

# 基于设备故障假设和分层流模型的电网智能报警方法研究

袁鹏<sup>1</sup>, 杨红旗<sup>1</sup>, 马韬韬<sup>2</sup>, 田春笋<sup>1</sup>

(1. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 河南 郑州 450000;

2. 上海电力公司青浦供电公司, 上海 201700)

**摘要:** 电网非正常运行情况下在短时间内会产生大量的报警信息, 快速、准确、全面地对这些信息进行处理对调度员辅助决策具有重要意义。设备故障是引起电网扰动或故障的根本原因, 基于此, 提出一种新的智能报警方法。首先对设备进行状态评估, 通过计算历史运行风险、评价健康状态, 获取合理排序的假设故障设备集合。然后, 建立电网的MFM模型, 用该模型进行假设验证, 通过比较相似度得到判断结果。最后通过 IEEE 标准 9 节点系统的仿真模拟, 初步验证了该方法的准确性和时效性, 为工程中的实际应用提供了良好借鉴。

**关键词:** 设备状态评估; 故障假设; 多级流模型 (MFM); 判断逻辑; 相似度

## An intelligent alarm method based on equipment fault hypothesis and MFM

YUAN Peng<sup>1</sup>, YANG Hong-qi<sup>1</sup>, MA Tao-tao<sup>2</sup>, TIAN Chun-zheng<sup>1</sup>

(1. Henan Electric Power Company Economic Research Institute, Zhengzhou 450000, China;

2. Qingpu Power Supply Company, Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 201700, China)

**Abstract:** When power system operates under abnormal conditions, a large number of alarms will be received by EMS. A fast, correct and comprehensive alarm-processing system is of great importance to help the operators make necessary decisions. Equipment fault is the essential course of power system disturbance and fault. Based on this, this paper brings up a new smart alarm method. First, equipment status evaluation is done online. Thus, fault hypothesis set is obtained by calculating equipment history operation risk and judging health status. Then, all the hypothesis is checked by multi-level flow model (MFM) which has been built before. The final answer comes out after comparing similarities between the hypothesis and the fact. Simulation results of the standard IEEE 9-bus system shows that the proposed method is doing well in both accuracy and speed and has bright future prospect in the alarm-processing field.

**Key words:** equipment status evaluation; fault hypothesis; MFM; judgement logic; similarity

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)04-0092-06

## 0 引言

电网发生故障或非正常运行时, 调度中心能量管理系统(Energy Management System, EMS)会在很短的时间内连续接收到大量报警信息, 包括电压越限、潮流越限、继电保护装置动作、开关跳闸、重合闸、通信错误等各种警报。与此同时, 随着电力系统的发展, 各种新型智能电力设备相继投入使用, EMS 接收到的警报呈现越来越多的趋势, 另一方面, 电网属于超级复杂动力系统, 任何结构、设备的少许变动都会影响报警数量和时序, 这些都给调度员分析警报、判断故障极大地增加了难度。如何高速、有效地处理海量报警信息, 为调度运行人员

提供科学合理的辅助决策, 是电力领域研究的重点问题之一。

目前国内外研究比较成熟的智能报警方法包括专家系统、人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)、基于模糊概率推理、基于 Petri 网等<sup>[1-8]</sup>, 这些可以统一归类为基于规则类的方法, 这种方法的缺点是完备性较差, 无法应对电网的各种复杂情况, 建立规则的源数据通常也很难获取。瑞士的 Larsson 博士在解决这一问题时, 提出应用多级流模型 (MFM) 方法<sup>[9-11]</sup>, 并在 2008 年与瑞士电力公司合作, 在实际电网中实现了它的部分应用, 取得了一定的成果, 但同时也存在较多的问题, 如灵活性不高、无法进行高效信息融合等。

本文认为, 设备故障是引起电网扰动或故障的根本原因, 设备在运行过程中会因为各种原因, 如历史故障、超负荷、自然灾害、人为误操作等, 积累起较高的运行风险。当风险超过阈值时, 设备随时都可能停运, 继而引起一连串的电网报警。因此, 准确判断设备的状态, 有效地利用设备的风险信息, 会大大提高电网报警和故障诊断的效率。

