

## 基于关联规则的电网故障诊断解析方法

江雪晨<sup>1</sup>, 王大志<sup>1</sup>, 宁一<sup>1</sup>, 赵琳琳<sup>2</sup>, 张翠玲<sup>1</sup>

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110004; 2. 辽宁省产品质量监督检验院, 沈阳 110032)

**摘要:** 针对电网故障诊断解析模型存在多解和误诊问题, 提出一种基于关联规则的电网故障诊断解析方法, 并通过解析保护和断路器动作及告警信息的不确定性, 构建诊断的评价指标. 利用解析方法获得故障的完备诊断, 进而基于各类不确定性事件概率, 采用评价指标从完备的诊断集合中求取最优诊断. 故障诊断算例验证了所提出方法的有效性.

**关键词:** 故障诊断; 解析模型; 关联规则; 不确定性

**中图分类号:** TM71

**文献标志码:** A

## Analytic method for fault diagnosis of power systems based on association rules

JIANG Xue-chen<sup>1</sup>, WANG Da-zhi<sup>1</sup>, NING Yi<sup>1</sup>, ZHAO Lin-lin<sup>2</sup>, ZHANG Cui-ling<sup>1</sup>

(1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. Quality Supervision and Inspection Institute of Liaoning Province, Shenyang 110032, China. Correspondent: NING Yi, E-mail: vipningyi@126.com)

**Abstract:** Aiming at the multiple solutions and misdiagnosis problems for fault diagnosis based on the analytic models for power systems, an analytic method for fault diagnosis based on association rules is proposed. By analyzing the uncertainty about the protective relay action, circuit breaker action and the alarm information, an evaluation index of diagnoses is proposed. The complete diagnoses of faults are obtained by using the analytic method. Considering the probabilities of the above mentioned uncertain elements, the optimal diagnosis can be drawn from the complete diagnoses obtained based on the evaluation index. The effectiveness of the proposed method is verified by the cases of fault diagnosis.

**Keywords:** fault diagnosis; analytic model; association rules; uncertainty

### 0 引言

电力系统发生故障时, 快速准确的故障诊断对于减少电能中断时间、防止事故扩大化和保证电力系统的安全运行具有重要意义<sup>[1-2]</sup>. 基于解析模型的诊断方法是根据保护和断路器动作原理, 构建使实际告警信息与期望值之间差异最小化的优化模型, 具有严密的数学模型, 近年来得到了快速发展<sup>[3-5]</sup>.

文献[6-7]将保护和断路器的拒动及误动情况表示成逻辑变量, 建立了较为完备的诊断模型, 能够评价保护和断路器的拒动、误动行为. 但上述模型用实际告警信息替代保护和断路器的动作状态, 当告警信息错误时, 可能导致诊断结果错误. 文献[8]充分考虑了保护和断路器动作及告警信息的不确定性, 以及故障元件状态、保护和断路器动作的整体关联性,

提出了电网故障诊断的完全解析模型, 克服了文献[6-7]中保护和断路器动作及告警信息的不确定性导致诊断错误的缺点, 增强了故障诊断模型的鲁棒性和容错能力. 文献[9]分析了保护装置层面上拒动行为可能的一致性, 提出相应的修正策略, 建立了考虑保护动作行为一致性的电网故障诊断的完全解析模型. 文献[8-9]的方法都能有效提高故障诊断结果的准确性, 但在发生多个误动、拒动以及告警信息错误时, 由于解析模型赋予各类保护和断路器相同的权值, 致使在构造目标函数时决策故障状态的信息可能合并相消, 从而发生诊断故障时会出现多解和误诊情况. 文献[10]详细分析了模型产生多解的原因, 赋予保护和断路器不同的贡献因子, 使建立的解析模型更加合理; 但该模型与文献[6-7]模型存在同样问题, 即用实

**收稿日期:** 2015-02-03; **修回日期:** 2015-11-12.

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(61433004); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(N130604001).

