- [5] 胡建勋,李开成. 基于MSP430单片机的低压综合智能保护器的研制[J]. 仪器仪表学报(增刊), 2006, 27(6):2532-2533.
HU Jian-xun, LI Kai-cheng. Research on Intelligent Multifunction Switching Protecting Equipment Based on Single Chip Microcomputer of MSP430[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(6):2532-2533.
- [6] 沈建华,杨艳琴,瞿晓曙. MSP430系列16位超低功耗单片机原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2003.
SHEN Jian-hua, YANG Yan-qin, QU Xiao-shu. The Principle and Application of MSP430 Family of 16-bit Ultra-low-power Sing-chip Microcomputer[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.

收稿日期: 2007-10-17

作者简介:

李开成(1962-);男,教授,博士生导师,博士,主要从事光纤电流、电压互感器、测控技术及智能仪器、电能质量分析、电磁测量等方面的研究; E-mail: likaicheng@mail.hust.edu.cn

刘建锋(1968-),男,博士研究生,研究方向为光电互感器、电磁测量等。

(上接第63页 continued from page 63)

- ZHOU Ming, REN Jian-wen, LI Geng-yin, et al. Distributed Power System Fault Diagnosis Expert System Based on Fuzzy Inference[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(24): 33-36.
- [2] 束洪春,孙向飞,司大军. 基于粗糙集理论的配电网故障诊断研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 73-82.
SHU Hong-chun, SUN Xiang-fei, SI Da-jun. The Study of Distribution System Fault Diagnosis Based on Rough Set Theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 73-82.
- [3] 束洪春,孙向飞,于继来. 粗糙集理论在电力系统中的应用[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(3): 90-95.
SHU Hong-chun, SUN Xiang-fei, YU Ji-lai. A Survey on the Application of Rough Set Theory in Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(3): 90-95.
- [4] 赵冬梅,韩月,高曙. 电网故障诊断的决策表约简新算法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(4): 63-66.
ZHAO Dong-mei, HAN Yue, GAO Shu. New Reduct Algorithm of Decision Table for Electric Power Grid Fault Diagnosis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(4): 63-66.
- [5] 李波,赵志彦,王秀峰. 基于互信息和凝义度相结合的知识约简方法[J]. 天津大学学报, 2003, 36(4): 503-506.
LI Bo, ZHAO Zhi-yan, WANG Xiu-feng. A Method of Knowledge Reduction Based on Combination of Mutual Information and Doubtful Measure[J]. Journal of Tianjin University, 2003, 36(4): 503-506.
- [6] 崔巍,程道,石东源,等. 电力系统故障信息综合应用系统的研究[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(5):27-30.
CUI Wei, CHENG Xiao, SHI Dong-yuan, et al. Research on Power Fault Information Integrated Application System[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(5):27-30.
- [7] 陈德树. 计算机继电保护原理与技术[M]. 北京:中国电力出版社, 1998.
CHEN De-shu. Principle and Technique of Computer Protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.

收稿日期: 2007-08-13; 修回日期: 2008-01-07

作者简介:

王林先(1976-),男,工程师,从事变电站综合自动化系统的研发工作;

李乃永(1981-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统运行与控制。E-mail: guyan1127@163.com