在大量阅读文献和参考前人积累的基础上, 本文提出了一种新的智能报警方法, 首先, 通过对电网设备进行状态评估, 按照运行风险大小排序, 建立假设故障设备集合, 其次, 应用电网 MFM 模型, 对假设故障集合分别进行验证, 判断出源警报和故障源; 最后, 本文通过一个简单算例进行仿真, 验证了该方法的优越性。

## 1 设备状态评估

电网设备的运行状态决定了其是否可以持续正常运行, 因此, 设备状态评估是设备故障假设的基础, 目前已经广泛开展了发电机组、变压器、继电保护装置等设备的状态评估研究。电网实际运行经验表明, 历史故障次数越多、当前设备健康状态越差的设备发生故障的可能性越大, 因此, 本文主要从历史运行风险和健康状态评价两个方面来进行设备的状态评估, 这是一种相对简易的评估方法, 主要是为了在保证准确率的同时兼顾时效性, 以更快的速度为智能报警处理提供源数据。

### 1.1 历史运行风险

设备的历史运行风险是由设备的故障历史记录得到的, 最终结果以分数表示, 主要用以下几个指标来描述:

总故障次数  $N_{all}$ , 指设备投入运行以来发生故障情况的总次数。

近周故障次数  $N_w$ , 指到当前为止一周内设备发生故障的次数。

近月故障次数  $N_m$ , 指到当前为止一个月内设备发生故障的次数。

近半年故障次数  $N_{hy}$ , 指到当前为止半年内设备发生故障的次数。

故障严重度  $S$ , 指每次设备故障对电网运行造成的危害程度, 分为重大、严重、有害、普通四个等级, 相应的扣分值分别为 4、3、2、1。

设备历史风险计算方法为

$$Risk = \sum_{i=1}^{N_w} S(i) \quad (1)$$

其中, 当  $Risk$  结果相同时, 取  $N_m$  值较大的设备  $Risk$

为高; 当  $Risk$ 、 $N_m$  结果均相同时, 取  $N_{hy}$  值较大的设备  $Risk$  为高; 当  $Risk$ 、 $N_m$ 、 $N_{hy}$  结果均相同时, 取  $N_{all}$  值较大的设备  $Risk$  为高。

### 1.2 设备健康状态评价

设备健康状态评价主要是通过电力系统在线监测实现的, 通过采集全面的特征量数据, 结合离线预防性试验的数据结果, 对设备的健康状态进行在线评价。

具体评价方法是: 整体评价结果由各组成部件分别评价的结果综合而得, 分为 I 正常、II 注意、III 异常、IV 严重四个标准。当所有部件评价均为正常状态时, 设备整体评价为正常状态, 当任一部件评价为非正常状态时, 设备整体评价为最严重状态。

设备健康状态的最终评价结果是以分数来表示的, 首先根据各部件的状态评价结果进行扣分, 然后根据各部件的权重, 通过加权的方式计算设备整体的扣分, 从而确定设备状态所处的等级。

设备健康状态评价标准示例如表 1 所示。

表 1 设备健康状态评价标准示例

Table 1 Equipment health status evaluation standard

	正常		注意		异常	严重	权重
	合计	单项	合计	单项	单项	单项	
部件 1	≤30	≤10	>30	12~20	24	≥30	0.1
部件 2	≤20	≤10	>20	12~20	24	≥30	0.2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

设备健康状态评价扣分计算方法为

$$Health = \sum \text{各部件扣分} \times \text{权重} \quad (2)$$

### 1.3 故障假设

电力系统在运行中会随着各种复杂情况改变运行方式, 不同运行方式会对设备造成不同程度的影响, 从而对设备的运行状况产生直接影响, 改变了设备的假设故障概率, 因此, 在计算中应综合考虑运行方式的影响。

