

基于贝叶斯网络和故障区域识别的电网故障诊断研究

何小飞, 童晓阳, 周曙

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 针对电网中因元件故障导致多个保护连锁动作的现象, 提出了基于故障区域识别和贝叶斯网络的新型电网故障诊断方法。以电网元件为根节点分别建立贝叶斯网络, 利用实时接线分析法确定故障区域以缩小诊断范围, 再对故障区域中各元件的贝叶斯网络, 利用反向推理得到各元件故障概率。结合 SCADA/RMS 系统信息, 正向推理和相应计算推断出故障元件、拒动与误动的保护装置及断路器。算例的仿真结果证明了该方法的有效性, 对于级联跳闸情况可准确诊断出故障。

关键词: 电网故障诊断; 贝叶斯网络; 故障区域识别; SCADA/RMS 系统; 级联跳闸

Power system fault diagnosis based on Bayesian network and fault section location

HE Xiao-fei, TONG Xiao-yang, ZHOU Shu

(Electrical Engineering Institute, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: To solve the problem of a number of components failure causing cascading protection actions, a new type of fault diagnosis method based on Bayesian network and fault identification is studied. First of all, the root nodes of Bayesian network based on the grid components are set up separately, a real-time analysis method is used to determine wiring fault diagnosis to narrow the scope of fault zones, and then, for the Bayesian network components in the fault zones, the reverse inference failure probability of all components is made. Combining with the system information from SCADA / RMS (relay management system), the forward reasoning and analysis calculation are made to infer the probability of maloperation and misoperation of protection and breaker. The simulation testing illustrates the reliability and effectiveness of the method and the method can make accurate diagnosis for cascading tripping.

Key words: power system fault diagnosis; Bayesian network; fault section location; SCADA/RMS system; cascading trip

中图分类号: TM734 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)12-0029-06

0 引言

随着电网规模的扩大和互联程度的提高, 故障诊断成为保证系统安全运行的重要手段, 故障元件的识别是其关键问题。目前, 尽管已有专家系统^[1-2]、人工神经网络^[3]、粗糙集^[4]等多种传统智能方法用于解决电网故障诊断, 但随着电网规模的日益扩大, 当电网出现异常尤其是复杂故障(如级联跳闸)时, 多个元件和保护动作, 加之保护和断路器的拒动与误动、信息缺失等不确定性因素给电网故障诊断带来难度, 传统智能故障诊断方法对这种不确定性就显得处理不够。

基于概率推理的贝叶斯网络应用于电网故障诊断, 能较好地弥补传统诊断技术在不确定性和容错处理的不足^[5-7]。文献[5]提出根据电网拓扑结构和保护装置的動作原理建立基于元件的诊断贝叶斯网络及其概率学习算法, 将 Agent 与贝叶斯网络结合,

但这种结合仅停留在系统框架层面, 没有实际算法的支持; 文献[6]由 Noisy-Or 和 Noisy-And 节点组成贝叶斯网络, 分别建立线路、变压器和母线等通用故障诊断模型, 但模型较简单, 不适用于结构复杂的电网; 文献[7]将主观贝叶斯方法应用到电网故障诊断, 既克服贝叶斯网络方法参数难以获得的问题, 又发挥贝叶斯网络在推理方面的优势, 但该方法在处理异常事件时可能出现组合爆炸问题。已有研究在每次发生故障时, 都是对整个电网进行推理与诊断, 无疑会影响诊断的精度和可靠性, 对保护和断路器的误动与拒动处理仍不够好。

本文提出基于贝叶斯网络的电网故障诊断方法, 与传统的贝叶斯网络故障诊断不同的是, 根据 SCADA (数据采集与监视系统) 和 RMS (保护信息管理系统) 中的断路器動作信息, 采用故障区域识别法确定故障目标区域, 将故障元件的诊断锁定在目标区域内, 从而缩小故障诊断范围。再利用断