**作者简介:** 江雪晨(1984—), 男, 博士生, 从事电力系统故障诊断、故障测距的研究; 王大志(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事大功率电力电子技术及其应用等研究.

际告警信息替代保护和断路器的动作状态,从而会出现误诊情况。

基于上述分析,本文通过分析保护和断路器动作及告警信息的不确定性,将故障过程中保护和断路器的理想动作状态按照相应的逻辑推理关联起来,提出一种基于关联规则的获取故障完备诊断的解析方法;然后利用各种不确定性事件发生的概率,构建诊断的评价指标,并结合电网运行的先验知识,从完备的诊断集合中求取最优诊断。

### 1 电网故障诊断的完全解析

#### 1.1 保护和断路器的动作状态解析

保护和断路器的动作期望是指保护和断路器根据继电保护原理和配置规则要求而做出动作响应的激励。在下文的运算中,符号 $\otimes$ 、 $\oplus$ 、 $-$ 分别表示逻辑运算的与、或、非,通常符号 $\otimes$ 在不影响表达的情况下可以省略。

1) 主保护动作期望。

若元件 $s$ 发生故障,则其主保护 $r_i$ 的动作期望 $f_{r_i}$ 应该有响应,即

$$f_{r_i} = s. \tag{1}$$

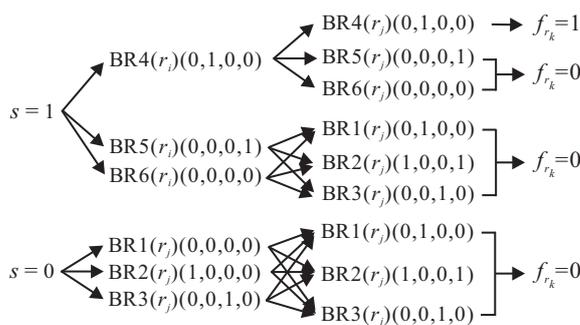
2) 第1后备保护动作期望。

若 $s$ 发生故障,主保护 $r_i$ 拒动,则第1后备保护 $r_j$ 的动作期望 $f_{r_j}$ 应该有响应,即

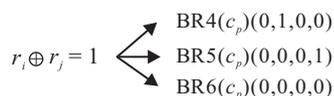
$$f_{r_j} = s d_{r_i}. \tag{2}$$

3) 第2后备保护动作期望。

当元件 $s_x \in S(r_k)$ 故障时( $S(r_k)$ 表示 $r_k$ 保护范围内元件的集合),且其主保护 $r_i$ 和第1后备保护 $r_j$ 都发生拒动,则 $s_x$ 的第2后备保护 $r_k$ 的动作期望 $f_{r_k}$ 应该响应;如果 $r_k$ 到 $s_x$ 关联路径上的所有断路器均未跳闸,则此时 $f_{r_k}$ 也应该有响应<sup>[11]</sup>,即



(a) 关联规则 1



(b) 关联规则 2

$$f_{r_k} = \sum_{s_x \in S(r_k)} (s_x d_{r_i} d_{r_j}) \oplus \sum_{s_x \in S(r_k)} \left( s_x \prod_{c_l \in p(r_k, s_x)} \bar{c}_l \right), \tag{3}$$

其中 $p(r_k, s_x)$ 是沿供电线路从保护 $r_k$ 处到元件 $s_x$ 处所有断路器的集合

4) 断路器动作期望。

若任何与断路器 $c$ 相关联的保护 $r_x$ 动作,则断路器动作期望 $f_c$ 应该有响应,即

$$f_c = \sum_{r_x \in R(c)} r_x, \tag{4}$$

其中 $R(c)$ 表示所有能驱动断路器 $c$ 跳闸的保护集合。

基于对保护和断路器动作期望解析,考虑动作的误动和拒动情况,将保护 $r$ 和断路器 $c$ 动作状态的解析表示为

$$\begin{cases} r = f_r \bar{d}_r \oplus m_r, \\ c = f_c \bar{d}_c \oplus m_c. \end{cases} \tag{5}$$