本文假设故障区域内所有设备都存在故障可能性, 因此, 对所有设备进行状态评估, 分别计算其历史运行风险值和设备健康状态值, 并按照数值大小进行排序, 得出设备的相应序列号  $N_i(risk)$  和  $N_i(health)$ , 然后通过加权获得最终结果为

$$N_{kfh} = \alpha N_i(risk) + \beta N_i(health) \quad (3)$$

电网实际运行经验表明, 健康状态差的设备比历史运行风险高的设备更容易发生故障, 综合考虑运行方式的影响, 本文取  $\alpha$ 、 $\beta$  分别为 0.75、0.25。计算出各设备的  $N_{kfh}$  后, 按照数值大小排序, 组成

假设故障集合。

设备状态评估是在线实时进行的，各设备的 *Risk* 和 *Health* 值都在实时更新变化，又因故障区域不同、故障假设集不同， $N_i(risk)$ 和  $N_j(health)$ 也都随故障情况而定，因此，各种故障下的假设故障集合是在动态变化的。

## 2 MFM 方法

### 2.1 基本概念

多级流模型(Multilevel Flow Models, MFM)是一种从系统层面出发的层次化建模方法，它通过使用一套特定的图形符号来描述系统过程的目标、功能和设备单元，将真实的复杂工业系统抽象为物质流 (mass flow)、能量流 (energy flow)、信息流 (information flow) 三种流结构，从而建立起系统的生产过程模型<sup>[12-15]</sup>。其基本概念如下：

(1) 目标 (goal): 描述系统或子系统的用途，可以是生产目标、安全目标、经济目标或者环保目标等。目标之间有优先级的差异时，可以用子目标来表示相应的层次关系。

(2) 功能 (function): 以物质流、能量流、信息流的形式描述系统的性能，根据完成目标方式可分为源头 (source)、传递 (transport)、存储 (storage)、平衡 (balance)、栅栏 (barrier)、吸收 (sink) 等，信息流还包括观测者、决策者、执行者等功能。功能相互连接后组成网络 (network)，网络通过特定关系跟目标关联。

(3) 物理元件 (physical component): 组成系统的实体要素，用来实现各种功能。

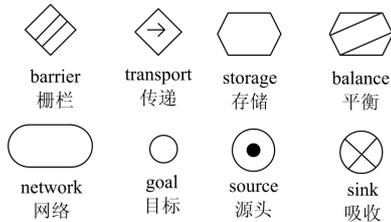


图 1 MFM 模型的基本 (functions) 符号

Fig. 1 Basic symbols of MFM model

MFM的目标、功能、物理单元通过严格的逻辑关系联系在一起，既能描述目标与实现目标的功能之间的关系，又能描述功能与为完成功能提供条件的子目标之间的关系，三者之间是多对多的映射关系，如图 2 所示。

MFM 方法通过目标与功能的描述使诊断任务规划和知识表示的结合更加紧密，高级别的抽象化会使知识获取、知识工程化和知识库验证支持更加

简单，同时图形化表示更方便知识库的概览和相容，拥有更好的实时属性，如最恶劣状况计时、低内存要求和高效率等，因此，相比其他方法具有较大的优势。

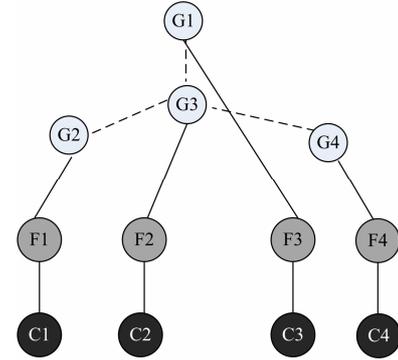


图 2 MFM 目标、功能、物理元件的层次关系

Fig. 2 Hierarchical relation among goal, function and physical component

### 2.2 电网 MFM 建模

电网是由发电设备、输电设备、用电设备等基本单元组成的，根据 MFM 的基本概念，将电网抽象成一个大系统，则其目标可以概括为

- G1: 产生电能;
- G2: 汇合、分配电能;
- G3: 传输电能;
- G4: 消耗电能。

相应地，系统的功能包括

- F1: 发电;
- F2: 分汇电能;
- F3: 输电;
- F4: 用电。

实现系统功能的物理元件有: C1: 发电机, C2: 母线, C3: 输变电线路及设备, C4: 负荷。

根据电网一次系统、二次系统的不同特点，本文提出采用能量流对一次设备进行建模，采用信息流对二次设备进行建模，两者共同组成电网的 MFM 模型。具体的建模过程分为三个阶段：首先，将电网各设备一一映射为 MFM 模型的基本对象；其次，根据电网拓扑结构，将各设备之间的连接关系在 MFM 模型中表示出来；第三，当电网拓扑结构发生变化时，同步地更新相应的 MFM 模型。

