

一种基于高级 Petri 网的微电网故障诊断方法

刘科学¹, 宣文华¹, 魏少鹏², 田雷雷³

(1. 国网冀北电力有限公司秦皇岛供电公司, 河北 秦皇岛 066000; 2. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000;
3. 燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 微电网拓扑结构灵活, 运行方式多样, 是一个相对自治系统。针对微电网拓扑结构多变导致故障诊断建模困难问题, 提出基于微电网线路故障保护信息的分层 Petri 网分析模型。该模型以分层保护集形式处理微电网保护信息。当微电网拓扑结构改变时, 只需更新相应的保护集信息, 不需要重新建模, 对微电网的灵活多变有较强的适应性。该模型还可以有效判别保护和断路器的拒动、误动和处理含有时序关系的保护信息。为增强诊断系统的容错性和可靠性, 采用智能加权模糊 Petri 网理论自适应调整权值。仿真算例验证了方法的有效性。

关键词: 微电网; 故障诊断; Petri 网; BCC 算法

A method of micro grid fault diagnosis based on high-level Petri net

LIU Kexue¹, XUAN Wenhua¹, WEI Shaopeng², TIAN Leilei³

(1. Qinhuangdao Power Supply Company, State Grid Jibei Electric Power Company Limited, Qinhuangdao 066000, China;
2. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China; 3. School of Electrical Engineering,
Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: The micro-grid is a relatively autonomous system with flexible topology and diverse operation mode. In order to solve the fault diagnosis problem resulted from the varied topology of micro-grid, this paper proposes a hierarchical Petri net diagnosis model. The micro-grid protection information is described with hierarchical protection set. And when the micro-grid topology changes, only the corresponding information of the protection sets need updating, instead of changing the whole model, so as to improve the adaptability to the flexible topology of micro-grid. The diagnosis model can effectively distinguish the misoperation of protection and circuit breaker, and deal with the sequential data come from the protection. In order to enhance fault tolerance of the diagnosis system, this paper uses intelligent weighted fuzzy Petri net and adaptive cumulative value to improve the accuracy of fault diagnosis. The effectiveness of the proposed method is verified by simulation example.

Key words: micro-grid; fault diagnosis; Petri net; BCC algorithm

0 引言

传统的电网故障诊断方法主要通过对线路电压、电流进行定量分析来实现。由于电网故障诊断过程中包含很多难以用传统数学方法描述的问题, 导致传统诊断方法具有局限性^[1-2]。人工智能技术对处理不确定问题有独特优势, 在现代电网故障诊断领域获得应用。

文献[3]提出利用专家系统方法把保护信息、断路器状态变化以及操作人员的知识和经验通过规则表示出来, 形成故障诊断知识库, 进而根据报警信息对知识库进行推理、判断, 得到故障诊断结果。

文献[4]利用神经网络方法把大量电网故障实例作为分析和学习样本, 把保护信息和断路器动作逻辑作为神经网络的输入, 经过一定训练, 实现知识的自组织和自学习, 输出可能的故障元件。文献[5]利用粗糙集理论对电力系统继电保护信息进行约简分类形成规则和决策。文献[6]利用贝叶斯网络建立针对元件的故障诊断模型, 利用先验概率标识各节点之间的关联关系, 再采用贝叶斯网络处理不确定性, 获得诊断结果。文献[7-9]利用Petri网作为电网故障诊断方法, 基于与故障元件逻辑相关的断路器状态信息来建模, 以断路器状态判断变迁是否点火。上述人工智能方法一般应用在网络结构比较

固定的大电网中, 对于拓扑结构灵活的微电网, 上述故障诊断方法存在局限性。

与大电网相比, 微电网拓扑结构灵活多变, 电源可随机投退且发电功率不确定; 多数微电网归属一般电力用户, 缺乏专业人员的操控和维护, 主要依靠自动化信息系统进行自治运行管理^[10]。针对微电网的多变性, 本文提出一种分层Petri网诊断模型和方法。该方法利用分层保护集处理微电网保护信息, 通过更新保护集信息来解决微电网拓扑结构改变的建模问题。该方法还可以有效判别保护和断路器的拒动、误动, 并处理含有时序关系的保护信息。利用BCC算法自适应调整权值, 提高诊断结果的精确性。