路器位置信息和保护动作信息，送入贝叶斯网络进行反向推理来获得故障元件。为了抑制多种干扰因素可能造成的诊断不准确，对诊断结果做概率平抑的修正措施，再做正向推理以判断保护的误动与拒动。通过仿真实例验证了该诊断方法的有效性。

1 贝叶斯网络原理

贝叶斯网络是一个有向无环图，如图 1 所示。图 1 中每个节点表示所讨论问题域中的事件，节点之间的弧表示事件之间的概率依赖关系，使得不确定性推理在逻辑上更清晰、更容易理解^[1]。

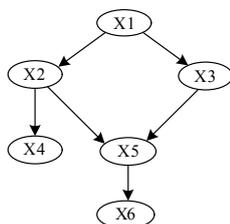


图 1 一个典型的贝叶斯网络
Fig.1 A typical Bayesian network

给定贝叶斯网络 $B = \langle B_s, B_p \rangle$ ，包含一组随机变量 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ ，其中： B_s 表示贝叶斯网络的结构，是一个具有 n 个节点的有向无环图，其中每个节点代表一个变量 X_i ，节点状态对应于变量值，有向边表示节点（变量）之间的条件（因果）依赖关系； B_p 表示贝叶斯网络的条件概率分布表（CPT）集合，每个变量 X_j 的条件概率分布为 $P(X_j | P_{at})$ ，其中： P_{at} 为 X_j 的父节点的集合。

贝叶斯网络提供了对域的完整描述，联合分布中的一般条目是对每个变量赋予一个特定值 P ，可使用 B_p 将网络中的概率信息计算出来。用符号 $P(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 作为联合概率的简化表示，则有：

$$P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(x_i | p_a(x_i)) \quad (1)$$

联合概率分布中的每个条目都可表示为 CPT 中适当元素的乘积。因此 CPT 提供了联合概率分布的一种分解表示方法。

2 电网故障区域的识别

2.1 故障区域识别的必要性

由于电网规模庞大、元件数量众多，如果每次故障诊断时都对电网内所有元件考虑进行分析，不仅没有必要，而且将遇到严重的速度问题。事实上电网发生故障后，与故障元件有关的继电保护和断路器会动作，将其与系统的健全部分隔离开形成停电区域，故障元件肯定在停电区域之中。这样，故

障元件的确定可局限于这些停电区域之内，由于每个停电区域内设备数一般不会超过 50 个^[2]，因此识别故障区域将大大缩小诊断规模、提高诊断速度。

2.2 故障区域识别原理

利用断路器的实时信息，采用实时接线分析方法识别故障前与故障平息后系统拓扑结构，比较这两个拓扑结构的差异，找到故障后形成的无源网络（可能是一个，也可能是多个），故障元件则肯定在这（些）个无源网络中，这里称这些无源网络为故障区域。在找到这（些）个目标区域后，故障元件的识别就可局限于这些区域中所包含的元件，这样就大大减少了诊断变量，大大提高了诊断速度。

如图 2 所示，由 SCADA/RMS 系统得到因故障致使 CB2、CB4、CB7、CB11、CB15、CB17 动作跳闸，由实时接线分析法可知，虚线所示区域与系统相互孤立，形成一个无源网络，因此可得知虚线网络即是所要找的故障目标区域，该区域中元件 T1、L1、T4 可能是故障元件，因此只需对上述三个元件的贝叶斯网络进行诊断即可，从而大大提高诊断效率。

