

输电网故障诊断研究综述及发展

毛鹏^{1,2}, 许扬¹, 蒋平²

(1. 江苏省电力公司技术中心, 江苏 南京 210036; 2. 东南大学电气工程系, 江苏 南京 210096)

摘要: 在深入分析输电网故障诊断信息结构的基础上, 综述了目前此课题国内外研究现状。并且, 以一个简单的诊断实例为基础, 详细地分析了各类诊断模型思想和特点。最后, 基于现有的研究成果, 结合电网、信息技术等各方面的发展现状, 指出当前研究缺陷的同时, 预测分析了下一步输电网故障诊断研究的发展方向。

关键词: 故障诊断; 专家系统; 优化算法; 电网

中图分类号: TM711; TM421 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)22-0079-08

0 引言

准确、快速的输电网故障诊断是实现事故情况下科学调度, 尽快排除故障、恢复供电, 保证电网安全、稳定、经济运行的重要手段。鉴于当前电网规模的扩大、电力系统网架建设的国情, 以及国内电力市场运行模式的逐步推行等因素, 研究和发输电网故障诊断这类作用于提供辅助决策的高级应用软件具有重要意义。另一方面, 随着数字化、信息化进程的推进, 在为运行、管理等部门带来诸多方便的同时, 我们也应看到, 电网事故情况下虽然所获得的信息更加趋向于完备和全面, 但由于处理手段的单一和数据深加工的缺乏, 导致运行、值班人员在海量故障信息前束手无策、无所适从, 对以快速分析事故原因、重现电网事故过程和评价设备及装置动作行为为目的电网故障诊断系统具有强烈的实际需求。这也正是电网故障诊断研究向前发展的动力和持续热点的一个重要原因。

故障诊断理论研究历史由来已久, 伴随着理论研究的逐步深入, 信息支撑条件的逐渐完善 (如综合自动化系统的推广、故障录波专用网络建设、以及当前输电网故障信息处理系统的完善), 以及人工智能技术、计算机技术等相关专业领域理论成果的出现等因素推动下, 电网故障诊断研究领域取得了许多重要成果。本文对这一已有几十年研究历程的专业领域做框架性的综述, 分析各类诊断方法的难点和重点, 目的在于对这一研究领域有整体认识的同时, 明确以后的发展方向和研究重点。同时指出, 作为工程类研究领域, 实用化是其衡量标准, 也是其最终目标。

1 输电网故障诊断问题分析

电网故障诊断是以某一电压等级电网或某一区域电网为研究对象, 倾向于事故后的分析和判断, 其结构示意图如图 1 所示。电网故障诊断的研究范畴如果按照所研究对象来看, 有别于电力设备故障诊断, 设备故障诊断研究一般仅局限于设备本身相关联信息来预测和确定设备的故障或异常状态, 或对当前运行状态做出评估, 如目前研究较多的电力变压器、高压开关和电抗器等故障诊断, 其研究方向倾向于状态预测或预警。

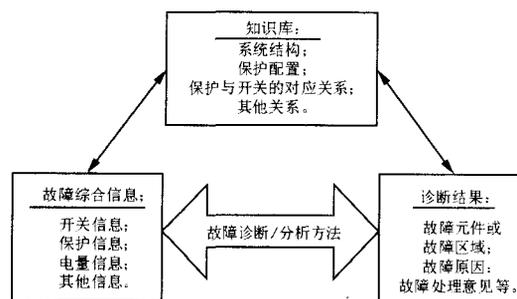


图 1 电网故障诊断结构示意图

Fig 1 Structure of fault diagnosis for power grid

电网故障诊断课题的定位是依据故障综合信息, 借助于知识库, 采用某种诊断机制来确定电网故障设备或原因, 同时完成对保护装置、安全自动装置等监测、控制设备的动作行为的评价。本文仅对输电网故障诊断研究做阐述 (注: 输电网故障诊断和配电网故障诊断在诊断方法本源上是相同的, 但由于诊断对象、获取的故障信息、诊断后处理措施等方面存在差异, 导致两者在某些方面是不同的, 本文的立足点是输电网故障诊断, 文中的电网应指输电网络), 应该认识到输电网故障诊断如此之多的诊断

理论和方法相互继承、关联,试图采用统一、清晰的标准来划分是不现实的,也是不可能。为尽可能地描述清楚此研究方向的研究现状,我们首先分析、阐述输电网故障诊断问题的框架结构,明确此专业方向的几个研究点。

如图 1 所示,电网故障诊断的信息分为三部分:故障综合信息、系统知识信息、诊断结果信息。故障综合信息和诊断结果信息是源和目的的关系,通过诊断机制来映射。系统知识信息是诊断机制完成源信息和目的信息映射所必须遵守的规则和条件。从目前的研究来看,研究点主要分布如下。

