

基于编码 PETRI 网的电力系统故障诊断模型研究

任 惠, 米增强, 赵洪山

(华北电力大学电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 河北省 保定市 071003)

POWER SYSTEM FAULT DIAGNOSIS MODELING TECHNIQUES BASED ON ENCODED PETRI NETS

REN Hui, MI Zeng-qiang, ZHAO Hong-shan

(Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control under Ministry of Education, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China)

ABSTRACT: In this paper, using Petri Nets and coding theory to perform fault diagnosis in power system is further studied. Previous research work is briefly reviewed, including embedded Petri nets, Petri net's fault models and the construction of the generator matrix according to Vander monde matrix. Characteristics of Petri Nets model in power system fault diagnosis and identification are demonstrated in detail, which mainly are standard matrices of the Petri nets models of busbar and transmission line and the Petri Nets model is not affected by the scale of power networks, especially a fast model revision algorithm of power components, that is the fast revision of the standard matrices, is proposed, which make the scheme more applicable to large-scale power network. The method is tested in the IEEE 118-bus power system and simulation results show that the suggested approach is accurate as combined with error correction theory, model revision is easy, fast in the case of power network expansion or topology change, which significantly improves the application potential of Encoded Petri Nets method in real power system.

KEY WORDS: Power system; Large-scale power networks fault diagnosis; Coding theory; Embedded Petri nets; Generator matrix; Topology; Model revision algorithm

摘要: 文中对基于编码原理和 Petri 网建模方法的电力系统故障诊断进行了进一步的研究, 介绍了冗余嵌入 Petri 网、Petri 网的故障模型及根据范德蒙矩阵构造生成矩阵的方法; 重点分析了电力系统元件故障诊断 Petri 网模型的特点: 母线及线路的 Petri 网模型的标准型与电网规模无关等; 提出了电网拓扑结构发生变化时模型的快速修正方法, 即根据模型标准型进行添加或删减, 以使该方法更加适应大型电网多变的运行方式。以 IEEE-118 母线系统为例验证了故障诊断的正确性和模型修正方法的快速性。最后, 经对文中方法和文献中的另外 2 种方法进行比较, 证明文中方法具有诊断速

度快, 精度高, 具有电网拓扑结构变化能力, 适用于大型电网故障诊断。

关键词: 电力系统; 大型电网故障诊断; 编码原理; 冗余嵌入 Petri 网; 生成矩阵; 拓扑结构; 模型快速修正

1 引言

在电力系统发生事故的情况下, 正确而快速地故障诊断对电力系统的迅速恢复供电具有重要的意义。国内外在电力系统故障诊断方面已提出了多种方法: 如专家系统^[1-2]、模糊理论^[3-5]、人工神经网络^[5-8]和遗传算法^[9-13]等。这些方法各有优劣, 例如专家系统能够利用专家的经验有效地处理启发式知识, 但维护比较困难, 推理速度也不够快; 神经网络方法适用于那些难于描述故障类型与故障信号之间的逻辑关系而又缺乏专家经验的场合(如变压器故障诊断), 但在电网故障诊断方面, 其仅能用于具有固定接线方式的小规模电网, 文献[13]提出的分布处理技术虽能用于大规模电网, 但电网拓扑结构变化后仍需要重新训练。这些不足使其不能很好地适应未来电力系统运行和发展的要求。

近年来, 国内外学者将多种智能技术进行组合互补^[14-17], 提出了很多将其他领域知识用于电力系统故障诊断研究方面的方法, 例如: 信息理论^[18], Petri 网建模技术^[14-15, 19-22]等。文献[19-20]充分利用了 Petri 网图形化建模和快速状态转换(简单的矩阵运算)的优点, 将 Petri 网建模技术应用于变压器故障诊断。文献[14]在变电站故障诊断中, 通过建立故障点保护配合的 Petri 网模型, 利用该模型的状态转移方程获取所有的故障群及征兆群对子, 进而利