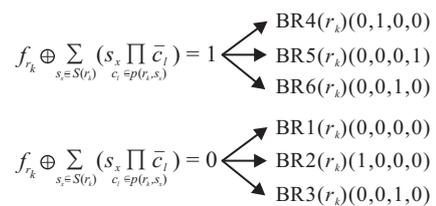
#### 1.2 关联规则的建立

将保护(断路器)的拒动与误动称为保护(断路器)动作的不确定性,保护(断路器)告警信息的漏报与误报称为保护(断路器)告警信息的不确定性。这些不确定性可表示为

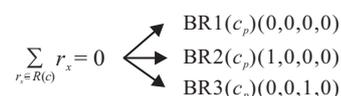
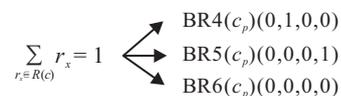
$$\begin{cases} m_r = r \bar{f}_r, d_r = \bar{r} f_r, \\ l_r = \bar{r}' r, w_r = \bar{r}' r'. \end{cases} \tag{6}$$

其中: $m_r$ 、 $d_r$ 分别表示保护误动和拒动, $l_r$ 、 $w_r$ 分别表示保护告警信息漏报和误报, $r'$ 为保护告警信息。式(6)只给出了保护的不确定性表达式,断路器的不确定性表达与此类似。

考虑矛盾的逻辑(动作又拒动、拒动又误动、未动又误动、有动作期望又误动、无动作期望又拒动)和小概率事件(误动又漏报、拒动又误报)的约束<sup>[8]</sup>,得到如下基础规则:



(c) 关联规则 3



(d) 关联规则 4

图1 关联规则

BR1: 当无动作期望、也无告警信息时, 若动作状态为0, 则  $\{m, d, w, l\} = \{0, 0, 0, 0\}$ ;

BR2: 当无动作期望、有告警信息时, 若动作状态为1, 则  $\{m, d, w, l\} = \{1, 0, 0, 0\}$ ;

BR3: 当无动作期望、有告警信息时, 若动作状态为0, 则  $\{m, d, w, l\} = \{0, 0, 1, 0\}$ ;

BR4: 当有动作期望、无告警信息时, 若动作状态为0, 则  $\{m, d, w, l\} = \{0, 1, 0, 0\}$ ;

BR5: 当有动作期望、无告警信息时, 若动作状态为1, 则  $\{m, d, w, l\} = \{0, 0, 0, 1\}$ ;

BR6: 当有动作期望、有告警信息时, 若动作状态为1, 则  $\{m, d, w, l\} = \{0, 0, 0, 0\}$ .

基于基础规则, 将故障过程中保护和断路器的理想动作状态按照相应的逻辑推理关联起来, 表示成关联规则, 如图1所示. 其中BR4( $r_j$ ) (0, 1, 0, 0) 指第1后备保护的基础规则, 即: 当  $f_{r_j} = 1, r'_j = 0$  时, 若  $r_j = 0$ , 则  $\{m_{r_j}, d_{r_j}, w_{r_j}, l_{r_j}\} = \{0, 1, 0, 0\}$ ; 其他以此类推.

## 2 电网故障诊断的解析方法

### 2.1 基于关联规则的故障诊断

基础规则蕴含了保护(断路器)的完整状态信息, 完整状态信息包括动作期望、告警信息、动作状态、误动、拒动、误报和漏报的信息. 本文采用关联规则获取故障的完备诊断集合, 过程归纳如下:

1) 确定电网停电区域, 将停电区域内的每个元件视为可疑故障元件.

2) 基于已获取的主保护、第1后备保护的告警信息, 沿规则1中箭头方向, 得出所有可疑故障元件主保护和第1后备保护的  $n$  组路径组合.

3) 将规则1中第  $i$  组路径的保护动作状态和相应断路器告警信息代入规则2中, 得到相应断路器拒动状态.