1.1 故障综合信息的知识提取

就故障综合信息而言,诊断研究有两个方面:实现诊断所依据的故障信息种类;鉴于某类故障信息的特点,诊断所采用的预处理方法。

基于不同种类的故障信息,有如下诊断方法:基于开关状态信息的故障诊断^[1]、基于开关和保护装置接点信息的故障诊断^[2]、计及报警信息时间特性的故障诊断^[3,4]、基于故障录波器中电气量的故障诊断^[5,6]等。应该说故障诊断源信息的拓展是电网发展的结果,早期的诊断研究基本上立足于前两种,依托于调度中心 SCADA 系统来实现的,随着微机保护装置的推广和实用,以及变电站综合系统的实现,出现了基于 SOE 信息的诊断研究^[7],和依托于变电站故障信息的故障诊断方法,以及随着近年来故障录波网络的建设而出现的最后一种诊断方法。

另一方面,鉴于原始故障信息数据的不完备、冗余、错误等特点,就某类信息(目前还主要是开关和保护装置的遥信信息)的容错、约简、联想等方面做了大量的研究工作,如基于模糊理论的故障诊断^[8,9],以及目前研究比较热的基于粗糙集理论的故障诊断^[10,11]、基于数据挖掘技术的故障诊断^[4,11]等。数据挖掘技术和粗糙集理论所处理问题的特点与电网故障诊断和分析研究有很好的切合点,具有许多先天的原理优越性;而这些技术或理论都处于刚引入电力系统研究领域阶段,研究和应用还比较初步,所以对基于此类技术的诊断理论作深入研究是有重要意义的。

关于故障综合信息的知识提取方面的研究是实现准确、可靠诊断的基础和前提,此阶段的处理水平直接影响最终的诊断效果,且其研究成果可以应用于任何故障诊断模型。

1.2 诊断知识库信息的表征

诊断知识库信息包括:电网拓扑结构、保护配

置、保护和开关的对应关系、保护原则,以及二次系统行为和一次系统故障的映射关系等。虽然诊断知识信息属于静态数据,即故障诊断前应准备就绪,但如果诊断系统要实用的化,知识库刷新在某些方面必须达到自动。诊断知识库信息的表征方法与具体的诊断模型有比较大的关联,在基于专家系统的故障诊断研究中,知识库表达作为一个重要方面做了较多研究,有:基于谓词逻辑表示法、基于产生式规则表示法^[12]、基于过程式知识表示法、基于框架式表示法^[13]、基于知识模型表示法和基于面向对象表示法等,后两种是在前三种基础上,伴随计算机技术和智能技术的融合发展而产生的新形式和新结构。而在其他故障诊断模型,诊断知识库的表达可能不很直观,如基于神经网络的故障诊断模型^[14,15],诊断知识是通过神经网络对样本库的学习存于连接权值中的;而采用优化算法实现故障诊断的模型中^[1-3],诊断知识是通过按照保护原则建立的数学表达式来表征的。

不论诊断知识库如何表达,试图包含所有诊断经验和规则的研究是不切实际的,主要原因在于:故障诊断问题的本身是一个非常离散、受多种因素影响、难于精确表达的问题,鉴于系统的规模和诊断原始信号的多样性,任意组合可能是 NP 完全问题,难以用穷举法来实现;诊断原始信息的现场特性,即信息本身的畸变、冗余等,导致故障原始信息不可预测和全部覆盖。这一点也正是专家推理型诊断模型得不到实际应用突破的难点。鉴于上述特点,要求诊断方法必须具备足够的联想、容错等性能。

1.3 诊断模型的研究

对诊断问题如何抽象和描述是构建诊断模型的问题,也即采用何种诊断机制实现诊断目标的问题。诊断模型的构建研究是电网故障诊断研究的核心,而故障原始信息知识提取和系统知识表征研究则属于局部性研究,它们的研究成果,尤其是故障综合信息的知识提取方面的研究成果,可以应用于任何一种诊断模型,此两研究点虽然在某些方面对整个诊断研究领域有所推动,但比较有限。应该看到,对电网故障诊断模型的研究是根本。基于此,本文对众多的诊断方法按照模型的不同进行了分类,并通过一个简单诊断例子来分别阐述不同模型的本质所在。

2 输电网故障诊断模型分类

按照诊断模型,大体可以分为三种:推理型故障

诊断模型、优化型故障诊断模型、计算分析型故障诊断模型。分类正如本节开篇所言,不可能界限明确,旨在于阐述清楚故障诊断的研究现状即可。

2.1 推理型诊断模型^[9,12-28]