1 基于分层 Petri 网的微电网故障诊断

1.1 微电网故障诊断分层 Petri 网模型的建立

分层Petri网模型简化了传统Petri网结构, 其主要思想是通过保护集概念把原来分散考虑的各保护统一起来, 如图1所示。对集合里各保护信息值进行“与”运算, 计算结果作为库所点火依据。若结果为1, 则点火, 按照Petri网理论完成推导工作; 反之不动作。当微电网拓扑结构发生改变时, 无需重新建模, 只需要更新相应保护集信息值, 再按照分层Petri网模型进行故障诊断。该模型对于解决微电网的灵活多变问题有较强的适应性。

分层Petri网模型是相对故障元件来说的, 分为故障上游和故障下游。靠近大电网侧定为故障上游, 靠近用户侧为故障下游。相邻线路后备保护是指远端含有DG且与故障元件相关联的线路后备保护。若相邻线路远端不含DG, 则不考虑。上述后备保护共同作用构成一个后备保护集。为简化计算, 后备保护最远作为前两段相邻线路保护, 且本级线路的后备保护也包含于后备保护集。

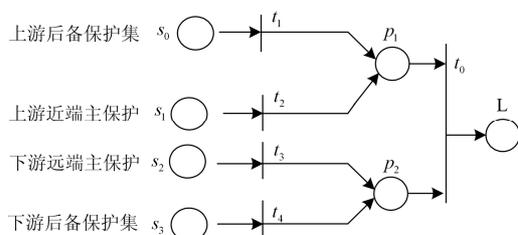


图1 分层Petri网分析模型

Fig. 1 Hierarchical analysis model of Petri net

根据保护模型, 构建上游保护矩阵 A_1 和下游保护矩阵 A_2 。矩阵首元素表示主保护或本级后备保护, 默认为1, 其余元素表示相邻线路后备保护集,

从上到下依次赋值。图2为一个典型微电网模型, 某一时刻线路 L_2 发生短路故障, 保护断路器 $CB2.1$ 和 $CB3.2$ 动作。按照上述描述, 得到上游保护矩阵 A_1 为 $[1\ 1\ 1\ 1]$, 下游保护矩阵 A_2 为 $[1\ 1]$ 。

根据输出的断路器状态, 构建断路器上游动作矩阵 B_1 和下游动作矩阵 B_2 。矩阵 B 元素是与矩阵 A 中各元素相对应保护逻辑相关的断路器状态。若保护对应的断路器动作, 则设定为1, 反之为0。图2的上游动作矩阵 B_1 为 $[1\ 0\ 0\ 0]$, 下游动作矩阵 B_2 为 $[0\ 1]$ 。同理根据保护动作状态信息构建保护动作矩阵 C , 矩阵 C 元素表示矩阵 A 中对应元素的保护动作状态, 若保护动作, 则设定为1, 反之为0。

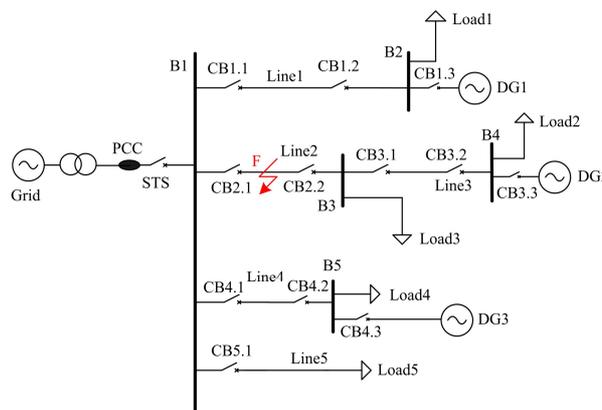


图2 微电网简单模型

Fig. 2 Simple micro grid model

按照上述分层Petri网模型, 当图2中保护断路器 $CB2.1$ 和 $CB3.2$ 动作, 上游近端主保护的断路器信息为1, 下游后备保护的断路器信息为1, 库所可以点火, 完成故障诊断过程。基于分层Petri网模型诊断微电网故障时, 仍可以按照传统的矩阵方法^[10]进行计算。按照图2给出的网络拓扑结构, 建立分层Petri网分析模型。经过矩阵计算, 得到最终的标识矩阵 $M=[1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]$ 。相比传统Petri网建模得到的标识矩阵 $M'=[1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]$, 本方法库所信息少, 计算量小。