4) 根据规则1中第  $i$  组路径的远后备保护动作期望、元件状态及断路器拒动状态, 按规则3路径推导出第  $i$  组路径所有可疑故障元件远后备保护的  $t_i$  组路径组合.

5) 将规则1中第  $i$  组路径和规则3中第  $j$  组路径的保护代入规则4中, 得到  $l_{ij}$  组路径组合. 令  $j = j + 1$ , 若  $j < t_i$ , 则返回步骤6), 否则跳到步骤7).

6) 令  $i = i + 1$ , 若  $i < n$ , 则返回步骤4), 否则跳到步骤7).

7) 每条路径代表一种诊断, 最终得到故障的  $\sum_i^n \sum_j^{t_i} (l_{ij})$  种诊断.

### 2.2 最优诊断的求取

本文将由保护(断路器)的不确定事件及非不确定事件构成的事件定义为保护(断路器)事件. 保护(断路器)事情可用包含概率的因果关系描述<sup>[12]</sup>, 如图2和图3所示. 其中:  $\rho_{m_r}(\rho_{m_c})$  和  $\rho_{d_r}(\rho_{d_c})$  分别表示保护  $r$ (断路器  $c$ ) 的误动概率和拒动概率,  $\rho_{w_r}(\rho_{w_c})$  和  $\rho_{l_r}(\rho_{l_c})$  分别为保护  $r$ (断路器  $c$ ) 告警信息的误报概率和漏报概率.

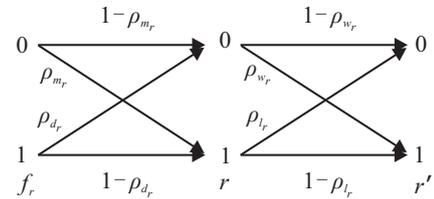


图2 保护事件的关系

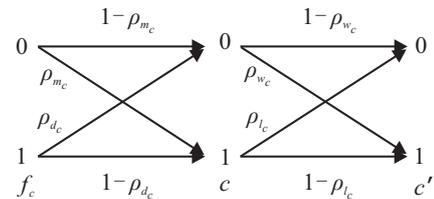


图3 断路器事件的关系

由图2和图3可以看出: 保护事件的概率是  $f_r$ 、 $r$  和  $r'$  的函数, 记为  $P(f_r, r, r')$ ; 断路器事件的概率是  $f_c$ 、 $c$  和  $c'$  的函数, 记为  $P(f_c, c, c')$ . 例如, 当  $f_r = 1, r = 0, r' = 0$  时, 保护事件由保护拒动和保护不误报构成, 此时  $P(f_r, r, r') = \rho_{d_r}(1 - \rho_{w_r})$ .

给出事情的评价指标定义: 如果事情  $x$  发生概率为  $\rho(\rho \leq 1)$ , 则事件  $x$  的评价指标表示为

$$I(x) = -\ln \rho. \tag{7}$$

$I(x)$  越小, 表明事情  $x$  发生的概率越大.

由关联规则得出的诊断为故障的一个完备诊断集合, 集合中每个诊断都表示一种可能的故障情形. 保护和断路器动作及告警信息都具有不确定性, 在一个故障情形中, 如果出现这些小概率不确定事件越少, 则实际发生该故障情形的几率就越大. 对于某种故障情形, 其评价指标可以用保护事件和断路器事件的评价指标叠加得到, 即

$$I(S, G) = -\sum_{r \in R} [\ln P(f_r, r, r')] - \sum_{c \in C} [\ln P(f_c, c, c')]. \tag{8}$$

其中:  $S$  表示某种故障情形下被诊断元件的状态信息,  $G$  表示某种故障情形下的保护和断路器的完整状态信息.

在完备诊断集合中, 按式(8)选出评价指标最小的故障情形 ( $S^*, G^*$ ) 并作为最终的故障诊断结果.