用遗传算法求得具有较高适应度的候选诊断解。文献[21]在电网故障推理知识基础上,给出了故障诊断的模糊 Petri 网模型,并通过对一局部电网进行故障诊断,验证了方法的有效性,但文中未就电网拓扑改变对模型的影响进行论述。文献[15]结合粗糙集理论与模糊 Petri 网络方法,利用粗糙集信息表简化技术获得最小诊断规则,同时利用模糊 Petri 网络实现并行模糊推理。文献[22]提出将母线或线路以及与其相关的保护和断路器通过 Petri 网进行建模,描述各级、各类保护系统对故障反应,并有选择地切除故障的过程,并利用前向,后向 Petri 网和特定推理规则进行诊断;文献[23]在利用文献[22]建模方法的同时,进一步结合冗余编码原理,采用冗余嵌入 Petri 网方法对一条简单的电力传输线进行了故障诊断;文献[24-25]将这一方法用于变电站的故障诊断。这一方法在实时故障诊断中仅用到简单的矩阵计算,不需要在庞大的解空间中寻找最优解,诊断速度快,结合冗余编码理论,保证诊断精度,然而其映射方法并不适用于所有故障类型,且未给出生成矩阵的构造方法;文献[26]结合离散事件动态系统的故障诊断方法,对一条电力传输线的故障类型进行进一步分析和重新映射,着重给出了对该 Petri 网模型进行编码即系统构造生成矩阵 C 阵的方法。

本文在文献[26-27]的基础上重点分析了故障诊断 Petri 网模型的特征,讨论了该模型在电网拓扑结构变化时的适应能力,并提出了网络拓扑结构变化时模型的快速修正方法,对基于 Petri 网的电网故障诊断进行了进一步完善。

2 编码 Petri 网的数学描述

2.1 Petri 网定义

定义^[28]: 一个 Petri 网的结构 P_N 是一个五元组, $P_N = (P, T, F, W, M_0)$ 。 $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\} (n \geq 1)$, 是库所节点的有限集合; $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\} (m \geq 1)$, 是变迁节点的有限集合; $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$, 表示库所到变迁和变迁到库所的有向弧; $W: F \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$, 表示有向弧的权重函数; $M_0: P \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$, 表示库所中的初始托肯。

变迁事件的触发导致托肯在系统中的重新分配。对于给定的 Petri 网 S , 此动态过程可由状态变化方程描述为

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_s(k+1) &= \mathbf{q}_s(k) + \mathbf{B}^+ \mathbf{x}(k) - \mathbf{B}^- \mathbf{x}(k) = \\ & \mathbf{q}_s(k) + \mathbf{B} \mathbf{x}(k) \end{aligned}$$

式中 $\mathbf{B} = (\mathbf{B}^+ - \mathbf{B}^-)$, 为 $n \times m$ 矩阵, 表明 Petri 网的结构, 称为关联矩阵; $\mathbf{q}_s(k) = [p_1, p_2, \dots, p_n]^T$, 表明时刻 k 各库所的托肯分布; $\mathbf{x}(k) = [t_1, t_2, \dots, t_m]^T$, 表明变迁的触发状态。

2.2 冗余嵌入 Petri 网的数学描述

为了对 Petri 网状态进行监督, 可对给定 Petri 网添加冗余库所, 构成一个冗余嵌入 Petri 网, 记作 H , 其状态向量 $\mathbf{q}_h(k)$ 为 $n+d$ 维向量, 对所有时刻, 原 Petri 网 S 和冗余嵌入 Petri 网 H 之间满足下述关系^[23-24]:

$$\mathbf{q}_h(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_n \\ \mathbf{C} \end{bmatrix} \mathbf{q}_s(k)$$

式中 $\mathbf{q}_s(k)$ 为原 Petri 网 S 的状态向量; \mathbf{I}_n 为 $n \times n$ 单位矩阵; \mathbf{C} 为 $d \times n$ 的整数矩阵, 称为生成矩阵。 H 中的 d 个冗余库所构成对 S 的监督 Petri 网。

2.3 Petri 网故障模型

对于 Petri 网 H 可以抽象出 2 种故障模型^[29], 变迁故障和库所故障, 以作为故障容错分析的基础。库所故障即故障导致某一库所中托肯数目发生变化。本文讨论的故障诊断即基于库所故障的辨识。