推理型诊断模型比较接近人的实现故障诊断的过程,基本思路是:由获得的故障综合信息,根据既定规则(或经验)逐步地逻辑推理出故障设备或故障原因。推理型诊断模型可大体分为显型和隐型推理,其中显型推理模型,如传统的推理模型^[16-18]和专家系统模型^[19-21],更多的是人为诊断行为的模拟和计算机实现,早期研究比较多,也比较成熟;而隐型推理模型,如基于神经网络的诊断模型^[14,15,22]、基于 Petri网的诊断模型、基于因果关系网的诊断模型^[23,24]等,对逻辑推理规则做了抽象化、数学化等处理。下面对主要方法做分别论述。

2.1.1 基于专家系统的电网故障诊断^[12,13,19-21]

70年代初期专家系统就引入了电力系统故障诊断研究领域,其所具有的特点与电力系统故障诊断问题有许多切合点,因此基于专家系统的故障诊断研究时间最长、研究最多。专家系统在融合书本相关理论知识来处理各种定性问题的同时,可总结和利用专家的经验知识(或称启发式知识)来求解问题,因此在解决那些依靠解析方法不能解决的问题方面具有先天优势,而且可使所求解问题的知识搜索和推理范围缩小,提高问题的求解速度和推理效率。专家系统在电力系统的故障诊断和恢复处理方面应用较多。用于电力系统故障诊断的专家系统,常用的推理机制基本上是正向推理^[17,18]、反向推理、正反混合^[20]三种。模型构建上基本上分为两大类:基于事例推理的专家系统和基于规则推理的专家系统。下面结合图2所示例子做简要说明。

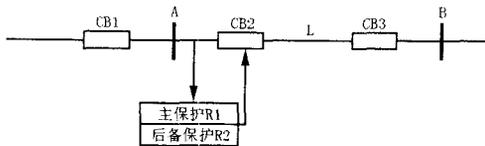


图2 简单例子示意

Fig 2 Simple example

规则推理专家系统首先根据电力系统结构、保护配置以及开关和保护与设备的映射关系等知识,建立规则库,即一系列的 IF-THEN 条件语句,如图2系统结构,对于设备L,可建立规则:

```
IF
  CB2 = 0 (跳开);
THEN IF
```

```
  CB3 = 0 (跳开);
  THEN IF
    R1 = 1; (主保护动作)
  THEN
    设备 L故障
```

基于事例推理的专家系统的思路是:通过研究过去问题的解(即事例 Case),进行类比或者联想等,寻求解决当前的问题。基本步骤为:首先将系统的故障情况保护在事例库中,对故障的描述分为问题组和方案组两部分;诊断时采用问题组字段匹配的方法查找方案组,得到故障设备。对上述例子,事例描述如下:

```
Case instance XXX (编号) is; (问题组)
  CB2 = 0; (跳开)
  CB3 = 0; (跳开)
  R1 = 1; (主保护动作)
Solution is; (方案组)
  诊断结果 = ['设备 L故障'];
end
```

几十年的研究发展历程,基于专家系统的电力系统故障诊断理论在知识获取和构造方面有了很多的改进,其发展的趋势是力图使知识获取、知识表达工作简化,进而将故障诊断的推理效率得到提高。但专家系统实现故障诊断的基本原理没变,因此,在实际应用中的某些固有缺陷仍是不能忽视的:构造一个完备的故障诊断专家知识库一直是个研究难点;知识库的可维护性也非常重要,知识库的不完整或不一致可能导致专家系统推理混乱,并得出错误的结论;容错能力较差是基于专家系统的电网故障诊断模型的最大局限性,研究如何在故障信息表征的故障类型不被知识库涵盖情况下,仍能给出可信解的工作非常重要。

2.1.2 基于神经网络的电网故障诊断^[14,15,22]

基于神经网络的电网故障诊断模型属于隐型推理诊断模型,其推理过程不为人所理解。诊断基本思想是:从领域专家所提供大量和充分的故障实例中,形成用于故障诊断神经网络模型的训练样本集,通过一定的学习、训练使诊断神经网络获得对电网故障的诊断功能,并具有一定的联想和泛化能力。基于神经网络的故障诊断避免了专家系统故障诊断所面临的知识库构造等难题,不需要推理机的构造,且推理速度与规模大小无明显的关系,很快引起了人们的研究兴趣,也得到了日益广泛的发展。文献

中应用于电力系统故障诊断的神经网络有:基于 BP 算法前向神经网络,基于径向基函数的神经网络^[14]以及具有时空概念的分层分布式的神经网络^[15]等。

基于神经网络的电网故障诊断在带来诸多研究突破的同时,其本身所固有的缺陷也不得不令人正视:对于有导师学习型神经网络,虽具有很好的内插效果,但外推能力较弱,从而必须要求训练样本集必须完备,包含所有的故障情况,这一点与基于事例推理专家系统的诊断模型面临的问题一致;对于具有学习功能的诊断神经网络,当新样本(新诊断知识/经验)增加时,必须重新学习,现场可维护性较差;基于神经网络的诊断模型难以实现基于结构化知识的逻辑推理,缺乏解释能力,导致故障诊断结果不易被运行人员理解;一些神经网络通用问题如:如何确保训练时收敛的快速性和避免陷入局部最小等,也是基于神经网络的故障诊断系统必须面对的现实问题。