在电网的 MFM 模型中，报警处理过程即是先将报警设备与相应的物理元件一一映射，然后通过逻辑判断对其相应的功能 (function) 进行赋值，最后通过假设验证得到准确结果。

## 2.3 判断逻辑

本文采用判断逻辑来表示相互连接的功能 (function) 之间的因果关系, 该判别方法适用于各类工业系统报警分析、故障诊断, 其中主要的判断原则包括:

判据 1 If source = low, then transport (相连) =low

判据 2 If transport=low, then storage(其输入端)=high; storage(输出端)=low; 通过 balance 相连的同向 transport=low

判据 3 If transport=high, then source=low 或 sink=low; storage(输入端)=low; storage(输出端)=high; 通过 balance 相连的同向 transport=high; 通过 balance 相连的反向 transport=low

判据 4 If storage=low, transport(输出端)=low

判据 5 If storage=high, transport(输入端)=low, transport(输出端)=high

判据 6 If sink=low, then transport=low

## 3 方法流程

该方法的具体流程如图 3。

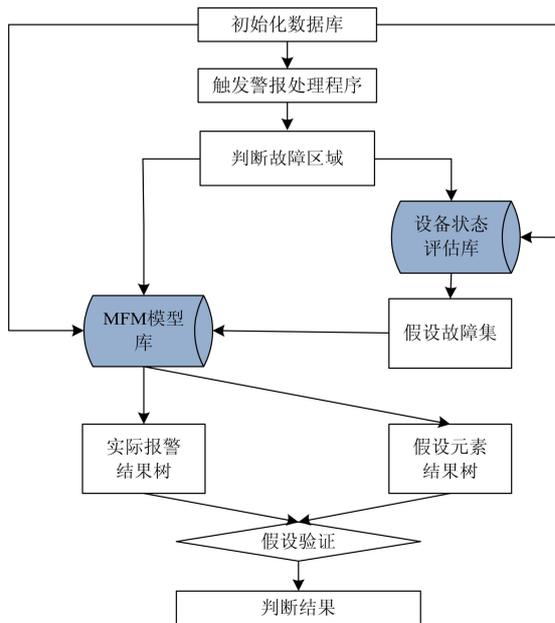


图 3 方法流程图

Fig. 3 Flowchart of the new method

- 1) 建立电网的 MFM 模型;
- 2) 实时接收电网警报, 以继电保护装置及其相应的断路器同步动作为触发条件, 启动智能报警主程序, 依次将各警报对应的 function 赋值;
- 3) 根据设置的筛选条件, 将报警区域内的设备

按照  $Nkfh$  的大小, 倒序存入假设故障集合;

4) 将假设故障集合中的元素分别代入 MFM 模型中, 将其对应的 function 进行赋值, 并将其作为根节点, 按照 MFM 树形结构对所有路径进行搜索;

5) 分别获取各种假设报警结果集与实际报警结果集的相似度;

6) 取相似度最高的元素为判断结果, 即报警源头;