### 3 算例分析

#### 3.1 算例系统

以IEEE新英格兰10机39节点电网作为测试系统<sup>[12]</sup>, 检验本文所提出方法的有效性. 假设在线路 $L_{3-18}$ 上发生故障, 保护和断路器的动作过程如下: 主保护 $L_{(3)-18m}$ 和第2后备保护 $L_{(17)-18s}$ 动作, 主保护 $L_{(18)-3m}$ 和第1后备保护 $L_{(18)-3p}$ 拒动, 断路器 $C_{(3)-18}$ 和 $C_{(17)-18}$ 跳闸. 其中 $L_{(3)-18m}(C_{(3)-18})$ 表示线路 $L_{3-18}$ 靠近母线 $B_3$ 侧的主保护(断路器), 其他以此类推.

由结线分析确定停电区域, 有3个元件, 4个断路器, 13个保护.

1) 可疑故障元件:  $L_{3-18}, L_{17-18}, B_{18}$ , 对应  $S = \{s_1, s_2, s_3\}$ .

2) 相关保护:  $L_{(3)-18m}, L_{(18)-3m}, L_{(3)-18p}, L_{(18)-3p}, L_{(3)-18s}, L_{(18)-3s}, L_{(17)-18m}, L_{(18)-17m}, L_{(17)-18p}, L_{(18)-17p}, L_{(17)-18s}, L_{(18)-17s}, B_{18m}$ , 对应  $R = \{r_1, r_2, \dots, r_{13}\}$ .

3) 相关断路器:  $C_{(3)-18}, C_{(18)-13}, C_{(17)-18}, C_{(18)-17}$ , 对应  $C = \{c_1, c_2, c_3, c_4\}$ .

根据收到的告警信息确定:  $R' = \{r'_1, r'_2, \dots, r'_{13}\} = \{1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0\}$ ,  $C' = \{c'_1, c'_2, c'_3, c'_4\} = \{1, 0, 1, 0\}$ .

#### 3.2 诊断结果及分析

根据告警信息 $R'$ 和 $C'$ , 由关联规则获得完备诊断集合, 限于篇幅, 这里只给出元件状态 $S = \{1, 0, 0\}$ 时的其中3种保护和断路器完整状态信息, 如表1所示.

表1 保护和断路器完整状态

参数	保护完整状态	断路器完整状态
动作期望	1) {1,1,0,1,0,0,0,0,0,0,1,0,0}	1) {1,0,0,1}
	2) {1,1,0,1,0,1,0,0,0,0,0,0,0}	2) {1,1,0,1}
	3) {1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0}	3) {1,1,0,0}
动作状态	1) {1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0}	1) {1,0,0,1}
	2) {1,0,0,1,0,0,0,0,0,0,1,0,0}	2) {1,1,0,1}
	3) {1,1,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0}	3) {1,1,0,0}
漏报	1) {0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0}	1) {0,0,0,0}
	2) {0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,1,0,0}	2) {1,1,0,1}
	3) {0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0}	3) {1,1,0,0}
误报	1) {0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0}	1) {0,0,0,0}
	2) {0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0}	2) {0,0,0,0}
	3) {0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0}	3) {0,0,0,1}
误动	1) {0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0}	1) {0,0,0,0}
	2) {0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0}	2) {0,0,0,0}
	3) {0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0}	3) {0,0,0,0}
拒动	1) {0,1,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0}	1) {0,0,0,0}
	2) {0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0}	2) {0,0,0,0}
	3) {0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0}	3) {0,0,0,0}

各保护和断路器拒动及误动概率采用2000~2004年电网继电保护运行状态的统计数据, 如表2所示<sup>[14]</sup>, 告警信息漏报和误报概率都取1%<sup>[12]</sup>. 利用式(8)评价指标对完备诊断集合进行评价, 求得评价指标最小值 $I(S^*, G^*) = 16.788$ , 此时, 元件状态 $S = \{1, 0, 0\}$ , 保护和断路器完整状态对应表1中第1)种情况. 该诊断结果与算例中的故障情况描述完全相符.

