

基于模型预测和溯因推理网络的电网故障诊断方法

刘晓琴, 王大志, 张翠玲, 宁 一

(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 考虑电网出现故障时, 仅依靠开关量状态信息进行诊断, 诊断信息冗余度低, 复杂故障情况下会影响诊断结果的准确性. 引入电气量信息, 提出了模型预测和数据清洗方法, 建立电网故障诊断系统. 利用模型预测得到准确的电气量信息, 建立清洗规则和逻辑推理规则, 分别对开关量进行数据清洗和验证故障信息. 在此基础上, 利用溯因推理网络 (abductive reasoning network, ARN) 对故障信息进行诊断, 得出候选故障. 仿真结果验证了该方法的有效性和准确性.

关 键 词: 故障; 诊断; 数据清洗; 模型预测; 溯因推理网络

中图分类号: TP 277 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2016)04-0472-06

Method of Power Grid Fault Diagnosis Based on Model Prediction and Abductive Reasoning Network

LIU Xiao-qin, WANG Da-zhi, ZHANG Cui-ling, NING Yi

(School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China.

Corresponding author: LIU Xiao-qin, E-mail: qinbuluoge@163.com)

Abstract: Considering the power grid fault, the diagnostic information redundancy is low based only on protective relays and circuit breakers (switch) for diagnosis, and the accuracy of diagnosis will be affected under complex fault cases. The electric data information was introduced to propose the model prediction and data cleaning method, as well as to establish the power network fault diagnosis system. By using the model to predict the electric quantity information accurately, the cleaning rules and the logical inference rules were established, and the data cleaning and verification of the switch were carried out respectively. On this basis, the abductive reasoning network (ARN) was used to diagnose the fault information, and the candidate faults were obtained. The simulation results verified the validity and accuracy of this method.

Key words: fault; diagnosis; data cleaning; model prediction; abductive reasoning network

电网故障诊断中采用开关量信息作为故障信息, 开关量信息在精确度、容错性等方面的优势不如电气量. 文献[1-4]在开关量信息的基础上, 计及保护、断路器开关信息的时序特性、关联特性等, 对于复杂故障, 特别是故障信息丢失、畸变, 诊断结果准确性不高. 将开关量和电气量进行信息融合, 利用不同数据源的优势, 提高信息的冗余度. 文献[5-6]提出基于 WAMS 的电力系统故障诊断方法, 用故障发生后的电气量信息构造识别故障位置的判据, 分析保护和断路器的误动/拒

动情况. 文献[7]提出一种利用 WAMS 信息进行快速故障诊断的方法, 将广域同步信息和开关变位信息相结合进行推理判断, 识别故障.

本文提出模型预测和数据清洗相结合的方法, 采用溯因推理网络建立诊断系统, 处理断路器状态和相应的故障候选区之间的复杂关系. 采用小波神经网络方法预测电网的电气量, 与实际检测的电气量进行对比, 防止检测的电气量畸变. 诊断系统收到的开关量信息可能存在拒动、误动, 甚至是信息缺失、畸变等情况, 采用电气量信息建立

收稿日期: 2015-03-08

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51207069); 辽宁省科技创新重大专项(201309001).

作者简介: 刘晓琴(1975-), 女, 辽宁辽阳人, 东北大学博士研究生; 王大志(1963-), 男, 辽宁锦州人, 东北大学教授, 博士生导师.

逻辑推理准则,清洗开关信息.

1 诊断系统结构

利用电气量信息建立逻辑推理规则,对故障诊断系统收到的保护、断路器动作情况进行判断,若正确则传给溯因推理网络进行诊断;若出现错误,则根据电气量判据纠正或补充.故障诊断系统如图1所示.

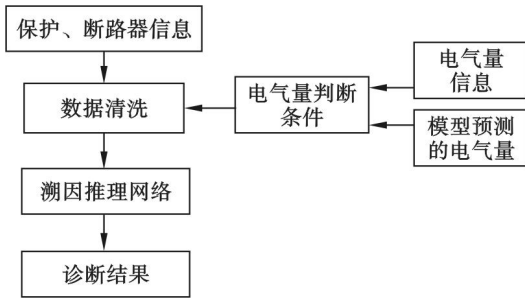


图1 诊断系统

Fig. 1 Schematic diagram of diagnosis system

2 基于小波神经网络的模型预测

由于环境恶劣,电网数据检测系统中,存在各种噪声源,根据噪声源的物理特性和数学特性,利用电网电压、电流数据作为小波神经网络的输入,预测电网下一步运行时的数据,与实际测量值相比,得到准确的电压和电流数据,模型结构如图2所示.