7) 通过对比假设报警结果集与实际报警结果集, 判断遗失警报、错误警报等。

## 4 算例验证

本文以 IEEE 9 节点标准系统为例, 对该方法进行了较为简要的验证。

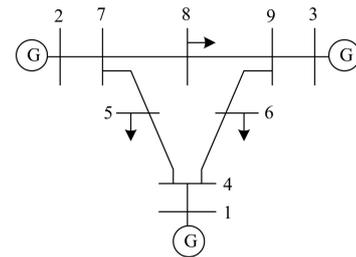


图 4 IEEE 9 节点系统拓扑结构

Fig. 4 Topology of IEEE 9-bus system

该系统包括发电机、母线、输电线及负荷等对象, 按照第 2 节介绍方法建立起它的 MFM 模型, 如图 5 所示。

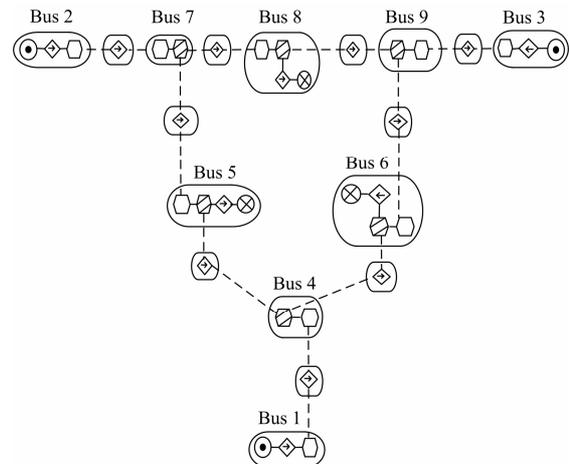


图 5 IEEE 9 节点系统的分层流模型

Fig. 5 MFM model of IEEE 9-bus system

以一个简单故障为例, 假设 0 s 时母线 7 发生临时性三相接地短路, 0.09 s 保护动作, 母线 7 的断路器动作断开, 1.2 s 重合闸成功, 在上述 4 s 中产生的报警事件见表 2。

故障发生后,该系统 MFM 模型中 Bus7 的功能发生变化,transport 从 high 变为 low,storage 从 high 变为 low,根据文中 2.3 章节的逻辑判断原则进行推理,可以判断出故障为母线 7 发生三相接地短路,相应的根源报警事件为母线 7 电压越下限,所花费时间为 0.03 s。

按照同样的方法,针对 IEEE 9 节点系统,分别模拟单相接地、相间短路、输电线断裂等多种类型的故障,对产生的报警事件进行处理,300 次故障情况下,成功判别出根源报警 297 次。

通过算例仿真可以看出,本文提出的方法推理时间短,判断结果准确率高,同时兼备了时效性和准确性,能够很好地满足在线应用的要求。

表 2 IEEE 9 节点母线 7 三相接地短路故障的报警事件

Table 2 Alarm events in IEEE 9-bus system while three-phase to ground fault occurs on bus 7

时间	报警事件
0.5 s	母线 7 电压越下限
0.65 s	线路 5-7 潮流越上限
0.7 s	线路 7-8 潮流越上限
0.014 s	断路器 1 合变分
0.9 s	母线 5 电压越下限
0.9 s	母线 6 电压越下限
0.9 s	母线 8 电压越下限
0.9 s	母线 1 的无功越下限
1.1 s	母线 2 的无功越下限
1.1 s	母线 3 的无功越下限
4 s	断路器 1 分变合

## 5 结论

电网发生扰动或故障是个非常复杂的过程,如何全面、有效利用各种信息进行智能报警、故障诊断是电力研究领域的一大难题。传统的智能报警方法偏重通过规则进行判断,本文将电网故障根本原因落点在设备上,通过在线设备状态评估和在线 MFM 模型库,随时对各种报警、故障情况进行判断,因为优先假设高风险设备发生故障,大大提高了智能报警的速度和准确率。仿真验证结果表明,该方法能很好地满足电网实时报警诊断的需求,具有良好的工程应用前景。

## 参考文献

[1] Vale Z A, Moura A M. Sparse: an intelligent alarm processor and operator assistant[C] // IEEE Expert AI in Power System, May/June 1997: 86-93.  
 [2] 王振树, 李林川, 牛丽. 基于贝叶斯证据框架的支持