2.1.3 基于 Petri网的电网故障诊断模型^[9, 25-28]

Petri网是离散事件动态系统建模和分析的理想工具,能够对系统中同时发生、次序发生或循环发生的各种活动过程进行定性或者定量的分析,达到研究系统组织结构和动态行为的目的。鉴于电力系统故障动态过程描述的可行性,因而可将 Petri网引入来构造电网诊断模型。

基于 Petri网的诊断模型的主要特点在于:结构表示图形化、推理搜索快速化和诊断过程数学化等。诊断思路是:由表示故障发生征兆的初始标识 μ_0 经一系列点火序列 $(x_0, x_1, \dots, x_{N-1})$ 到达最终标识 μ_N , 此过程可用状态方程:

$$\mu_N = \mu_0 + A^T \sum_{k=0}^{N-1} x_k \quad (1)$$

来表示,如果目标库所(place)中有一个托肯(token),则表示有该故障事件发生了。下面以图 2 系统 L 设备故障为例来简单介绍此诊断模型的思路:

- 1) 构建故障诊断逻辑关系,如图 3(a)的故障树;
- 2) 将该逻辑关系用基本 Petri网来表示,如图 3(b);
- 3) 定义源库所集 $\{p_1, p_2, p_3\}$, 目标库所集为 $\{p_6\}$ 。构建初始标识,假定故障信息为 $\{CB2=0, CB3=0, R_1=1\}$;“开关 CB2、CB3 跳开,主保护动作”,则 $\mu_0 = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$, 诊断 Petri网的关联矩阵:

$$A^T = \begin{matrix} & t_1 & t_2 & t_3 \\ p_1 & -1 & 0 & 0 \\ p_2 & 0 & -1 & 0 \\ p_3 & 0 & 0 & -1 \\ p_4 & 1 & 0 & -1 \\ p_5 & 0 & 1 & -1 \\ p_6 & 0 & 0 & 1 \end{matrix}$$

4) t_1, t_2 可点火,则 $x_0 = [1 \ 1 \ 0]^T$; $\mu_1 = \mu_0 + A^T x_0 = [0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0]^T$;

5) $k = 0 + 1 = 1$, 有 t_3 可点火则 $x_1 = [0 \ 0 \ 1]^T$;

$\mu_2 = \mu_1 + A^T x_1 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$; 无转移使能,循环结束;

6) 最终结果标识 $\mu_2 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$, 其中 $p_6 = 1$, 则表示设备 L 故障。

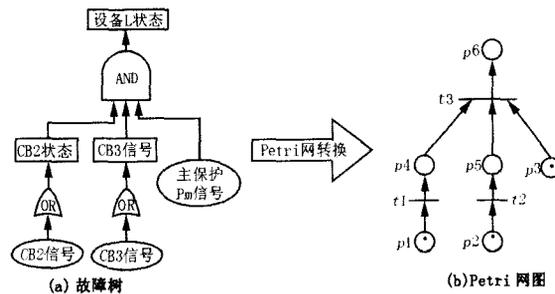


图 3 Petri网转换示意图

Fig 3 Petri net transform

基于 Petri网的电网故障诊断模型的关键在于故障树的构建,而这正是诊断问题的难点所在,而后续的处理过程应该是次要的。另外此模型面临的一些问题尚需深入研究:电网保护装置的多重性配置现状、保护装置之间的动作时间差异性以及保护装置的性能异常等问题;现场普遍存在的故障诊断所依据信息畸变情况下,如何提高容错能力的问题等。另外,对大规模电网故障诊断,基于 Petri网模型建模时,会因设备的增加和网络的扩大出现状态的组合爆炸,从而需要采用高级的 Petri网,如谓词/变迁网,有色时间网^[19]等理论。

2.2 优化型诊断模型^[1-4, 29]

电力系统故障诊断研究领域后来引入的优化型诊断模型对整个研究领域产生了重要影响。优化型故障诊断模型的基本思想是:根据设备与保护动作和断路器跳闸之间的逻辑关系,首先把电力系统的故障诊断问题表示为 0-1 整数规划问题,在此基础上,通过优化算法寻找使构造的目标函数最小(或最大)的最优解,即找出最能解释警报信号的故障