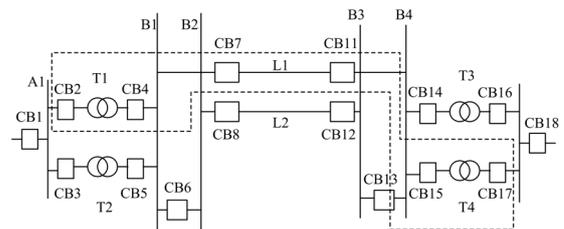


图 2 局部电网模型

Fig.2 Local power grid model in power system

3 基于贝叶斯网络的电网故障诊断

3.1 目前超高压电网保护配置和动作原理

本文侧重于输电网电网故障诊断研究，目前我国电网 220 kV 及以上输电线路主要采用的主保护是光纤电流差动保护，后备保护采用两端距离保护和零序过流保护。从图 3 中线路 L1 左端保护 L1Lm、L1Lp 和 L1Ls 来分析，其中 L1Lm 是主保护，即光纤电流差动保护，它只保护线路本身；L1Lp 是第一后备保护，它也保护线路全长，是主保护 L1Lm 的后备保护；L1Ls 是第二后备保护，它一般在相邻的元件故障下保护动作，当相邻元件（母线 C）故障下保护未动作时，L1Ls 作为后备保护动作切除故障。这三个保护动作后都是触发断路器 CB3 跳闸。

对于母线保护，差动保护是其主保护，只保护母线本身。变压器或线路后备保护是其后备保护。图 3 中 Cm 是母线保护，当母线 C 故障时，母线保护 Cm 动作触发继电器 CB2、CB4 和 CB5 跳闸。

对于元件节点的故障先验概率，通过一次设备年故障频率 μ 来计算^[8]。设备连续运行一段时间 t 后，发生故障的概率就是故障时间间隔为 t 的概率。

$$P\{T \leq t\} = 1 - e^{-\mu t} \quad (2)$$

式(2)中： T 是设备连续无故障运行的时间。以文献[9]中的数据为依据取 ω ，取 $t=0.5$ ，计算出元件节点的故障先验概率，如表1所示。

表1 元件故障的先验概率表

Tab.1 Prior fault probability of primary devices

元件	线路 (100 km)	母线 / 条	变压器 / 台
故障先验概率	0.390 4	0.018 5	0.011 8

对于保护节点，先计算保护拒动和误动概率，再根据保护原理确定条件概率。保护拒动概率可用拒动次数与要求动作次数之比来计算；保护误动概率可先计算出保护装置年平均误动频率 μ ，然后按照公式(2)来计算误动概率。以文献[8-9]中数据为依据，计算出继电保护的误动、拒动概率如表2所示。

表2 继电保护的误动、拒动概率表

Tab.2 Probability of maloperation and refuse operation of protection and breaker

故障概率	线路保护	母线保护	变压器保护	断路器
误动	0.008 5	0.002 2	0.003 9	0.026 8
拒动	0.001 9	0.018 5	0.027	0.014 5

保护节点的条件概率根据保护原理从保护拒动和误动概率计算获得。利用保护节点的条件概率具有相似性的特点，先确定几类关键继电保护节点的条件概率，然后相应获得所有节点的条件概率。

3.4 基于贝叶斯网络的故障推理

3.4.1 故障元件的确定

考虑到本文针对元件建立的贝叶斯网络模型，因此每一个电网元件只可能出现在自己的贝叶斯网络中，设经过反向推理得到的各元件故障概率为 a_n ($n=1,2,3,\dots$)，设定0.8作为元件正常故障的阈值，即若 a 的值满足下列条件：

$$a_n > 0.8 \quad (3)$$

则判定该元件为故障元件，否则为正常元件。

3.4.2 保护误动与拒动的确定

在推断出故障元件后，将故障概率带入各元件贝叶斯诊断网络进行正向推理，得到保护和断路器真实的动作概率，是由某一个元件故障得出其它误动作，考虑到 SCADA / RMS 系统中存在许多干扰信息，导致部分非故障诊断概率出现误差的现象，

因此又对这些元件概率进行修正。

设若非故障元件诊断故障概率大于0.5，则判定为概率为不准确概率，需要进行修正。

设故障区域中故障元件诊断概率小于0.5的概率值分别为 $\{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$ ，设需要修正的元件修正后的概率为 $\{b_1, b_2, b_3, \dots, b_m\}$ 。

$$b_1 = b_2 = b_3 = \dots = b_m = \frac{a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n}{n} \quad (4)$$