在时间段 $[1, N]$ 内, 库所故障可由下述模型表示

$$\mathbf{q}_f(N) = \mathbf{q}_h(N) + \mathbf{e}_p$$

式中 向量 \mathbf{e}_p 为错误图样; $e_p[i]$ 为第 i 个库所中托肯数目的变化; 下标 f 表示 Petri 网 H 的错误库所状态; 下标 h 表示正确的库所状态。

参照编码理论, 可通过下式计算某一时刻库所状态 $\mathbf{q}_f(N)$ 的错误伴随式:

$$\mathbf{s}(N) = \mathbf{P} \mathbf{q}_f(N) = [-\mathbf{C} \quad \mathbf{I}_d]$$

$$(\mathbf{q}_h(N) + \mathbf{e}_p) = -\mathbf{C} \times \mathbf{e}_p$$

式中 \mathbf{C} 为选择的生成矩阵, 当生成矩阵的各列线性不相关时, 对于任一不同形式的 \mathbf{e}_p , $\mathbf{C} \times \mathbf{e}_p$ 的结果唯一。因此可以根据错误伴随式的形式判断出故障的库所, 以实现多个库所故障的辨识。

参照编码理论^[30], 如下形式的范德蒙矩阵 \mathbf{V} 的各列满足线性不相关的要求:

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ x_0 & x_1 & x_2 & \dots & x_{n-1} \\ x_0^2 & x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_{n-1}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_0^{n-1} & x_1^{n-1} & x_2^{n-1} & \dots & x_{n-1}^{n-1} \end{bmatrix}。$$

因此可选择具有如下形式的生成矩阵 C :

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 2 & 3 & \dots & n \\ 1 & 2^2 & 3^2 & \dots & n^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 2^{k-1} & 3^{k-1} & \dots & n^{k-1} \end{bmatrix}$$

式中 k 为监督库所个数, n 为原 Petri 网库所数目。

3 故障诊断 Petri 网模型的快速修正

3.1 概述

大型电网的运行方式较复杂, 对其故障诊断需要解决的一个主要问题就是系统拓扑结构变化时诊断模型的修正问题。本文以电力系统元件(以下称为候选元件)为对象建立其 Petri 网模型。图 1 为某局部电网及其 Petri 网模型, 建模方法见文献[27]。

3.2 模型特点

(1) 候选元件如果为线路, 则分别以线路两端为对象各建立一个 Petri 网模型; 候选元件如果为母线或变压器, 则因母线或变压器的主保护动作时, 需要跳开多个断路器以切除该元件, 每一个断路器均可能拒动而导致故障的蔓延, 所以应针对每一个故障蔓延方向建立一个 Petri 网模型。

(2) 候选元件的每个 Petri 网模型中的库所向量和变迁向量的元素排列顺序如下:

1) 库所包括:

[元件, 主保护, 后备保护(数目 ≥ 1), 元件断路器, 关联断路器(数目 ≥ 1)]^T。

2) 变迁包括:

[故障, 主保护动作, 后备保护动作(数目 ≥ 1)]^T。在库所向量中, 后备保护和关联断路器的数目取决于后备保护及其所控制断路器的数目。以线路为例, 当线路发生故障时, 对于线路的某一端而言, 与该端连入同一母线的线路的数目即为后备保护和关联断路器的数目。在变迁向量中, 后备保护动作变迁的数目由后备保护的个数决定。每个故障诊断 Petri 模型的建立只涉及到上述局部信息, 与电网的规模无关。

(3) 如果候选元件的主保护和近后备保护(第一后备)控制同一断路器(如 220kV 及以上线路, 配备 2 套速动保护, 互为备用, 均动作于切除该线路), 则在模型中, 这些保护由同一主保护库所表示, 保护的动作用由同一个变迁表示。

(4) 标准型的选择。本文建模时, 采用下述保

护的配置原则: 母线由失灵保护作为近后备, 而相连线路保护作为远后备; 线路由上一级线路作为后备。建立标准型时, 母线(或变压器)的标准型中应考虑该母线、与其相连的一条线路以及所涉及的保护和断路器; 线路的标准型中应考虑该线路、2 条上一级线路以及所涉及的保护和断路器。在此仅给出母线(或变压器)和线路标准型的关联矩阵 B_{st} 和 B_{stL} 如下:

$$B_{st} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad B_{stL} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。$$