假说。

优化型诊断模型中故障诊断问题表示为使下述目标函数(误差函数)最小化的问题:

$$E(x) = \sum |C_j - C_j^*(R)| + \sum |R_k - R_k^*(X)| \quad (2)$$

式中: $X = [S^T, C^T, r^T]^T$ 为系统条件的状态向量; S_i 为第 i 个元件的状况(正常时为 0,故障时为 1); C_j 为第 j 个断路器(CB)的状况(未跳闸时为 0,跳闸时为 1); R_k 为第 k 个保护的状况(未动作时为 0,动作时为 1); C_j^* 为断路器函数(应该跳闸时为 1,不应该跳闸时为 0); R_k^* 为保护函数(应该动作时为 1,不应该动作时为 0)。

如何确定 C_j^* 和 R_k^* , 可以通过图 2 所示的简单例子来说明: 主保护(R_1)和后备保护(R_2)都用于保护元件 L, R_1 、 R_2 只要有一个动作时, 断路器(CB2)应跳闸, 则 $C^* = 1 - (1 - R_1)(1 - R_2)$, 当 L 故障时, R_1 应动作, 则 $R_1^* = L$, 当 L 故障且 R_1 未动作时, R_2 应动作, 则 $R_2^* = L(1 - R_1)$ 。

由此可见, 式(2)中所有变量的取值都为 0 或 1, 因而使式(2)最小化的问题即为 0-1 整数规划问题, 优化变量为 S_i 。从而将电网故障诊断问题描述为优化型求解模型, 可以采用多种优化算法进行求解, 目前所用的优化算法有: 遗传算法、模拟退火算法、Tabu 搜索算法、模拟分子进化算法、贪婪算法等。就目前基于优化算法的大量故障诊断文献而言, 重点皆放在如何构建适应于故障信息某种特征的优化模型上, 而所采用的具体优化算法仅简单地给出其实现步骤, 限于篇幅和重点, 本文也不再对各优化算法的特点做论述, 应该看到就智能化方法的角度而言, 各优化算法有其自己的发展背景和特点、以及所擅长处理的问题等, 但在故障诊断中, 从诊断实现来看并没有太明显的区别, 且很难评价哪种优化算法更突出, 因为它们大都属于启发式寻优方法, 都有一些参数需要凭经验给定, 且在目前尚不存在最优给定这些参数的系统方法情况下, 合理的比较并不容易, 只是各方法在一定参数设置下, 实现效率上有差异。

优化型诊断模型理论上是严密的, 而且能够在诊断所依据信息不完整的情况下给出全局最优或局部最优的多个可能的诊断结果, 具有很好的应用前景。优化型电网故障诊断模型实现的关键在于: 如何根据保护配置原则和保护与断路器之间的逻辑关系, 自动地形成保护和断路器的期望状态, 进而自动

形成目标函数。至于, 构建好优化型诊断模型后, 采用何种方法来寻优是次要的。另外, 此模型在一些方面尚需进一步探讨: 诊断所依据的故障信息发生畸变, 或出现复杂的故障模式时, 如何保证结果的可靠; 如何根据被诊断对象特征, 构建具有高容错性能的故障诊断适应度函数; 如何确定迭代操作的结束准则等问题。

2.3 计算分析型诊断模型^[6,30]

文献中也有基于故障录波器测量信息, 通过计算来实现电网故障诊断的研究思路。这类诊断方法立足于通过检测电流、电压等测量信息来确定故障设备和位置, 类似于离线广域保护的思路。录波器测量的电流、电压量在反映一次系统状态方面具有很高的可靠性, 是事故后故障分析的重要依据。但是保护装置实现电网的保护功能, 有一套严格的、精细的分析处理算法和逻辑, 其本身的动作行为是经过严格测试的, 所以在诊断过程中, 不考虑保护、监控等装置的动作行为, 直接以整个变电站或某个局域网为对象, 按照保护的思路采用交流量来实现故障定位目前不太可行, 效果也不佳。

此诊断模型应充分发挥可靠性可以略低于保护装置、非实时、原始信息全等特点, 在如下方面做拓展研究: 保护行为和故障前发生事件的相关性方面, 从而诊断出保护原理性误动等故障情况, 如功率倒向导致纵联方向保护误动、合闸操作出现涌流导致差动保护误动等; 充分利用保护装置所不能获得的其他测量信息来做分析, 如线路故障中, 基于两端非同步信息的保护和测距等。另外, 随着广域网同步测量(PMU)系统的进一步推广完善, 此类诊断模型会有进一步的发展。

3 输电网故障诊断面临的问题和发展方向

3.1 输电网故障诊断方法应用现状

截至目前, 电网故障诊断的实现还未以高级应用系统产品的形式出现, 为数不多的应用实例皆以科研项目的形式投入现场。基于专家系统和优化算法的电网故障诊断方法是应用较多和实用化最好的两种算法, 此两算法理论上比较成熟, 尤其是基于专家系统的诊断模型是目前绝大多数工程实际的首选, 这是由其特点决定的, 但是其在实际中面临的维护困难、推理紊乱等不足尚难以逾越。基于遗传算法的电网故障诊断理论由浙江大学研发, 成功地应用于浙江省调度中心, 由于其本身原理上的先进性决定了工程实际中能较好地满足于需求, 且有着较