1.2 保护和断路器拒动、误动的判断

微电网故障发生时, 基于电气元件建模的传统Petri网把断路器状态信息作为其变迁点火依据, 若存在保护和断路器拒动或误动, 将给分析过程带来困难。本文利用保护信息与断路器的关联关系, 首先将矩阵 C 与矩阵 B 进行同或运算, 若计算结果与矩阵 C 相同, 则说明保护信息传输正确, 各保护与关联断路器逻辑正确。若计算结果不相同, 则将矩阵 C 与 B 相减, 将结果与矩阵 B 比较, 若与矩阵 B 中相同位置的元素由0变为1, 则说明断路器拒动

或者保护动作信息在通信过程丢失;若由1变为-1,则说明断路器误动或者保护动作信息误报。对于上述同或计算不一致情况,需要对断路器动作状况修正,再进行 Petri 网建模分析。

若上述计算结果与矩阵 C 相同,即保护与关联断路器动作逻辑相符,根据构建的保护矩阵 A 与断路器动作矩阵 B ,将两者进行减法运算,计算结果矩阵用 $\text{sub}\theta$ 表示。 $\text{sub}\theta$ 根据首元素不同,可以分为不同情况处理,如式(1)和式(2)所示。式(1)中, i 为计算矩阵中第 i 个元素,且 $i > 1$ 。该式表示若结果矩阵中首值为 0,则说明本级保护正确动作,而其他元素为 1,则相邻线路后备保护正确动作;反之,后备保护误动。式(2)中, j 为计算矩阵中第 j 个元素,且 $j > 1$ 。该公式表示若结果矩阵中首值为 1,则说明本级保护没有正常动作,而其他元素为 0,则远端后备保护正常动作,反之,后备保护拒动。若集合里面信息出现某个或多个保护或断路器误动、拒动时,利用本文中 Petri 网理论得不到故障对象,因此需要对上述情况先进行纠错,再利用 Petri 网进行处理,重新计算矩阵,确定故障元件。

$$\text{sub}\theta_i = A_i - B_i = \begin{cases} 1 & \text{微电网线路保护误动} \\ 1 & \text{微电网保护线路正常} \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{sub}\theta_j = A_j - B_j = \begin{cases} 0 & \text{微电网线路保护正常} \\ 1 & \text{微电网保护线路拒动} \end{cases} \quad (2)$$

可见,当故障线路两端主保护动作时,按照上述 Petri 网模型可以准确得出故障发生线路。若一端主保护动作,另一端相邻线路后备保护动作时,虽然有一端的 $\text{sub}\theta$ 矩阵首值为 1,但是仍可以判断出故障线路,且得到一端主保护不动作的结果。

当只有一端主保护动作时,另一端的 $\text{sub}\theta$ 矩阵首值为 1,其后备保护值也为 1,这时需先纠错。假设另一端主保护也动作,判断出故障区域,得到一端主保护和相邻线路保护拒动的结果。当两端主保护都动作,一端的后备保护也动作时,一端的 $\text{sub}\theta$ 矩阵除了首值为 0 还存在其他为 0 的情况,则说明存在误动情况,除结果矩阵首值外,其他为 0 的保护记为误动保护。当一端主保护动作,另一端后备保护动作时,一端的 $\text{sub}\theta$ 矩阵除了首值为 1,还存在其他为 1 的情况,则说明存在拒动情况,除结果矩阵首值外,其他为 1 的保护记为拒动保护。

采用上述方法不仅可以快速实现故障诊断,还可以判断保护和断路器的工作状况。本文 Petri 网诊断模型基于故障元件两端的保护信息构建,当两端保护都正确动作时,可以得到相应的故障元件。当一端主保护正确动作,另一端主保护存在误动或者

远端后备保护集中一个或全部发生错误时,可以利用纠错算法进行纠错,然后再进行分析诊断。对于保护和断路器不正常工作的故障情形,进行纠错以后,仍可以按照分层 Petri 网分析,确定故障区域。