(5) Petri 网模型仅利用保护继电器和断路器的离散事件信息建模, 在某些故障情况下, 所考虑的信息量是不全面的。例如连接于某一母线同一侧的多条线路, 如果其中之一发生故障, 当由失灵保护或作为远后备的上一级线路保护动作切除故障时, 仅根据离散信息只能诊断出连于该母线的某条线路发生故障, 却不能确定是哪一条线路发生故障。在这种情况下, 可利用连续量信息(如线路电流), 对诊断结果进行校核。

3.3 故障诊断模型快速修正方法

对于不同元件(或同一元件在不同运行方式下), 其保护系统中只有后备保护及所控制断路器的数目会发生变化, 库所和变迁之间的连接方式不变。所以发生变化时, 只需要根据这一连接关系在模型中进行添加或删除即可, 这一变化是有规律可循的。

以图 1 所示线路为例, 其接线方式对应的 Petri 网模型即为标准型, 电网拓扑结构变化后故障诊断模型将在此基础上进行修正。标准型的关联矩阵为 B_{stL} , 行元素对应变迁 f_{ab} , t_{b1} , t_{b2} , t_{b3} 状态; 列元素对应库所 L_{ab} , R_{b1} , R_{b2} , R_{b3} , CB_{b1} , CB_{b2} , CB_{b3} 状态。如果系统运行方式发生变化, 例如图 1 中 CB_{b3} 所在线路退出运行, 在模型中应该去掉变迁 t_{b3} 、库

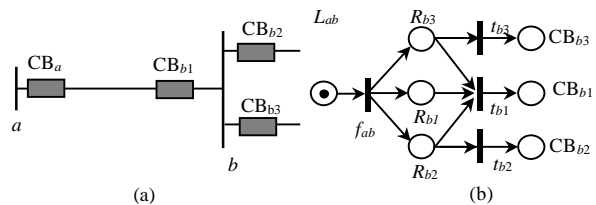


图 1 线路 L_{ab} 及其 Petri 网模型
Fig. 1 Transmission line L_{ab} and its Petri net model

表1给出了本文方法和其他方法在计算量、精度、响应速度及拓扑变化适应等方面的比较结果。

表1 本文方法与其他方法的比较
Tab. 1 Comparison results among various methods

比较项目	本文方法	文献[23-24]方法	文献[13]方法
计算量	简单的矩阵运算, 只需要局部信息	简单的矩阵运算, 只需要局部信息	取决于神经网络的输入、输出及中间神经元的数目, 需要所涉及的区域电网的全部信息
精度	对于文献[27]列出的所有故障均能正确诊断。	对某些故障不能正确诊断; 未给出生成多项式的构造方法。	取决于训练样本集的完备性。
响应速度	收到第一个信息时, 诊断即启动。	收到第一个信息时, 诊断即启动。	当神经网络涉及的所有保护动作信息和断路器动作信息均得到后才开始诊断。
拓扑变化能力	快速, 只需要简单的矩阵计算	未给出	需要重新训练

线路的标准型为 B_{stL} 。 L_7 恢复运行, 则保护 L_{10} 的后备保护数目增加 1, 此时可按照第 3.3 节给出的快速方法进行修正。修正后的模型关联矩阵为

$$B_{L10} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。$$

5 结论

本文对离散事件动态系统的故障诊断方法在电力系统中的应用进行了进一步的研究。文中着重对电力系统故障诊断的 Petri 网模型进行了分析, 给出了模型的特点, 提出了电网拓扑结构变化时模型的快速修正方法。在文献[26]的基础上, 进一步完善了这一故障诊断方法。该方法具有诊断速度快、精度高及电网拓扑变化能力, 适用于大型电网的故障诊断, 具有重要的应用价值。