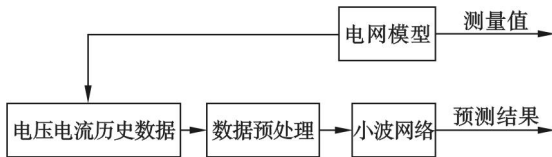


图2 模型预测结构

Fig. 2 Schematic diagram of model prediction structure

小波网络有三层结构:输入层、隐层和输出层,两步学习过程.网络采用改进BP算法训练,一是增加动量项,二是引入自适应学习速率.由小波网络的模型可得^[8]

$$O_j^p(k) = f \left(\sum_{h=1}^H w_{jh} \psi \left[\frac{\left(\sum_{i=1}^I w_{hi} x_i^p(k) + \theta_h \right) - b_h}{a_k} \right] \right) + \theta_j. \quad (1)$$

式中: θ_h 是隐层第 h 个节点的阈值; θ_j 是输出层第 j 个节点的阈值; P 为输入样本总数; O_j^p 为网络输出层第 j 个节点、第 $p(p=1,2,\dots,P)$ 个样本的输出.令其目标输出值为 \hat{O}_j^p ,误差能量函数定义

为

$$E_{\text{总}} = \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J (O_j^p - \hat{O}_j^p)^2. \quad (2)$$

3 数据清洗

数据清洗是发现和清除单个数据源中的错误数据和不一致信息^[9].清洗包括数据检查、定义清洗规则、清洗规则评估和执行清洗规则4个基本阶段.在电网故障诊断中,把电气量判据作为清洗规则,评估数据.

3.1 电气量判断条件

断路器正常断开,状态为1,故障切除后一侧带电、一侧停电;若断路器无法可靠断开,出现拒动情况,状态为0,可根据断路器两端的带电状况确定实际状态.图3中假设线路L1发生故障,断路器CB1拒动,上传错误信息,为了纠正错误,用CB1两侧的电气量特性判断.理论上故障切除后,母线A1电压降为0,用 U_1 表示故障切除后测量的母线电压, U_{yc} 为预测值, U_{set} 为事先设定的判断阈值,则判断母线侧停电的依据为

$$|U_1| < U_{\text{set}}, |U_{yc}| < U_{\text{set}}. \quad (3)$$

同理,也可以通过电流信息进行判断.根据式(3)和式(4),判断CB1两侧的带电情况.当一侧带电,另一侧不带电,CB1应断开.同理也可判断断路器误动情况.当电压、电流测量出现问题时,模型预测出电网运行时电气量,再通过电压与电流极性判断.

$$|I_1| < I_{\text{set}}, |I_{yc}| < I_{\text{set}}. \quad (4)$$

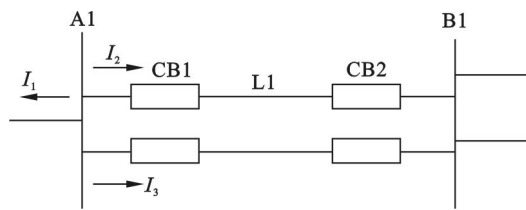


图3 简单故障

Fig. 3 Schematic diagram of simple fault

3.2 数据清洗流程

电网发生故障时,检查保护、开关量状态,借用文献[7,10-11]中的电气量判据,归纳出数据清洗过程.

1) 基于线路一端电压电流正序故障分量的电气量判断条件:

$$-\alpha < \arg\left(\frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_1}\right) < 180^\circ - \alpha. \quad (5)$$

式中: \dot{I}_1 和 \dot{U}_1 表示线路一侧量测到的电流和电

压正序故障分量; $\arg(\cdot)$ 表示 2 个相量间的相位差; α 表示功率方向继电器的内角, 取 $\alpha = 0^\circ$ [10].

当线路发生故障时, 式(5)表示为 $0^\circ < \arg(\frac{I_1}{U_1}) < 180^\circ$.

2) 基于线路两端故障电流的电气量判断条件. 线路两端故障相电流相位满足 [7]

$$-90^\circ < \arg(\frac{I_1}{I_3}) < 90^\circ. \quad (6)$$

式中: I_1 和 I_3 分别为线路两端相量测量单元测量到的故障相的故障电流.