1.3 时序信息的处理

当两端主保护动作,若仍有一端相邻线路后备保护动作时,保护和断路器动作判断算法会得到该后备保护误动结果。通常情况下,主保护动作时间超前于后备保护。因此,可以利用时序 Petri 网对含有时序关系的微电网保护动作加以限制。当一端主保护动作时,该端相邻线路后备保护不作用。文献[11]详细介绍了时序 Petri 网原理,如式(3)所示。

$$TPN = (\Sigma, \varphi) \quad (3)$$

式中: Σ 是一个原型 Petri 网; φ 是一组时序逻辑公式。若 $h, k \in \varphi$, 则 $\neg h, h \wedge k, h \vee k, h \Rightarrow k, \circ h, \square h, \diamond h$ 和 $h \cup k$ 也是逻辑公式。 $\neg, \wedge, \vee, \Rightarrow$ 均为布尔连接符, $\circ, \diamond, \square, \cup$ 均为公式符号,具体含义参见文献[12]。本文将上述原理应用到图 2 微电网结构,时序逻辑如式(4)。

$$s_1 \rightarrow \neg t_2 \text{ 或 } s_2 \rightarrow \neg t_5 \quad (4)$$

2 加权模糊 Petri 网的应用

以上方法虽然可以确定故障元件,但如果发生保护信息逻辑错误,诊断过程会出现漏诊情况。且只在判断变迁点火时,利用了保护信息,其他情况并没有充分利用保护信息。因此引用模糊推理理论^[12-14],充分利用保护信息计算故障元件发生的概率,方便操作人员理解故障结果。

2.1 加权模糊 Petri 网定义

模糊 Petri 网是一个六元组

$$\Sigma_F = (S, T; F, W, D, M_0) \quad (5)$$

Σ_F 的运算规则为对 $t \in T$, 如果 $\forall s \in \bullet t$, 有:

$$M(s) \cdot \omega(s, t) \geq D(t) \quad (6)$$

在上述模糊 Petri 网中,一个变迁 t 及其前后级 ($\bullet t$ 和 $t \bullet$) 中的各个库所,模拟一条模糊推理定则,其中 $\bullet t$ 库所代表前提条件, $t \bullet$ 库所代表推理结果。对 $s \in \bullet t$, $\omega(s, t)$ 表示条件 s 对推理成立的理论支持, $M(s)$ 表示条件 s 的可信度。这样, $M(s) \cdot \omega(s, t)$ 就表示条件 s 对推理的置信度。 $D(t)$ 表示推理 t 对各个前提条件的实际支持度的阈值。

加权模糊 Petri 网定义了“与”、“或”两种基本的产生式规则类型。不同规则类型的权值有不同约束。对于“与”规则类型,假设命题由 n 个前提命题组合而成,则权值可由式(7)确定。对于“或”规则类型,权值比较固定,一般为 1。

$$0 \leq \omega_i \leq 1 \text{ 且 } \sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \quad (7)$$

加权模糊 Petri 网的推理规则是置信度大于阈值时, 变迁点火。对于含有“与”逻辑关系的命题, 若 $\sum_{i=1}^n a_i \times \omega_i \geq \lambda_i$, 则变迁点火, 其库所置信度由式(8)得到

$$p_i = \begin{cases} \left(\sum_{i=1}^n a_i \times \omega_i \right) \times u_i & \sum_{i=1}^n a_i \times \omega_i \geq \lambda_i \\ 0 & \sum_{i=1}^n a_i \times \omega_i < \lambda_i \end{cases} \quad (8)$$

对于含有“或”逻辑关系的命题, 由于权值为 1, 其判断方法与模糊 Petri 网相同。

2.2 加权模糊 Petri 网故障诊断推理模型

对于本级线路保护, 其保护集只需考虑本级保护与断路器动作, 判断流程如图 3。图中 $p_i = (a_{cb} \cdot \omega_c + a_r \cdot \omega_r) \cdot u_i$ 。

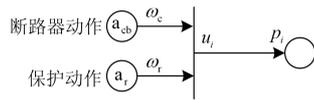


图 3 断路器与主保护统一考虑的推理模型

Fig. 3 Reasoning process with circuit breaker and main protection into consideration