好的性能表现,但实现过程中,诊断数据库构建等环节比较繁琐困难。

两智能化方法的工程实现实例不仅仅对于电网故障诊断研究领域具有重要的推动作用,而且对于整个智能化研究领域也具有深远的意义。至于基于神经网络等其他智能诊断方法,其本身特点决定了实用化还有一定距离。今后,实用化方面应重视以下几个方面:专家系统和优化算法在实现中有机结合;诊断模块功能独立,不过分依赖于具体的区域电网参数设置;作为高级应用系统模块具备简单、标准的接口等。逐渐推动电网故障诊断子系统向产品化方向发展。

3.2 输电网故障诊断面临的问题

电网故障诊断因系统规模、系统复杂程度和不确定性等因素的限制,难于通过建立常规的数学模型来进行研究,基于智能化理论来实现故障诊断是必然,智能化诊断方法的实用化前景也比较明朗。纵观电网故障诊断的研究,虽然取得了许多卓有成效的成果,但如果以事故后分析提供帮助为目的,以诊断结果能够作为事故分析结论为目标来衡量的话,目前的诊断研究也存在着一些不足:早期文献研究的故障诊断方法大多立足于所依靠信息完全正确可信的基础上,未考虑信息传输中出现错误或不同信息相矛盾等实际中普遍存在的现象;现有故障诊断策略大都偏重于利用单个诊断对象的局部信息,如调度中心基于跳闸开关信息的故障诊断系统,变电站中基于保护装置动作信息的故障诊断系统等。未能从电网全局的角度来实现诊断,所以很难提供运行、检修人员可以直接采用的分析结论;较多的电网故障诊断研究仅立足于解决诊断中某个点,以及现有模型基础上引入新的智能算法,未能从建模上推进电网故障诊断研究的进步,所以有些问题不能根本性的解决。

影响和推动电网故障诊断理论发展的另一方面是诊断信息特征的变化。电力系统数字化、自动化、信息化建设的推进,尤其是故障信息系统的逐步完善,对于以故障分析为目的的电网故障诊断带来两个方面的推进:故障信息更加完备。故障信息最大的特点在于图4所示的层次性,信息的产生如图4所示方向由左(原因层)向右(后果层),现场故障分析流程一般按照从右向左方向逐级分析:确定跳闸开关→查看开关对应保护装置→查看分析对应设备、对应时间区间内的录波资料,最后达到故障原因或事件时序能够解释各层故障信息为本次事故分析

结束的标准。而且如果图中每个环节的可靠性都不为“1”的话(现场实际也是如此),则后果层的行为只能借助原因层来分析,如开关误动,保护原理性误动(变压器涌流现象导致保护误动,线路功率倒向导致保护误动等等)。因此,要获得理想的电网故障诊断结果需要各层故障信息,而所需的信息目前基本上都已数字化,可以通过现有系统获得;故障信息更加全面。高压电网系统故障后分析所需信息一般涉及多个厂站,如线路故障分析;如果出现其他异常现象(如开关拒动、保护误动等),则故障影响范围势必扩大,事故后分析将涉及更多的变电站,所以全局完备信息是实现理想电网故障诊断的前提条件,随着电力系统的信息化建设这方面条件已经基本上满足需求。

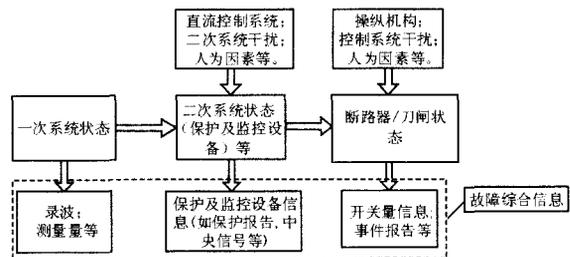


图4 诊断源信息层次结构示意图

Fig 4 Hierarchical structure of diagnosis original information

3.3 输电网故障诊断的研究发展方向

鉴于上述的诊断理论研究现状、诊断系统实现条件以及实际需求等各方面因素,以后的电网故障诊断研究应着重于:基于全局分层信息的电网故障诊断模型研究。如利用多代理(Multi-Agent)群智体理论来构建电网诊断模型的研究^[31],扬长避短采用多种智能诊断方法混合来实现电网故障诊断的研究等,毕竟电网故障诊断本身就是一个多层次、多种类问题的求解过程,采用单一方法很容易出现解决了某一问题的同时又带来新问题的现象,不利于整体诊断性能的提高;诊断知识提取(故障信息预处理)方面的研究,以适应海量故障信息、信息冗余,以及部分信息丢失或被噪音污染等特点,如诊断领域引入当前研究较热的数据挖掘理论、粗糙集理论等;目标于故障时序分析的电网故障诊断理论的研究。准确的故障时序分析,即故障过程的再描述(其中包含有保护、监控设备的动作行为),是事故分析结论的重要依据,对此方面的输入研究成果具有重要的理论价值和现实意义;电网故障诊断理论的实用化方面的研究,鉴于诊断理论大多基于智能化方法,所以实用化进程的推进不单对诊断领

