

# 电力系统警报处理技术综述

朱少华, 马韬韬, 郭创新\*

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 电网处于紧急、故障等情况下, 调度中心将接收到大量报警信息, 调度员无法在短时内对大量警报做出合理解释, 也就无法推断电网所发生的事件, 更不用说采取调度措施来防止故障规模的扩大。为解决这一问题需要借助计算机的快速处理能力来处理警报, 目前工程师已研究了多种报警处理方法, 得出综合的报警信息告知调度员, 以方便调度运行人员能够及时、准确地对电网情况进行判断, 采取必要的控制措施。阐述了电网警报处理系统的基本功能和基本结构, 总结了国内外关于警报处理方法的研究现状, 并对电网智能警报的未来发展作了展望。

**关键词:** 电网警报处理; 专家系统; 神经网络; 覆盖集; 基因算法; 禁忌搜索; 多智能体

**中图分类号:** TM76; TP181

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-4551(2010)06-0007-05

## Survey on alarm processing technology in power system

ZHU Shao-hua, MA Tao-tao, GUO Chuang-xin

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** When emergency happens in power system, alarms swarms into the control center. The dispatchers can't interpret such number of alarms in short time and take right measure to handle the problem. To solve this problem, the alarm processor was developed to help the operators understand the alarms. The structure and the functions of alarms processor were expounded, the present research status of processing methods were summarized. As a reference for relative researchers, the merits of them were analyzed. At last, the future developments of the grid alarming were pointed out.

**Key words:** alarm processing; expert system; artificial neural network; covering set; gene; taboo search; multi-agent

## 0 引言

EMS 系统的警报主要有 4 类: 开关变位警报; 模拟量越限报警; 通信中断的报警; EMS 系统软、硬件故障报警。此外, 随着电网规模的扩大, 事件类型日益繁多, 事件所引起的警报数量也剧增。加拿大 Hydro Quebec 电网调度中心的研究显示<sup>[1]</sup>:

(1) 当其调度区域内一台变压器故障时, 2 s 内将产生 150 条各类报警;

(2) 当变电站故障时, 大约产生 2 000 条各类报警, 其中前 5 s 产生了 300 条报警;

(3) 当出现雷暴天气时, 每秒产生 20 条报警;

(4) 当系统解裂时, 前 5 s 各控制中心收到的报警信息多达 15 000 条。

面对巨大的信息量, 即使训练有素的调度人员也很难在短时间内及时做出有效判断。为了帮助运行人员更好地理解警报信息以便快速采取措施, 工程师们开发了警报处理系统。到目前为止, 已提出了多种变电站警报处理的方法, 例如逻辑判别法、专家系统法、人工神经网络法、数学建模法、系统结构优化等。

本研究首先总结了警报处理系统的基本特点, 然后介绍了各种方法的基本原理并比较了它们的优缺点, 接着探讨了电力系统报警的新思路, 最后对该领域今后的研究方向做了展望。

收稿日期: 2010-01-15

作者简介: 朱少华(1985-), 男, 浙江嘉兴人, 主要从事电力系统信息化、人工智能技术在电力系统的应用等方面的研究. E-mail: Shaohua\_zhu1117@163.com

通信联系人: 郭创新, 男, 教授, 博士生导师. E-mail: guochuangxin@zju.edu.cn

# 1 电网警报处理系统的基本特征

警报处理系统与故障诊断系统不同,它只需向运行人员报告系统发生了什么,不需要推断为什么发生,也无需诊断出具体的故障元件及故障位置。此外,警报处理系统所建立的电力系统模型较简单,推理过程也相对简单,然而它有很高的实时性要求,因此对处理速度有很高的快速性要求。

## 1.1 基本目标

警报处理系统的目标分为 3 个:

- (1) 筛选警报,减少警报数量;
- (2) 综合分析警报,推理电力系统所发生的异常事件,让运行人员正确掌握电力系统的状况;
- (3) 决策支持,向运行人员提出事件处理措施建议。