对于远端后备保护, 由于保护集中需要考虑的元素通常不止一个, 在利用加权模糊 Petri 网分析时, 需要对每个元素按图 4 的建模过程, 再根据 \oplus 算子^[16]计算得到远端后备保护集的置信度 P 。其中上游后备保护集的置信度用 P_{up} 表示, 下游后备保护集的置信度用 P_{dn} 表示。具体推理过程由图 4 得到, 图中后备保护集 P 包含 i 个后备保护。

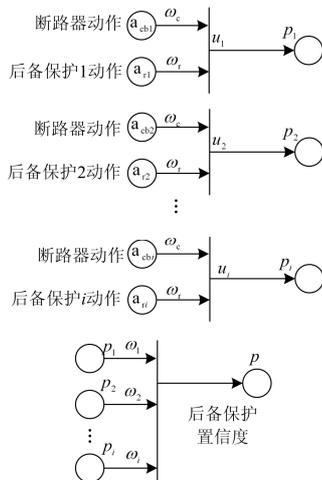


图 4 后备保护集的推理过程

Fig. 4 Backup protection set reasoning process

图中 $p_1 = (a_{cb1} \cdot \omega_c + a_{r1} \cdot \omega_r) \cdot u_1$, $p_2 = (a_{cb2} \cdot \omega_c + a_{r2} \cdot \omega_r) \cdot u_2$, $p_i = (a_{cbi} \cdot \omega_c + a_{ri} \cdot \omega_r) \cdot u_i$, $\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_i = 1$, $p = p_1 \cdot \omega_1 + p_2 \cdot \omega_2 + \dots + p_i \cdot \omega_i$ 。

2.3 权值的确定方法

在电网故障诊断中, 模糊 Petri 网模型的置信度、阈值都是固定的^[17], 权值一般是由专家经验确定, 缺乏学习能力。一旦模型建立, 其参数和结构就是固定的, 不能根据微网实际情况及知识的变化进行动态调整, 无法自动更新知识及规则, 缺乏智能性。本文应用离散细菌群体趋药性优化算法(BCC)自适应调整 Petri 网权值, 使模型推理更贴近微电网动态行为。

由于本文选用加权模糊 petri 网处理方法主要解决微网灵活多变的拓扑结构导致保护集各元素的权值调整。为此, 把保护和断路器条件发生的权值取固定的已知值, 从而保证权值寻优结果体现出微网拓扑结构的改变。由于一个元件故障必然会引发保护动作, 保护动作又引发断路器跳闸; 从复杂性和先决性来说保护动作环节更为重要, 参照文献[18]将保护动作权值设为 0.54, 断路器动作权值设为 0.46。在此基础上应用 BCC 智能算法优化其他权值。

BCC 算法是一种新的基于生物行为的全局寻优方法, 该方法采用细菌群体交互模式, 较一般方法收敛速度快, 并且可以自适应调整步长, 保证算法搜索精确度^[19]。为了增强 Petri 网系统的智能型, 利用 BCC 算法训练模糊 Petri 网的权值, 寻找最优权值。优化算法流程图如图 5 所示。

图 5 中种群初始化时, 要保证“与”规则类型的权值和为 1, 即满足式(9)的约束条件

$$\omega_n = 1 - \sum_{i=1}^{n-1} \omega_i \quad (9)$$

$$f = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m (p - p^j) \quad (10)$$

图 5 中的误差代函数可以由式(10)得到, 式中 P 是按照模糊 Petri 网计算法则, 利用理论值得到的终止库所故障置信度; P^j 为实际值下, 终止库所的故障置信度; m 为终止库所数。将误差逐层向输入层方向逆向传播, 使算法不断自适应修改 AFPN 网络的权值, 本文要求精度 f 小于 0.001。

对权值训练过程的验证, 可以由加权模糊 Petri 网结构展开, 假设理论值为 $\omega_1=0.3$, $\omega_2=0.35$, $\omega_3=0.35$, $\omega_4=1$, $\omega_5=1$, $\omega_6=0.32$, $\omega_7=0.68$ 。按照 BCC 算法进行智能搜索, 设置样本群数为 100, 搜索 100 次, 误差很小且稳定, 得到优化值为

$\omega_1=0.294$, $\omega_2=0.345$, $\omega_3=0.361$, $\omega_4=1$, $\omega_5=1$,
 $\omega_6=0.32$, $\omega_7=0.68$ 。