参考文献

- [1] 刘青松, 夏道止. 基于正反向推理的电力系统故障诊断专家系统[J]. 电网技术, 1999, 23(9): 66-68, 71.
Liu Qingsong, Xia Daozhi. Expert system of power system fault diagnosis based on forward and backward Reasoning[J]. Power System Technology, 1999, 23(9): 66-68, 71.
- [2] 余涛, 王晶, 高峰, 等. 水电机组故障诊断的集成知识表示与推理[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(4): 68-71, 86.
Yu Tao, Wang Jing, Gao Feng *et al.* A metasynthesizing method of knowledge representation and reasoning of fault diagnosis for hydroelectric set[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(4): 68-71, 86.
- [3] 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.
- [4] 杨莉, 尚勇, 周跃峰, 等. 基于概率推理和模糊数学的变压器综合故障诊断模型[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(7): 19-23.
Yang Li, Shang Yong, Zhou Yuefeng *et al.* Probability reasoning and fuzzy technique applied for identifying power transformer malfunction[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(7): 19-23.
- [5] 马良玉, 王兵树, 佟振声, 等. 对分式凝汽器故障诊断的模糊式识别及神经网络方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 68-73, 78.
Ma Liangyu, Wang Bingshu, Tong Zhensheng *et al.* Fuzzy pattern recognition and artificial neural network used for fault diagnosis of the double-channel condenser[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 68-73, 78.
- [6] 胡晓光, 齐明, 纪延超, 等. 基于径向基函数网络的高压断路器在线监测和故障诊断[J]. 电网技术, 2001, 25(8): 41-44.
Hu Xiaoguang, Qi ming, Ji Yanchao *et al.* On-line monitoring and fault diagnosis of high voltage circuit breakers based on radial basis function networks[J]. Power System Technology, 2001, 25(8): 41-44.
- [7] 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.
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] 凌维业, 贾民平, 许飞云, 等. 粗糙集神经网络故障诊断系统的优化方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 98-102.
Ling Weiye, Jia Minping, Xu Yunfei *et al.* Optimizing strategy on rough set neural network fault diagnosis system[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 98-102.
- [9] 邓宏贵, 罗安, 曹建, 等. 基因多点交叉遗传算法在变压器故障诊断中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(24): 1-4.
Deng Honggui, Luo An, Cao Jian *et al.* Application of multi-point criss-cross genetic algorithm in transformer fault diagnosis[J]. Power System Technology, 2004, 28(24): 1-4.
- [10] 王少芳, 蔡金锭, 刘庆珍. 基于改进 GA-BP 混合算法的电力变压器故障诊断[J]. 电网技术, 2004, 28(2): 30-33.
Wang Shaofang, Cai Jinding, Liu Qingzhen. Power transformer fault diagnosis by improved hybrid algorithm based on genetic algorithm