3 个目标之间互不独立,对警报综合也就意味着警报量的减少;准确的分析则有利于措施的选择。

## 1.2 基本结构

警报处理系统的一般结构如图 1 所示,由预处理子系统、主处理子系统、数据库和人机界面 4 部分组成。当然,处理方法的不同会导致结构的不同。

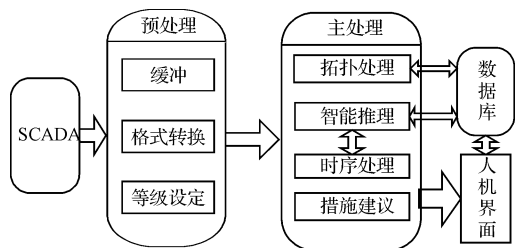


图 1 警报处理系统的一般结构

### 1.2.1 预处理子系统

预处理子系统主要有 3 个作用:①快速地读取 SCADA 系统的警报,并起到缓冲池的作用;②按照系统处理要求转换警报格式,如[(区域)(地点)(时间)(描述)];③设定警报优先等级,过滤无用警报,减轻主处理器的负担。

### 1.2.2 主处理子系统

主处理子系统一般能处理电网拓扑,实时更新电网状态信息;依照警报的时序信息进行智能推理,综合分析警报;根据分析结果向运行人员提供措施建议。

### 1.2.3 人机界面

人机界面一方面以图形的方式向调度员展示分析后的警报和措施建议;另一方面运行人员通过界面操作数据库。

### 1.2.4 数据库

数据库包括电网参数和模型、拓扑结构、知识库、事件集和警报集等,为警报处理系统提供参数和知识依据。

## 2 几种现有的警报处理算法

### 2.1 基于优先级的警报处理方法

根据故障信息对系统的影响程度,按照事件类型将告警信息划分为 3 个优先级:①紧急告警:直接影响到系统的安全稳定运行;②一般告警:对系统的局部或单个设备有一定影响,但不会危及系统的正常运行;③提示告警:仅起提示作用,提醒告知值班人员当前发生的操作信息。

不同等级的告警信息用不同颜色标记,并按照“重要等级由高到低、事件发生时间由近到远”的原则排列顺序。

### 2.2 基于智能算法的警报处理方法

#### 2.2.1 基于专家系统的警报处理方法

专家系统(Expert System)是具有专门领域专家水平的知识,并能像专家一样工作的智能程序系统。它由 5 个模块组成,分别为知识库、数据库、推理机、解释模块、知识获取模块,其基本结构如图 2 所示。

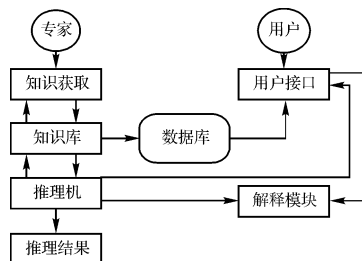


图 2 专家系统基本结构

#### 2.2.1.1 最初提出

1981 年,EPRI 在文献[2]中提出用警报综合分析方法来代替传统简单的警报筛选方法,用复杂的推理规则来代替简单的优先级规则,实现“一条警报对应一个事件”。

1986 年,B. F. Wollenberg 在文献[3]中提出采用专家系统的方法来处理警报,把调度员的经验转换成规则。本研究设定 5 类规则:警报优先级规则、停止供电规则、警报筛选规则、警报综合推理规则。采用 LISP 语言开发了系统,并在 DTS 上测试。系统基本结构如图 3 所示。

系统测试表明,利用专家系统能很好地筛减警报数量,并在一定程度上地实现“一条警报对应一个事件”。

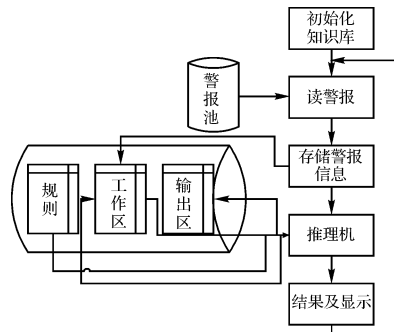


图3 基于专家系统的警报处理结构

### 2.2.1.2 应用与改进

专家系统应用于警报处理的想法一经提出,北美及欧洲的一些国家电力公司就相继开发了自己的系统。美国 NSP 公司、ConED 公司的系统增加了时序推理和拓扑处理的功能<sup>[4,5]</sup>,不仅提高了警报处理的准确性,而且还为潮流计算等高级软件提供电网的实时拓扑结构。葡萄牙的 SPARSE 系统还完善了推理机的工作方式和展示界面,推理机能根据实际情况选择合适的规则以减短推理过程,而人机界面增强了互操作性并且首次以地理接线方式来展示事件发生的地点。