向量机负荷建模[J]. 电工技术学报, 2009, 24(8): 127-134.  
 WANG Zhen-shu, LI Lin-chuan, NIU Li. Load modeling based on support vector machine based on Bayesian evidence framework[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(8): 127-134.  
 [3] 高振兴, 郭创新, 俞斌, 等. 基于多源信息融合的电网故障诊断方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 17-23.  
 GAO Zhen-xing, GUO Chuang-xin, YU Bin, et al. Study of a fault diagnosis approach for power grid with information fusion based on multi-data resources[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 17-23.  
 [4] 龙伯华, 谭阳红, 许慧, 等. 基于量子神经网络的电力电子电路故障诊断[J]. 电工技术学报, 2009, 24(10): 170-175.  
 LONG Bo-hua, TAN Yang-hong, XU Hui, et al. Fault diagnosis of power electronic circuits based on quantum neural network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(10): 170-175.  
 [5] 郭文鑫, 文福栓, 廖志伟, 等. 基于时序约束网络的电力系统在线警报处理解析模型[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(21): 36-42.  
 GUO Wen-xin, WEN Fu-shuan, LIAO Zhi-wei, et al. An analytic model for power system on-line alarm processing based on temporal constraint network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(21): 36-42.  
 [6] 郭成, 李群湛. 基于改进 PSO 算法的 SSSC 广域阻尼控制器设计[J]. 电工技术学报, 2010, 25(1): 151-157.  
 GUO Cheng, LI Qun-zhan. SSSC wide-area damping controller design based on improved particle swarm optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(1): 151-157.  
 [7] 宋功益, 王晓茹, 周曙. 基于贝叶斯网的电网多区域复杂故障诊断研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 20-25.  
 SONG Gong-yi, WANG Xiao-ru, ZHOU Shu. Research on complex faults diagnosis of multi-area power network based on Bayesian networks[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 20-25.

- [8] 曾庆锋, 何正友, 杨健维. 基于有色 Petri 网的电力系统故障诊断模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 5-11.  
ZENG Qing-feng, HE Zheng-you, YANG Jian-wei. Fault diagnosis model of electric power systems based on coloured Petri net[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 5-11.
- [9] Roudén K, Kraftnán S, Larsson J E. Real-time detection of originating events in large alarm cascades[C] // CIGRE, 2008.
- [10] Larsson J E. Diagnostic reasoning strategies for means-end models[J]. Automatica, 1994, 30(5): 75-87.
- [11] Larsson J E. Diagnostic reasoning based on explicit means-end models: experiences and future prospects[J]. Knowledge-Based Systems, 2002, 15(2): 103-110.
- [12] Larsson J E. Knowledge-based methods for control system[D]. Lund: Lund Institute of Technology, 1992.
- [13] 顾小军, 杨世锡, 钱苏翔. 基于多级流模型的火力发电系统故障诊断方法研究[C] // 第二十九届中国控制会议论文集, 北京, 中国, 7. 29-31, 2010: 4073-4077.  
GU Xiao-jun, YANG Shi-xi, QIAN Su-xiang. Thermal power generation system fault diagnosis method based on multilevel flow models[C] // Proceedings of the 29th Chinese Control Conference, July 29-31, 2010, Beijing, China, 2010: 4073-4077.
- [14] 马景铭, 赵云, 王斌, 等. MFM 与 MAS 协作的热电机组故障诊断方法[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(10): 80-83.  
MA Jing-ming, ZHAO Yun, WANG Bin, et al. Fault diagnosis based on MFM and MAS for generation unit[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(10): 80-83.
- [15] 方南南, 赵云, 吴少华. 基于多级流模型的流过程故障诊断算法[J]. 工业控制计算机, 2011, 24(1): 45-46.  
FANG Nan-nan, ZHAO Yun, WU Shao-hua. Fault diagnosis algorithm based on multilevel flow model for flow process[J]. Industrial Control Computer, 2011, 24(1): 45-46.

收稿日期: 2013-05-21; 修回日期: 2013-09-23

作者简介:

袁 鹏 (1988-), 男, 硕士, 研究方向为智能电网相关应用研究; E-mail: xcbusiniiao@163.com

杨红旗 (1965-), 男, 高级工程师, 研究方向为电网规划;

马韬韬 (1982-), 男, 博士, 主要从事电网运行工作。