- and back propagation algorithm[J]. Power System Technology, 2004, 28(2): 30-33.
- [11] 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.
- [12] 张建华, 侯国莲, 张巍, 等. 一种基于模糊规则和遗传算法的凝汽器故障诊断方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 205-209.
Zhang Jianhua, Hou Guolian, Zhang Wei *et al.* A research on fuzzy rules and genetic algorithm based method for a condenser fault diagnosis[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 205-209.
- [13] 毕天姝, 严正, 文福栓, 等. 基于径向基函数神经网络的在线分布式故障诊断系统[J]. 电网技术, 2001, 25(11): 27-32, 37.
Bi Tianshu, Yan Zheng, Wen Fushuan *et al.* On-line fault section estimation in power systems with radial basis function neural network [J]. Power System Technology, 2001, 25(11): 27-32, 37.
- [14] 张炳达, 马忠坤, 陈伟乐, 等. 基于故障群组合优化的变电站故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 135-139.
Zhang Bingda, Ma Zhongkun, Chen Weile *et al.* The fault diagnosis for substation based on optimizing the combination of fault-masses [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 135-139.
- [15] 王楠, 律方程, 刘云鹏, 等. 基于粗糙集理论与模糊 Petri 网络的油浸电力变压器综合故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 127-132.
Wang Nan, Lu Fangcheng, Liu Yunpeng *et al.* Synthetic fault diagnosis of oil-immersed power transformer based on rough set theory and fuzzy petri nets[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 127-132.
- [16] 孙伟, 李林川, 卢庆聪, 等. 基于停电区域的电力系统故障诊断的一种新模型[J]. 电网技术, 2004, 28(5): 30-34.
Sun Wei, Li Linchuan, Lu Qingcong *et al.* A new method for power system fault diagnosis based on power supply interrupted region [J]. Power system Technology, 2004, 28(5): 30-34.
- [17] 杜一, 张沛超, 郁惟镛. 基于事例和规则混合推理的变电站故障诊断系统[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 34-37.
Du Yi, Zhang Peichao, Yu Weiyong. A substation fault diagnosis system based on case-based reasoning and rule-based reasoning [J]. Power System Technology, 2004, 28(1): 34-37.
- [18] 汤磊, 孙宏斌, 张伯明, 等. 基于信息理论的电力系统在线故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 5-11.
Tang Lei, Sun Hongbin, Zhang Boming *et al.* Online fault diagnosis for power system based on information theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 5-11.
- [19] 王建元, 纪延超. Petri 网络在变压器故障诊断中的应用[J]. 电网技术, 2002, 26(8): 21-24.
Wang Jianyuan, Ji Yanchao. Application of petri nets in transformer fault diagnosis[J]. Power System Technology, 2002, 26(8): 21-24.
- [20] 王建元, 纪延超. 模糊 Petri 网络知识表示方法及其在变压器故障诊断中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 121-125.
Wang Jianyuan, Ji Yanchao. Application of fuzzy petri nets knowledge representation in electric power transformer fault diagnosis [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 121-125.
- [21] 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.
- [22] Lo K L, Ng H S, Grant D M *et al.* Extended petri net models for fault diagnosis for substation automation[J]. IEE Proc. Gener. Transm. Distrib, 1999, 146(3): 229-234.
- [23] Hadjicostis C N, Verghese G C. Monitoring discrete event systems using Petri net embeddings[Z]. Application and Theory of Petri Nets 1999 (Series Lecture Notes in Computer Science, vol. 1639). 1999: 188-207.
- [24] Hadjicostis C N, Verghese G C. Power system monitoring using petri net embeddings[J]. IEE Proc. C. Generation, Transmission and Distribution, 2000, 147(9): 299-303.
- [25] 赵洪山, 米增强, 杨奇逊. 基于冗余嵌入 Petri 网的变电站故障诊断[J]. 电力系统自动化, 2001, 26(4): 32-35.
Zhao Hongshan, Mi Zengqiang, Yang Qixun. Substation fault diagnosis based on petri nets embedding[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 26(4): 32-35.
- [26] Ren Hui, Mi Zengqiang, Zhao Hongshan *et al.* Fault diagnosis for substation automation based on petri nets and coding theory[C]. IEEE PES 2004 General Meeting, Denver, 2004.
- [27] 任惠, 赵洪山, 米增强, 等. 基于编码 Petri 网的电网故障诊断[J]. 电网技术, 2004, 28(5): 64-68.
Ren Hui, Zhao Hongshan, Mi Zengqiang *et al.* Power system fault diagnosis by use of encoded petri net models[J]. Power System Technology, 2004, 28(5): 64-68.
- [28] Tadao Murata. Petri Nets: Properties, analysis and applications [J]. Proceedings of the IEEE, 1989, 77(4): 541-580.
- [29] Yingquan Wu, Hadjicostis C N. Non-concurrent fault identification in discrete event system using encoded petri net states. [EB/OL]. Available: <http://decision.csl.uiuc.edu/~chadjic/papers/paperindex.html>.
- [30] 张鸣瑞, 邹世开. 编码理论[M]. 北京: 航空航天大学出版社, 1999.
- [31] Ren Hui, Mi Zengqiang, Diao Jinfeng *et al.* A novel power system fdi scheme based on petri nets and coding theory[C]. PowerCON2004, Singapore, 2004.

收稿日期: 2005-09-13。

作者简介:

任 惠 (1973-), 女, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为电力系统运动和电力系统离散事件动态性能分析;

米增强 (1960-), 男, 教授, 主要研究方向为电力系统自动化以及电力系统混杂控制研究;

赵洪山 (1965-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统混杂控制和广域电力系统电压稳定预警理论。