这些系统投产后,工程师们发现所设定的规则无法完整地表达电力系统中的所有事件,为了解决这个问题,文献[6]采用基于模型的专家系统,建立基于潮流的关系型模型库。部分规则如下:

规则 1:线路开合状态影响自身潮流。

规则 2:网形系统中,相邻线路彼此潮流相互影响。

规则 3:辐射形系统中,负荷侧潮流不影响电源侧潮流;电源侧潮流影响负荷侧潮流。

规则 4:线路潮流的变化导致 PQ 节点电压的变化。

规则 5:辐射形系统中,电源侧电压变化导致负荷侧电压变化。

根据这些规则建立潮流模型,当变位警报产生时更新潮流模型。系统测试表明该方法还能够处理时间交叉的复杂事件。

文献[7]提出了让系统具备“学习”能力,当事件发生时,系统处于推理状态,而事后系统处于“学习”状态,自动更新规则库。具有“学习”能力的系统能减少规则库的维护量,使得规则库覆盖事件更为完整。“学习”能力用序列树实现,挖掘警报之间及警报与事件之间的相关性。文献[8]对上述方法加以实现,“学习”曲线图如图 4 所示。

文献[9]将时间序列模式挖掘技术引入到警报信息处理中。提出给予时间窗口的序列模式挖掘技术,可以发现在一个时间窗内由哪些告警事件导致另一个

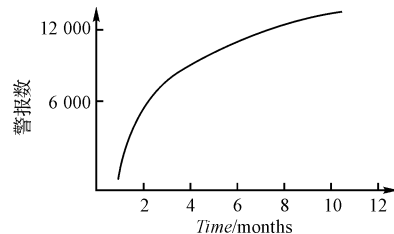


图4 基于序列树警报处理系统的“学习”曲线

告警集合事件的产生,由此产生的规则可以用来指导电力系统故障定位与诊断。

### 2.2.2 基于人工神经网络的警报处理方法

人工神经网络(ANN)是一种应用类似于大脑神经突触联接的结构来进行信息处理的数学模型,由大量的节点(神经元)及其之间的相互联接构成。每个节点代表一种特定的激励函数。每两个节点间的连接都代表一个对于通过该连接信号的权重,相当于人工神经网络的记忆。单层感知机模型如图 5 所示。

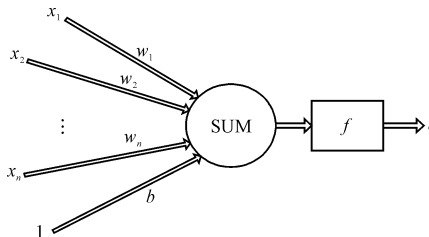


图5 单层感知机模型

$x_1, x_2, \dots, x_n$ —输入向量的各个分量; $w_1, w_2, \dots, w_n$ —神经元各个突触的权值; $b$ —为偏值; $f$ —传递函数; $t$ —神经元输出。

数学表达式如下:

$$t = f(WX^T + b) \quad (1)$$

其中,向量  $W$  是对样本训练后得到的,因此神经网络具有记忆性和“学习”能力。

1990 年,Edward 在文献[10]中首次把警报处理看成模式识别问题,采用 ANN 来处理警报,系统警报有 3 个特征:

特征 1:在一定状态下,一类特定事件产生与之对应的一类警报模式;

特征 2:多数情况下警报中含有开关警报;由于继电保护设定稳定,开关警报是警报综合的基本输入量。

特征 3:由于硬件原因会产生错误警报或警报丢失。

基于 ANN 的警报处理流程分为 4 个阶段:

- (1) 创建电力系统事件表,尽可能地覆盖所有事件;
- (2) 根据继保信息和潮流关系建立事件所对应的警报,过程“事件-警报”逻辑表;
- (3) 用历史样本对 ANN 训练,获得判别模型;
- (4) 当警报集产生时,用判别模型进行事件推理。

应用 ANN 开发的系统在 PG&E 公司的某 115 kV/12 kV 变电站测试,结果表明系统实现了“一条警报对应一事件”的目标;在没有错误警报的情况下,推理正确率达 100%;当有少数错误警报出现时,系统仍能正确地得出推理结果;当错误警报数量较多时,系统推理正确率下降。

### 2.3 基于覆盖集理论的警报处理方法

覆盖集理论最初在变压器故障诊断中应用比较广泛,其基本思路是根据覆盖集的节约原则建立目标函数,然后再通过智能算法求解目标函数的最优值。覆盖集理论最大的优势是能够处理不完全信息或错误信息。

一个警报处理问题  $P$  可以定义为一个四元式  $P = \{D, M, R, M^+\}$ , 其中  $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ 、 $M = \{m_1, m_2, \dots, m_l\}$  是事件及警报的有限非空集合;  $R \subseteq D \times M$  是定义在  $D \times M$  上的关系子集,其定义域为  $domain(R) = D$ , 而值域为  $range(R) = M$ ;  $M^+ = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$  是  $M$  的一个子集,称为实时警报集。  $D_l = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$  是  $D$  的一个模糊子集,也是能解释  $M^+$  的一个解。解释度可定义为  $Explain(M^+ | D_l)$ 。当警报丢失或产生错误警报时,应用覆盖集建立数学模型仍能很好表示实际情况。

文献[11]对警报处理的解提了 3 个要求:①解应是  $M^+$  的一个覆盖,这是因为错误警报的发生概率很小;②对应于警报处理的事件所包含的警报应与报告的警报尽可能一致;③在警报处理中,包含的事件应尽量少。因此警报处理的定义如式(2):

$$\min f(D_l) = w_1 |\nabla A| + w_2 |\Delta A| + w_3 |D_l| \quad (2)$$

式中  $D_l$ —一个假设解,  $D_l$  中元素值取决于事件的发生与否,是为 1, 否为 0;  $\nabla A$ —反映了式(2)中的解是否为集合  $M^+$  的一个覆盖;  $\Delta A$ —反映了变电站报告的警报集与假设中事件所对应的特征警报集的一致程度;  $w_1, w_2, w_3$ —权系数,代表了警报处理个要求的相对重要程度。

由式(2)的数学模型可知,警报处理在数学上是一个 0-1 整数规划问题。针对该问题,文献[11]采用基因算法来求最优解,平均每一个事件的处理速度为 15 s。文献[12]采用禁忌搜索法来求解,速度为 5 s,更适于警报处理。文献[13]对此方法加以实现,并在某个大型变电站进行了测试,结果表明其准确率较高。

### 2.4 基于概率推论的警报处理方法

电网同一事件所产生的警报有时会有不同,因此可采用概率推论的方法来处理警报。为了把未产生的警报考虑进来,警报处理问题  $P$  可以定义为一个五元式  $P = \{D, M, R, M^+, M^-\}$ , 其中  $D, M, M^+$  与 2.3 中所

述一样,而  $M^-$  是未产生的警报集,  $R$  中元素表示事件引起警报的概率,而非单纯的 0 与 1。文献[14]根据简单 Bayes 公式得下式:

$$P(D_l | M^+ \wedge M^-) = \frac{P(M^+ \wedge M^- | D_l)}{P(M^+ \wedge M^-)} P(D_l) \quad (3)$$