通过对这些不准确元件概率进行合理修正，保证了诊断的容错性，再将这些修正后的概率赋值到各元件的贝叶斯网络中用于正向推理。通过对各层的节点逐层修正和正向推理可得到各节点（各保护或断路器）贝叶斯网络诊断保护（断路器）的动作概率，如果某保护（断路器）同时出现在不同元件的贝叶斯网络节点中，那么取它们在各网络中所得动作概率的平均值。

设 m_1 为保护（断路器）实际动作概率，从 SCADA/RMS 系统直接读取。

$$\begin{cases} m_1 = 0 & \text{保护（断路器）实际未动作} \\ m_1 = 1 & \text{保护（断路器）实际动作} \end{cases} \quad (5)$$

设 m_2 为各保护（断路器）通过正向推理得到的动作概率。令 $\Delta m = m_1 - m_2$ ，则通过 Δm 的计算，根据下述判据得到保护（断路器）的诊断结果：

$$\begin{cases} \Delta m > 0.5 & \text{保护（断路器）误动} \\ -0.5 \leq \Delta m \leq 0.5 & \text{保护（断路器）正常} \\ \Delta m < -0.5 & \text{保护（断路器）拒动} \end{cases} \quad (6)$$

通过以上计算分析可得到出保护和断路器的误动、拒动的情况。

4 算例实例

本文采用贝叶斯网络仿真软件 GENIE 构建相应的贝叶斯网络，可获得图形化的贝叶斯网络拓扑结构、设置各节点的条件概率数据，进行推理计算。

以图3的电网模型为例进行实例推理。已知 SCADA/RMS 接收到的故障信息如表3所示。

1) 故障区域识别

由 SCADA / RMS 系统的信息，利用2.1节故障区域识别原理可得到故障区域（图3虚线框内区域），故障区域中的元件有 L1、L3、T1、T2、B1、B2。

2) 故障区域中各元件建模

对各元件建立相应的贝叶斯网络诊断模型。

3) 对于各贝叶斯网络模型中节点赋先验概率

利用3.3节贝叶斯网络赋值原理对各节点计算出先验概率并对各节点赋值。

表3 一种实际情景的故障信息表

Tab.3 Fault information table

序号	发生时间	故障通信内容	序号	发生时间	故障通信内容
1	13:00:02:508	T1 左侧主变差动	8	13:00:03:118	CB6 跳闸
2	13:00:02:600	CB2 跳闸	9	13:00:03:120	T2 过负荷保护启动
3	13:00:02:800	T1 右侧主变差动失灵启动	10	13:00:03:804	T2 左侧距离 II 段保护启动
4	13:00:03:028	B1 母线差动	11	13:00:04:090	CB3 跳闸
5	13:00:03:110	CB5 拒动	12	13:00:04:105	L1 右侧距离 II 段保护启动
6	13:00:03:112	CB7 跳闸	13	13:00:04:110	CB11 跳闸
7	13:00:03:116	CB9 跳闸			

4) 应用贝叶斯网络仿真软件 GENIE 分别对各网络进行诊断

可诊断得到线路 L1 的正常概率为 0.86, 故障概率为 0.14, 同理可得其它设备的故障概率。

5) 故障元件的确定

通过第 4 步得到故障元件概率如表 4 所示。

表4 故障元件概率表

Tab.4 Probability of fault components

元件	L1	L3	T1	T2	B1	B2
故障概率	0.14	0.58	0.85	0.63	0.91	0.04

由表 4 可知, T1 的故障概率大于 0.8, 所以推断出 T1 是故障元件。

6) 保护误动、拒动的确定

根据 3.4.2 节, 由于非故障元件 L3、T2 的故障概率大于 0.5, 因此需要对两元件的故障概率进行修正, 设 L3、T2 修正后的故障概率分别为 b_1 、 b_2 , L3、B2 的故障概率分别为 a_1 、 a_2 、 a_3 。则:

$$b_1 = b_2 = \frac{a_1 + a_2 + a_3}{3} = \frac{0.14 + 0.04}{2} \approx 0.09$$

将元件故障概率带入各元件贝叶斯网络中通过正向推理, 得到各保护 (断路器) 的动作概率, 如表 5 所示。将表 5 中的 Δm 代入 3.4.2 节的判定规则, 得到最终的诊断结果, 如表 6 所示, 该诊断结果是正确的, 其容错性更强。