域,对整个智能领域都具有重要意义。另外,关注智能及其他相关学科的发展,适时的引入新的研究成果。

4 结语

本文力图从众多的输电网故障诊断理论和方法的研究成果中,找出问题本质和关键之所在。在解构电网故障诊断问题的基础上,以诊断模型为分类基准综述了输电网故障诊断的研究成果和现状,分析了目前面临的问题,展示了研究发展方向。

电网故障诊断理论和方法的研究现状与现实现电网发展和需求的不一致性,导致了目前的诊断方法难以实用化,这也是目前电网故障诊断研究持续活跃的重要原因,立足于电网故障诊断的本质问题、做好实用化方面的研究必将推动整个领域的发展。

参考文献:

- [1] WEN Fu-shuan, HAN Zhen-xiang A Refined Genetic Algorithm for Fault Section Estimation in Power Systems Using the Time Sequence Information of Circuit Breakers [J]. Journal of Electric Machines & Power Systems, 1996, 24(8): 801-815.
- [2] WEN Fu-shuan, HAN Zhen-xiang Fault Section Estimation in Power Systems Using a Genetic Algorithm [J]. Journal of Electric Power Systems Research, 1995, 34(3): 165-172.
- [3] Wen F S, Chang C S A New Approach to Time Constrained Fault Diagnosis Using the Tabu Search Method [J]. Engineering Intelligent Systems, 2002, 10(1): 19-25.
- [4] 廖志伟,孙雅明. 基于事件序列数据挖掘原理的高压输电线路系统故障诊断(一,二) [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(4, 5): 22-27; 20-24.
LIAO Zhi-wei, SUN Ya-ming A New Data Mining Approach for Fault Diagnosis of HV Transmission Line System Based on Sequence of Events [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(4, 5): 22-27; 20-24.
- [5] Chantler M, Pogliano P, Aldea A. The Use of Fault-Recorder Data for Diagnosing Timing and Other Related Faults in Electricity Trans Networks [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(4).
- [6] 何赞峰,赵冬梅,高曙. 一种基于故障录波信息的电网故障诊断方法 [J]. 电网技术, 2002, 26(5): 39-43.
HE Zan-feng, ZHAO Dong-mei, GAO Shu A Power System Fault Diagnosis Method Based on Recorded Fault Data [J]. Power System Technology, 2002, 26(5): 39-43.
- [7] JUNG Juh-wan, LU Chen-ching, HONG Ming-guo Multiple Hypotheses and Their Credibility in On-line Fault Diagnosis [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 16(2).
- [8] CHEN Wen-Hui, LU Chih-wen, TSAI Men-shen On-Line Fault Diagnosis of Distribution Substations Using Hybrid Cause-effect Network and Fuzzy Rule-based Method [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(2).
- [9] Ouali M S, Ait-Kadi D, Rezn N. Fault Diagnosis Model Based on Petri Net with Fuzzy Colors [A]. Proceedings of the 24th International Conference on Computers and Industrial Engineering, 1999.
- [10] 束洪春,孙向飞,司大军. 基于粗糙集理论的配电网故障诊断研究 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 73-77.
SHU Hong-chun, SUN Xiang-fei, SIDa-jun A Study of Fault Diagnosis in Distribution Line Based on Rough Set Theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 73-77.
- [11] 廖志伟,孙雅明. 基于数据挖掘模型的高压输电线路系统故障诊断 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(15): 15-19.
LIAO Zhi-wei, SUN Ya-ming A New Data Mining Approach for Fault Diagnosis of High Voltage Transmission Line Based on Rough Set Theory [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(15): 15-19.
- [12] Lee Heung-jae, Ahn Bok-shin, Park Youngmoon A Fault Diagnosis Expert System for Distribution Substation [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(1).
- [13] Pietro B, Ulrico C G Fault Diagnosis Through History Reconstruction: an Application to Power Transmission Networks [J]. Expert Systems with Applications, 1997, 12(1): 37-52.
- [14] Narendra K G, Sood V K, Khorasani K Application of a Radial Basis Function (RBF) Neural Network for Fault Diagnosis in a HVDC System [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(1).
- [15] Sun Y, Jiang H, Wang D. Fault Synthetic Recognition for an EHV Transmission Line Using a Group of Neural Networks with a Time-space Property [J]. IEE Proc—Gener, Transm, Distrib, 1998, 145(3).
- [16] 段振国,高曙,杨以涵. 一种电网故障智能诊断求解模型研究 [J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(6): 399-402.
DUAN Zhen-guo, GAO Shu, YANG Yi-han A Diagnostic Reasoning Model for Power System Failures [J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(6): 399-402.
- [17] 史述红,杨宛辉,王克文. 城市 110 kV 电网故障元件的快速识别 [J]. 电网技术, 2001, 25(6): 37-40.
SHI Shu-hong, YANG Wan-hui, WANG Ke-wen Identif-