在已知  $M^+$  和  $M^-$  的情况下,并假设事件之间相互独立。可得下式:

$$P(D_l) = P_1(D_l) P_2(D_l) P_3(D_l) \quad (4)$$

$$\text{式中 } P_1(D_l) = \prod_{m_j \in M^+} (1 - \prod_{d_i \in D_l} (1 - C_{ij})); P_2(D_l) = \prod_{m_i \in M^+ \wedge d_i \in D_l} (1 - C_{il}); P_3(D_l) = \prod_{d_i \in D_l} \frac{P_i}{1 - P_i}。$$

其中,  $P_1(D_l)$  和  $P_2(D_l)$  反映了事件集  $D_l$  在多大程度上引起  $M^+$  的产生和  $M^-$  的不产生;  $P_3(D_l)$  代表  $D_l$  的先验概率的加权,它是基于警报处理的历史性考虑。以式(4)为适应度函数,采用基因算法求解,平均每一个事件的处理速度为 10 s。

### 2.5 基于结构优化的警报处理方法

智能技术的引入一方面确实提高了警报处理的速度和正确率,但是另一方面由于海量的数据以及复杂的计算流程,对通信通道的带宽及计算机的处理速度提出更高要求。显然,所有工作都由一台主计算机完成不太现实,因此工程师们从结构优化上来改进电力系统警报处理系统,由多个计算机分担任务。

#### 2.5.1 两层结构的警报处理系统

文献[15]把电力系统分成两级,分别为变电站级和电网级。警报处理系统相应分成两部分,分别为变电站警报处理模块和电网警报处理模块,如图 6 所示。

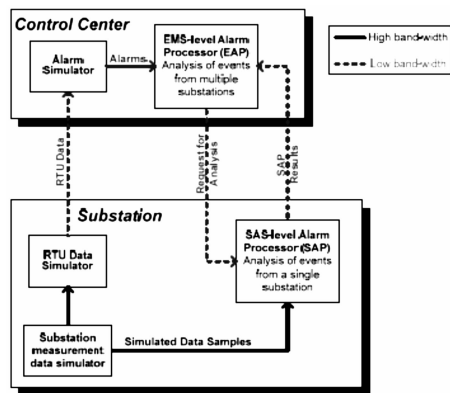


图 6 双层警报处理结构

前者对变电站警报进行处理,并把结果传给调度中心的电网警报处理模块。

#### 2.5.2 分布式结构的警报处理系统

多智能体技术是一种新的智能技术,它由多个智能体组成,每个智能体具有主动性和社会性,相互之间进行智能的交流。文献[16]把警报处理系统分为人

机界面智能体、数据采集智能体、数据分析智能体、控制智能体和数据库智能体。

其中数据分析智能体扮演着核心角色,它接收来自数据采集智能体的警报并具有警报筛选和“学习”的能力;数据采集智能体是整个系统的前端,接收来自RTU的警报;控制智能体则是“大脑”,它协调各个智能体间的通信,并且根据实际情况选择规则交与数据分析智能体。

### 3 传统警报处理方法的不足及新思路

快速性、准确性是电力系统报警系统的两大原则。传统警报处理系统有以下3点不足:

(1) 以任一警报为触发源,开启频繁,主机运行负担重,而且会产生警报和事件“瞎对应”的情况;

(2) 模拟量警报是电力系统中个别的越限数据,不能完全表征整个系统状态,而且模拟量警报从产生到处理耗时较长;

(3) 对警报综合分析能力不强,缺乏灵活性,如简单地利用经验从警报之间的相关性出发去推理,就有可能得出错误的推理结果。此外,电网的扩建导致规则的改动,维护比较复杂。

笔者提出一种新的报警思路:以开关变位警报作为事件发生和报警系统触发依据;报警系统采集此时此刻的系统状态变量作为推断事件的特征量,如母线节点的电压向量,因为在不同的事件下状态变量有着不同的模式,建立基于状态变量的事件观测器;采用支持向量机的算法来对不同事件进行分类,通过样本训练生成判别模型,从而使系统具有“学习”的能力,解决了规则维护的问题。这样主机处理频率将会降低,省去模拟量警报生成过程,而且对系统状态变量检测能保证系统的能观,提高了报警速度和正确率。