表5 正向推理诊断得到的保护 (断路器) 动作概率

Tab.5 Forward reasoning on action probability of the protections (breakers)

保护(断路器)	m_1	m_2	Δm	保护(断路器)	m_1	m_2	Δm
L1Lm	0	0.32	-0.32	T2Lm	0	0.24	-0.24
L1Rm	0	0.42	-0.42	T2Rm	0	0.25	-0.25
L1Lp	0	0.25	-0.25	T2Lp	0	0.28	-0.28
L1Rp	0	0.27	-0.27	T2Rp	0	0.33	-0.33
L1Ls	0	0.41	-0.41	T2Ls	1	0.41	0.59
L1Rs	1	0.38	0.62	T2Rs	0	0.31	-0.31
L3Lm	0	0.47	-0.47	B1m	1	0.74	0.26
L3Rm	0	0.45	-0.45	B2m	1	0.65	0.35
L3Lp	0	0.14	-0.14	CB2	1	0.75	0.25
L3Rp	0	0.15	-0.15	CB3	1	0.58	0.42
L3Ls	0	0.19	-0.19	CB4	0	0.64	-0.64
L3Rs	1	0.47	0.53	CB5	0	0.56	-0.56
T1Rm	0	0.64	-0.64	CB6	1	0.59	0.41
T1Lm	1	0.67	0.33	CB7	1	0.67	0.33
T1Lp	0	0.35	-0.35	CB8	0	0.35	-0.35
T1Rp	0	0.72	-0.72	CB9	1	0.73	0.27
T1Ls	0	0.41	-0.41	CB11	1	0.71	0.29
T1Rs	0	0.09	-0.09	CB28	1	0.68	0.32

表6 故障诊断结果表

Tab.6 Fault diagnosis results of table

故障元件	误动保护及断路器	拒动保护及断路器
B1、T1	T2Ls、L1Rs、L3Rs	T1Rm、T1Rp、CB4、CB5

5 结论

本文结合故障区域识别法, 依据元件、保护及其关系, 给出电网元件故障诊断贝叶斯网络模型, 实现了电网故障诊断。该方法先通过识别故障区域合理缩小诊断范围, 有效提高诊断速度和精度; 采用阈值判据来判定元件故障, 对于单一元件故障和多个元件故障导致的级联跳闸均能有效诊断; 对反向推理得到的故障元件概率做合理修正, 有效解决 SCADA / RMS 系统因干扰信息导致误判的情况, 保证了诊断的容错性。仿真结果表明, 提出的电网故障诊断方法简单有效, 对于级联跳闸可准确诊断出故障, 从而为操作运行人员提供了参考的依据。

参考文献

- [1] 赵冬梅, 张东英, 徐开理, 等. 分层分布式电网故障诊断专家系统设计[J]. 现代电力, 2004, 8(3): 41-46.
ZHAO Dong-mei, ZHANG Dong-ying, XU Kai-li, et al. Design of delaminated and destributed fault diagnosis