表2 动作的不确定性 %

保护类型/断路器	拒动概率	误动概率
线路保护	0.09	1.16
母线保护	3.46	12.59
变压器保护	0.46	5.32
断路器	0.5	0.5

用本文方法对如下其他故障案例进行测试.

1) 故障元件:  $L_{27-17}$ ; 告警信息:  $L_{(27)-17m}, L_{(18)-17s}, L_{(16)-17s}, C_{(27)-17}, C_{(18)-17}, C_{(16)-17}$ .

2) 故障元件:  $L_{3-4}, B_{18}, L_{17-18}$ ; 告警信息:  $L_{(3)-4m}, L_{(4)-3m}, C_{(3)-4}, C_{(4)-3}, L_{(3)-18s}, L_{(17)-18m}, C_{(3)-18}, C_{(17)-18}$ .

3) 故障元件:  $B_4, L_{3-4}, B_2, L_{25-26}$ ; 告警信息:  $B_{4m}, C_{(4)-3}, C_{(4)-5}, C_{(4)-14}, L_{(2)-3s}, L_{(18)-13s}, C_{(2)-3}, C_{(18)-13}, L_{(25)-26m}, L_{(26)-25m}, C_{(25)-26}, C_{(26)-25}, B_{2m}, C_{(2)-30}, C_{(2)-1}, C_{(2)-25}$ .

4) 故障元件:  $L_{1-2}, L_{1-19}, L_{16-19}$ ; 告警信息:  $L_{(1)-2m}, L_{(2)-1p}, C_{(1)-2}, C_{(2)-1}, L_{(19)-1m}, C_{(1)-19}, C_{(19)-1}, C_{(19)-9}, L_{(16)-19m}, L_{(19)-16p}, C_{(16)-19}, C_{(19)-16}$ .

将诊断结果与文献[9-10]的方法进行比较, 比较结果如表3所示. 由表3可知, 文献[9-10]的解析模型可能存在多解和误诊情况, 而本文方法的诊断结果准确且唯一, 进一步验证了本文方法的有效性.

表3 诊断结果比较

文献[9]结果	文献[10]结果	本文结果
$L_{27-17}, B_{17}$	$L_{27-17}$	$L_{27-17}$
$L_{3-4}, B_{18}, L_{17-18}$	$L_{3-4}, L_{17-18}$	$L_{3-4}, B_{18}, L_{17-18}$
$B_4, B_3, B_2$	$B_4, B_3, B_2$	$B_4, L_{3-4}, B_2$
$L_{25-26}$	$L_{25-26}$	$L_{25-26}$
1) $L_{1-2}, L_{1-19}, L_{16-19}$ ; 2) $L_{1-2}, L_{1-19}, L_{16-19}, B_{19}$	$L_{1-2}, L_{1-19}, L_{16-19}$	$L_{1-2}, L_{1-19}, L_{16-19}$

### 4 结论

本文提出了一种基于关联规则的电网故障诊断解析方法, 通过对电网故障诊断规则进行完全解析, 完整保留了电网元件状态、各类保护动作之间、保护与断路器动作之间的固有逻辑关系, 从而求解出故障

的完备诊断. 本文从模型多解和误诊的根源出发, 通过解析保护和断路器动作及告警信息的不确定性, 利用各类不确定性事件概率构建了诊断的评价指标. 采用评价指标从完备的诊断集合中求取最优诊断, 能有效地消除保护和断路器的拒动及误动, 告警信息的漏报及误报对诊断结果的影响. 最后利用电网故障算例验证了本文方法的有效性.