### 4 结束语

电力系统警报处理是智能电网的几个研究热点之一,计算机技术及智能处理方法的发展为解决这一问题提供了新依据、新思路,笔者对几种方法进行了分析,得出了它们共同的缺点,并针对这些缺点提出了新的思路。最后笔者指出智能化、快速化是电力系统报警的必然发展趋势并对此作了展望。

未来的警报处理系统应更智能,除了向运行人员提供决策支持外还要为电力系统其他高级应用提供决策支持,如:向故障诊断系统提供几个可能的故障选择,缩小诊断范围,提高准确度和诊断速度;向状态评估系统提供评估依据;向电压控制系统提供控制措施建议。

同时,人机界面应更具人性化,报警应一目了然,比如结合GIS系统让运行人员马上知道事件发生的区域等;此外,随着广域网的建设,数据量也大大增加,如何快速挖掘有用的信息将是一个重要的研究课题。

### 参考文献(References):

- [1] KIRSCHEN D S, WOLLENBERG B F. Intelligent alarm processing in power systems [J]. **Proceedings of the IEEE**, 1992, 80(5): 663 - 672.
- [2] Advanced CRT Concepts for Power System Dispatch Centers, EPRI EL-81-5-LD[R]. Palo Alto: Electric Power Research Institute, 1981.
- [3] WOLLENBERG B F. Feasibility study for an energy management system intelligent alarm processor[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 1986, 1(2): 241 - 246.
- [4] BIJIOCH R W. Development and implementation of the NSP intelligent alarm processor[J]. **IEEE Transaction on Power System**, 1991, 6(5): 806 - 812.
- [5] SHOOP A H, SILVERMAN S, RAMESH B. Consolidated Edison System Operation Computer Control System Alarm Advisor SAA[C]//Proc. Second Symp. Expert Systems Applications in Power Systems. Seattle: [s. n.], 1989: 84 - 88.
- [6] TSAI M S, LIU C C. Intelligent Alarm Processor: Model based Approach[C]//Proceeding of the 16th Symposium on Electrical Power Engineering. Taiwan: [s. n.], 1995: [s. n.].
- [7] YPSILANTIS J, YEE H. Machine Learning of Rules for a Power System Alarm Processor[C]//International Conference on APSCOM - 91. Hongkong: [s. n.], 1991: 321 - 325.
- [8] YPSILANTIS J. The Trial of a Self-Learning Alarm Processor and Generator[EB/OL][时间不详]. [http://www.sentryport.com/pdf/the\\_trial-of-a-self-learning-alarm-processor-and-generator.pdf](http://www.sentryport.com/pdf/the_trial-of-a-self-learning-alarm-processor-and-generator.pdf).
- [9] 范习辉,张焰. 序列模式挖掘再电力系统警报信息处理中的应用[J]. **电力系统自动化**, 2005, 29(13): 49 - 52.
- [10] CHAN E H P. Using neural network to interpret multiple alarms[J]. **Computer Application in Power**, 1990, 3(2): 33 - 37.
- [11] WEN Fu-shuan, CHANG C S, SRINIVASAN D. Alarming Processing in Power Systems using a Genetic Algorithm [C]//International Conference on Evolutionary Computation, 1995. Perth: [s. n.], 1995: 27 - 32.
- [12] WEN F S, CHANG C S. Tabu search approach to alarm processing in power system[J]. **IEEE Proceedings-Generation, Transmission, and Distribution**, 1997, 144(1): 31 - 38.
- [13] 李超,张栋,陈根军. 基于Taboo搜索的变电站警报处理系统[J]. **电力系统自动化**, 2004, 28(4): 71 - 74.
- [14] WEN Fu-shuan, CHANG C S. A Probabilistic Approach to Alarm Processing in Power Systems Using a Refined Genetic Algorithm[C]//International Conference on ISAP. 1996. Chiba: [s. n.], 1996: 14 - 19.
- [15] WU Y, KEZUNOVIC M, KOSTIC T. An advanced alarm processor using two-level processing structure [J]. **PowerTech**, 2007(7): 1 - 5.
- [16] 郭文鑫,文福控,廖志伟. 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.