- expert system for power system[J]. Modern Electric Power, 2004, 8 (3): 41-46.
- [2] 朱永利, 张文勤, 高曙. 电力系统故障判断专家系统[J]. 华北电力大学学报, 2005, 12 (1): 1-6.
ZHU Yong-li, ZHANG Wen-qin, GAO Shu. Power system fault diagnosis expert system[J]. North China Electric Power University, 2005, 12 (1): 1-6.
- [3] 毕天姝, 倪以信, 吴复立. 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 Tian-shu, NI Yi-xin, WU Fu-li. New neural network-based fault diagnosis method[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (2): 73-78.
- [4] 张耀天, 何正友. 基于粗糙集理论和朴素贝叶斯网络的电网故障诊断[J]. 电网技术, 2007, 12 (7): 14-19.
ZHANG Yao-tian, HE Zheng-you. Study on power grid fault diagnosis method based on rough set theory and naive Bayesian networks[J]. Power System Technology, 2007, 12 (7): 14-19.
- [5] 吴欣, 郭创新. 基于贝叶斯网络的电力系统故障诊断方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17 (4): 11-15.
WU Xin, GUO Chuang-xin. Power system fault diagnosis approach based on Bayesian network[J]. Proceedings of the EPSA, 2005, 17 (4): 11-15.
- [6] 霍利民, 朱永利, 贾兰英, 等. 基于贝叶斯网络的电网故障诊断方法[J]. 华北电力大学学报, 2004, 31 (3): 30-34.
HUO Li-ming, ZHU Yong-li, JIA Lan-ying, et al. Power system fault diagnosis based on Bayesian network [J]. North China Electric Power University, 2004, 31 (3): 30-34.
- [7] 李强, 徐建政. 基于主观贝叶斯方法的电力系统故障诊断[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (15): 46-50.
LI Qiang, XU Jian-zheng. Power system fault diagnosis based on subjective Bayesian approach[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (15): 46-50.
- [8] 周玉兰, 王俊永, 等. 2002年全国电网继电保护与安全自置运行情况[J]. 电网技术, 2003, 27 (9): 55-60.
ZHOU Yu-lan, WANG Jun-yong, et al. Relay protection and security to the national grid operation of home in 2002[J]. Power System Technology, 2003, 27 (9): 55-60.
- [9] 吴玉鹏, 陈丽鹃, 等. 2002年全国电力可靠性统计分析[J]. 中国电力, 2002, 36 (5): 1-7.
WU Yu-peng, CHEN Li-juan, et al. Statistical analysis of the national electric reliability in 2002[J]. Electric Power, 2002, 36 (5): 1-7.
- [10] 周兆庆. 基于SCADA及保护信息系统的输电网故障诊断(硕士学位论文)[D]. 南京: 河海大学, 2005.

收稿日期: 2009-08-05; 修回日期: 2009-10-29

作者简介:

何小飞 (1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电网故障诊断; E-mail: phllip_cd@qq.com

童晓阳 (1970-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为智能Agent、信息技术及其在电力系统的应用、变电站自动化;

周曙 (1980-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为人工智能在电力系统故障诊断中的应用。

(上接第 28 页 continued from page 28)

- ZHOU Hai-qiang, JU Ping, KONG De-chao, et al. Application of clustering method based on electromechanical distance between different units in power systems dynamic equivalent[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (3): 14-17.
- [12] Ju P, Ni L Q, Wu F. Dynamic equivalents of power systems with on-line measurements, part I: theory[J]. IEE Trans on Proc Gen, 2004, 151 (2): 175-178.
- [13] Ju P, Wu F, Yang N G, et al. Dynamic equivalents of power systems with on-line measurements, part II: applications[J]. IEE Trans on Proc Gen, 2004, 151 (2): 179-182.
- [14] 胡杰, 余贻鑫. 电力系统动态等值参数聚合的实用方法[J]. 电网技术, 2009, 30 (24): 24-30.
- HU Jie, YU Yi-xin. Practical method to parameter aggregation of power system dynamic equivalent[J]. Power System Technology, 2009, 30 (24): 24-30.
- [15] Kundur P. Power system stability and control[M]. McGraw-Hill Companies Inc, 1994.

收稿日期: 2009-08-01; 修回日期: 2009-09-03

作者简介:

孙素琴 (1971-), 女, 高级工程师, 副总工程师, 主要研究方向为电力系统运行分析与控制; E-mail: sunsuqin@x263.net

蒋周士 (1977-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统动态等值;

周海强 (1971-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统稳定与控制。