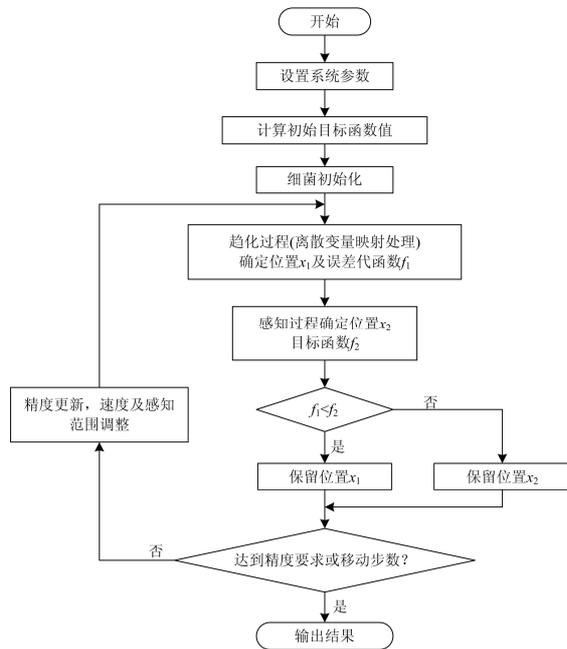


图 5 BCC 优化算法流程图

Fig. 5 BCC optimization algorithm flow chart

3 算例分析

在 Matlab/Simulink 环境下, 按照图 2 所示的微电网拓扑结构, 搭建仿真模型。图中微电网电压等级为 380 V, 含 5 条馈线, DG1~DG4 为容量 30 kW 的逆变器型分布式电源, 且 DG4 在某一时刻投切到 DG2 所连母线上。并网运行时采用恒功率控制, 孤岛运行时采用下垂控制。Load1~Load5 的容量分别为 30 kW、30 kW、30 kW、30 kW、40 kW; Line1~Line5 长度均 1 km, 阻抗为 $0.641+j0.101 \Omega$ 。根据系统采集到的保护动作信息, 得到如表 1 所示的故障诊断结果。

表 1 Petri 网诊断结果

Table 1 Petri net diagnosis

保护动作	其他	故障元件	置信度计算	结论
CB1.1 CB1.2	无	L ₁	0.833	主保护正确动作
CB1.1 CB1.3	无	L ₁	0.76	一端主保护不动作
CB2.1 CB2.2	无	L ₂	0.833	主保护正确动作
CB2.1 CB2.2	DG1 退出	L ₂	0.80	本级后备保护动作
CB2.1 CB2.2 CB3.2	无	L ₂	0.833	相邻后备保护误动作
CB2.1	无	L ₂	0.72	断路器 CB3.2 拒动
CB3.2 CB2.1	DG4 投入	L ₃	0.76	远端保护正确动作

表 1 中, 利用分层 Petri 网分析模型, 将诊断系统提供的保护信息作为初始标识, 在保护或断路器误动状态下, 终止库所故障置信度大于最小阈值 (0.6), 仍可以确定故障元件, 增强诊断系统的容错性。并且对微电网的灵活多变有较强的适应性。

4 结论

本文在传统 Petri 网结构基础上, 提出分层 Petri 网的建模思想, 将保护信息分层处理, 大大减少计算量。仿真结果表明该模型容错性强, 在保护和断路器的拒动、误动状态下仍可以准确确定故障元件, 对微电网的灵活多变有较强的适应性。并且将 IEC61850 通信结构与 Petri 网理论相结合, 保证了微电网线路在线实时的故障诊断。