- fication of Faulty Components in 110 kV Urban Power Networks[J]. Power System Technology, 2001, 25(6): 37-40.
- [18] 赵爽, 任建文, 周明. 分层式电网故障诊断系统的设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(19): 65-68
ZHAO Shuang, REN Jian-wen, ZHOU Ming Design and Realization of a Delaminated Fault Diagnosis System for Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(19): 65-68
- [19] Fukui C, Kawakami J. An Expert System for Fault Section Estimation Using Information from Protective Relays and Circuit Breakers[J]. IEEE Trans on PWRD, 1986, 1(4): 83-90.
- [20] 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
LU Qing-song, XIA Dao-zhi Expert System of Power System Fault Diagnosis Based on Forward and Backward Reasoning[J]. Power System Technology, 1999, 23(9): 66-68
- [21] Park YM, Kim GW, Sohn JM. A Logic Based Expert System (LBES) for Fault Diagnosis of Power System[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1).
- [22] Aggarwal R K, Xuan Q Y, Johns A T. A Novel Approach to Fault Diagnosis in Multicircuit Transmission Lines Using Fuzzy ARTMap Neural Networks[J]. IEEE Trans on Neural Networks, 1999, 10(5).
- [23] HUANG Yann-chang Abductive Reasoning Network Based Diagnosis System for Fault Section Estimation in Power Systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17(2).
- [24] Davidson EM, McArthur SD J, McDonald J R. A Toolset for Applying Model-based Reasoning Techniques to Diagnostics for Power Systems Protection[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2).
- [25] Lo KL, Ng H S, Grant D M. Extended PetriNet Models for Fault Diagnosis for Substation Automation[J]. IEE Proc—Gener, Transm and Distrib, 1999, 146(3).
- [26] 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 Hong-shan, MI Zeng-qiang, et al Power System Fault Diagnosis by Use of Encoded PetriNet Models[J]. Power System Technology, 2004, 28(5): 64-68
- [27] Lo K, Ng H S, Trecat J. Power Systems Fault Diagnosis Using Petri Nets[J]. IEE Proceedings—Gener, Transm and Distrib, 1997, 144(5): 231-236
- [28] 孙静, 秦世引, 宋永华. 一种基于 Petri网和概率信息的电力系统故障诊断方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(13): 10-14
SUN Jing, QIN Shi-yin, SONG Yong-hua A Fault Diagnosis Method for Power Systems Based on Petri Nets and Probability Information[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(13): 10-14
- [29] WEN Fu-shuan, China C S Possibilistic Diagnosis Theory for Fault-Section Estimation and State Identification of Unobserved Protective Relays Using Tabu Search Method[J]. IEE Proceedings—Gener, Transm and Distrib, 1998, 145(6): 722-730
- [30] Lee Seung-jae, Choi Myeon-song, Kang Sang-hee. An Intelligent and Efficient Fault Location and Diagnosis Scheme for Radial Distribution Systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(2).
- [31] Hossack J A, Menal J, Stephen D J. A Multiagent Architecture for Protection Engineering Diagnostic Assistance[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2): 639-647.

收稿日期: 2005-04-08; 修回日期: 2005-05-12

作者简介:

毛鹏(1973-),男,博士,高级工程师,主要从事电力系统故障分析,微机保护及变电站综合自动化装置的研究和开发;E-mail: maopeng@jsepc.com.cn

许扬(1966-),男,高级工程师,从事继电保护、轴系扭振、仿真计算、电压稳定和超导无功补偿方面的研究。

Survey and development on fault diagnosis in power systems

MAO Peng^{1,2}, XU Yang¹, JIANG Ping²

(1. Jiangsu Provincial Electric Power R & D Center, Nanjing 210036, China;

2. Department of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In this paper, based on the deeply analysis of diagnosis information structure in power systems, study fruits within the domain at home and abroad are surveyed. And using a simple diagnosis example, the ideas and characteristics of several primary models for fault diagnosis are described and analyzed in detail. Based on the existing studying productions and combined with the developing actuality of many aspects power system and information technology, the existing study limitations are presented and the developing direction of fault diagnosis in power systems is analyzed.

Key words: fault diagnosis; expert system; optimization methods; power system