### 参考文献(References)

- [1] 郭创新, 游家训, 彭明伟, 等. 基于面向元件神经网络与模糊积分融合技术的电网故障智能诊断[J]. 电工技术学报, 2010, 25(9): 183-190.  
(Guo C X, You J X, Peng M W, et al. A fault intelligent diagnosis approach based on element-oriented artificial neural networks and fuzzy integral fusion[J]. Trans of China Electrotechnical Society, 2010, 25(9): 183-190.)
- [2] 卢鹏, 王锡淮, 肖健梅. 基于粗糙集和图论的电力系统故障诊断方法[J]. 控制与决策, 2013, 28(4): 511-516.  
(Lu P, Wang X H, Xiao J M. Method of fault diagnosis in power system based on rough set theory and graph theory[J]. Control and Decision, 2013, 28(4): 511-516.)
- [3] 文福拴, 韩祯祥, 钱源平. 基于遗传算法的电力系统故障诊断的解析模型与方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 1998, 10(3): 1-7.  
(Wen F S, Han Z X, Qian Y P, et al. An analytic and genetic algorithm based methods for fault diagnosis in power systems[J]. Proc of the EPSA, 1998, 10(3): 1-7.)
- [4] 郭文鑫, 文福拴, 廖志伟, 等. 计及保护和断路器误动与拒动的电力系统故障诊断解析模型[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(24): 6-10.  
(Guo W X, Wen F S, Liao Z W, et al. An analytic model for power system fault diagnosis with malfunctions of protective relays and circuit breakers taken into account[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(24): 6-10.)
- [5] Lin X, Ke S, Li Z, et al. A fault diagnosis method of power systems based on improved objective function and genetic algorithm-Tabu search[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2010, 25(3): 1268-1274.
- [6] Wei Liuhong, Guo Wenxin, Wen Fushuan, et al. Waveform matching approach for fault diagnosis of high voltage transmission lines employing harmony search algorithm[J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2010, 4(7): 801-809.
- [7] Guo Wenxin, Wen Fushuan, Ledwich G, et al. An analytic model for fault diagnosis in power system considering malfunctions of protective relays and circuit breakers[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2010, 24(3): 1393-1401.
- [8] 刘道兵, 顾雪平, 李海鹏. 电网故障诊断的一种完全解析模型[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34): 85-92.  
(Liu D B, Gu X P, Li H P. A complete analytic model for fault diagnosis of power systems[J]. Proc of the CSEE, 2011, 31(34): 85-92.)
- [9] 赵冬梅, 张旭, 魏娟, 等. 以重现故障过程为目的的电网故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2116-2123.  
(Zhao D M, Zhang X, Wei J, et al. Power grid fault diagnosis aiming at reproducing the fault process[J]. Proc of the CSEE, 2014, 34(13): 2116-2123.)
- [10] 熊国江, 石东源. 电网故障诊断改进模型及其自适应生物地理学优化方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 205-211.  
(Xiong G J, Shi D Y. An improved analytic model for fault diagnosis of power grids and its self-adaptive biogeography-based optimization method[J]. Trans of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 205-211.)
- [11] 董明, 张勇, 张岩, 等. 含电气量信息的电力系统故障诊断解析模型[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(6): 55-62.  
(Dong M, Zhang Y, Zhang Y, et al. An analytic model for power system fault diagnosis employing electrical data[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6): 55-62.)
- [12] 张道兵. 电网故障诊断的解析化建模与求解[D]. 北京: 华北电力大学电气与电子工程学院, 2012.  
(Zhang D B. Modeling and solving of a complete analytic model for fault diagnosis of power systems[D]. Beijing: School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, 2012.)
- [13] Wei Liuhong, Guo Wenxin, Wen Fushuan, et al. An on-line intelligent alarm processing system for digital substations[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2011, 26(3): 1615-1624.
- [14] 周玉兰, 王玉玲. 2004年全国电网继电保护与安全自动装置运行情况[J]. 电网技术, 2005, 29(16): 42-48.  
(Zhou Y L, Wang Y L. Statistics of operation situation situation of protective relay and automation devices of power systems in china in 2004[J]. Power System Technology, 2005, 29(16): 42-48.)

(责任编辑: 李君玲)