参考文献

- [1] 高翔, 张沛超, 章坚民. 电网故障信息系统应用技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006: 27-35.
- [2] 薛浩然, 张珂珩, 李斌, 等. 基于布谷鸟算法和支持向量机的变压器故障诊断 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 8-13.
- [3] XUE Haoran, ZHANG Keheng, LI Bin, et al. Fault diagnosis of transformer based on the cuckoo search and support vector machine [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 8-13.
- [4] 赵伟, 白晓民, 丁剑, 等. 基于协同式专家系统及多智能体技术的电网故障诊断方法 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(20): 1-8.
- [5] ZHAO Wei, BAI Xiaomin, DING Jian, et al. A new fault diagnosis approach of power grid based on cooperative expert system and multi-agent technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(20): 1-8.
- [6] 毕天姝, 倪以信, 吴复立, 等. 基于新型神经网络的电网故障诊断方法 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 73-78.
- [7] BI Tianshu, NI Yixin, WU Fuli, et al. A novel neural network approach for fault section estimation [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(2): 73-78.
- [8] 蒋亚坤, 李文云, 赵莹, 等. 粗糙集与证据理论结合的电网运行优质性综合评价 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 1-7.
- [9] JIANG Yakun, LI Wenyun, ZHAO Ying, et al. Evaluation of power quality performance based on rough set and evidence theory [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 1-7.
- [10] 朱永利, 王艳, 耿兰芹, 等. 基于贝叶斯网络的电网故障诊断 [J]. 电网技术, 2007, 27(7): 33-37.
- [11] ZHU Yongli, WANG Yan, GENG Lanqin, et al. Bayesian

- networks based novel method for fault section estimation of power systems[J]. Power System Technology, 2007, 27(7): 33-37.
- [7] 蒋昌俊. Petri 网的行为理论及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 25-90.
- [8] 刘毅, 高振兴, 郭创新, 等. 一种考虑多层信息融合的电网故障诊断辅助决策方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 14-18.
LIU Yi, GAO Zhenxing, GUO Chuangxin, et al. An assistant decision-making for fault diagnosis based on multilayer information fusion[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 14-18.
- [9] 任惠, 米增强, 赵洪山, 等. 基于编码 Petri 网的电力系统故障诊断模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(20): 44-49.
REN Hui, MI Zengqiang, ZHAO Hongshan, et al. Power system fault diagnosis modeling techniques based on encoded Petri nets[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(20): 44-49.
- [10] 张建华, 黄伟. 微电网运行控制与保护技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 33-34.
- [11] 吴哲辉. Petri 网导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 10-55.
- [12] MANNER Z, PNUELI A. The temporal logic of reactive and concurrent system: specification[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1992.
- [13] 栗然, 仇晓龙. 基于模糊 Petri 网的网故障诊断改进方法[J]. 中国电力, 2008, 41(5): 50-54.
LI Ran, QIU Xiaolong. Improvement in fault diagnosis of transmission networks using fuzzy Petri net[J]. Electric Power, 2008, 41(5): 50-54.
- [14] 孙静, 秦世引, 宋永华. 模糊 Petri 网在电力系统故障诊断中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 74-79.
SUN Jing, QIN Shiyin, SONG Yonghua. Fuzzy Petri nets and its application in the fault diagnosis of electric power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 74-79.
- [15] 杨健维, 何正友. 基于时间约束 Petri 网的电网警报处理及故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 77-84.
YANG Jianwei, HE Zhengyou. Power systems alarm processing technology and fault diagnosis based on Petri nets with timing constraints[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 77-84.
- [16] 杨健维, 何正友. 基于时序模糊 Petri 网的电力系统故障诊断[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(15): 46-51.
YANG Jianwei, HE Zhengyou. Power system fault diagnosis approach based on time sequence fuzzy Petri net[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 2011, 35(15): 46-51.
- [17] CHOH J, PARK J K. An expert system for fault section diagnosis of power systems using fuzzy relations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(1): 342-348.
- [18] 谢红涛, 童晓阳. 基于分层模糊 Petri 网的电网故障综合诊断方法[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 246-252.
XIE Hongtao, TONG Xiaoyang. A method of synthetical fault diagnosis for power system based on fuzzy hierarchical Petri net[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 246-252.
- [19] MILLER S D, MARCHETTO J, AIRAGHI S, et al. Optimization based on bacterial chemotaxis[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(1): 16-19.

收稿日期: 2015-08-14

作者简介:

刘科学(1978-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为分布式光伏并网及其电能质量; E-mail: qhdliukexue@aliyun.com

宣文华(1977-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为分布式光伏并网及其电能质量; E-mail: xuan.wenhua@nc.sgcc.com.cn

魏少鹏(1986-), 男, 工程师, 主要从事电子式互感器的研发工作。

(编辑 张爱琴)