3) 基于流入母线电流和的电气量判断条件. 母线正常运行时, 母线上所有元件的电流满足基尔霍夫电流定律. 母线发生故障时, 流入母线的电流之和等于故障点的短路电流(根据基尔霍夫电流定律) [7, 10]. 假设母线 A1 故障, 则

$$|I_1 + I_2 + I_3| > I_{\text{set}}. \quad (7)$$

式中 I_{set} 是设定的接近 0 的电流阈值. 式(7)对应三相电流, 且与相应母线连接的元件电流都要计算.

4) 溯因推理网络. 溯因推理网络是一个分层网络, 由简单低阶多项式构成多层节点函数, 用来模拟高度非线性故障诊断问题 [12]. 溯因推理网络是一个带有前馈函数节点的分层网络, 结构如图 4 所示 [13]. 参数、数量、类型和函数节点的连接权值源自于训练数据. 图 4 中 ARN 由 7 个类型节点构成, 三阶多项式分别含有一次、二次、三次多项式, 即表示分别含有 1 个、2 个或 3 个输入, 三重节点的代数形式为

$$\text{output} = w_0 + w_1 x_1 + w_2 x_2 + w_3 x_3 + w_4 x_1^2 + w_5 x_2^2 + w_6 x_3^2 + w_7 x_1 x_2 + w_8 x_1 x_3 + w_9 x_2 x_3 + w_{10} x_1 x_2 x_3 + w_{11} x_1^3 + w_{12} x_2^3 + w_{13} x_3^3. \quad (8)$$

式中: w_i 为训练参数; x_i 为输入变量.

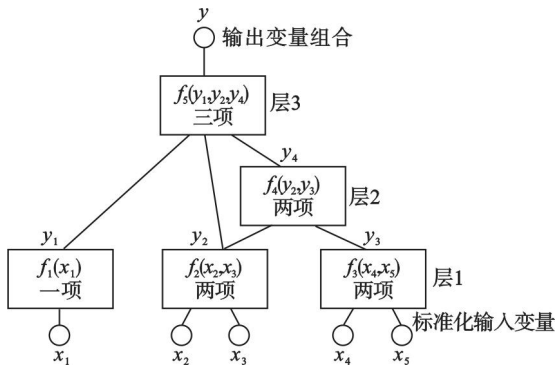


图 4 溯因推理网络结构

Fig. 4 Schematic diagram of abductive reasoning network structure

其他参数描述如下:

1) 正规化子: 正规化子把原始输入变量转换成零均值方差, 使用标准差正态化.

$$\text{output} = w_0 + w_1 x_1. \quad (9)$$

2) 输出:

$$\text{output} = w_1 x_1 + w_2 x_2 + \cdots + w_i x_i. \quad (10)$$

3) 单位化: 单位化指把网络的输出序列转换成与之对应的输出值的均值和方差, 用来训练网络.

$$\text{output} = w_0 + w_1 x_1. \quad (11)$$

4) 线元素: 通过最小预测方差模型标准, ARN 会自动确定最佳网络结构、节点类型、参数和连接权值 [14].

$$\text{PSE} = \text{FSE} + \text{OP} = \text{FSE} + C \times \frac{2K}{N} \sigma^2. \quad (12)$$

式中: PSE 为模型的预测误差平方; FSE 为拟合方差; OP 为过度拟合处罚; C 为由使用者指定的复杂处罚乘数; K 为模型的参数总和或模型复杂性的隐含值; N 为训练数据的数量; σ^2 为一个先验估计模型的误差方差.

溯因推理网络的运行步骤如下:

1) 节点生成: 生成第 j 层中间节点函数, 需考虑所有输入变量组合, 节点函数包括 1 个、2 个或者 3 个输入变量. 多项式函数的参数通过多元回归技术估计 [14].

2) 节点排序和选择: 根据式(12)中 PSE 值, 评定中间节点函数. PSE 值小的函数具有更高的优先级. 网络中包含选择优先级高的功能, 表明 PSE 最小值在当前第 j 层, 记作 PSE_{\min}^j .

3) 确定下一层: 转到步骤 1), $j = j + 1$, 重复生成中间节点函数的排名和选择, PSE_{\min}^{j+1} 表示第 $j+1$ 层 PSE 的最小值.

4) 停止运行: 如果 $\text{PSE}_{\min}^{j+1} > \text{PSE}_{\min}^j$, 则停止, 否则去下一层, 重复步骤 1) ~ 4). 当停止规则满足, 自动建立 ARN.

4 仿真分析

4.1 电力系统模型

把模型预测和溯因推理网络方法在电力系统模型中进行测试, 电网示意图如图 5 所示 [12]. 电力系统含有 28 个元件 ($S1 \sim S28$)、40 个断路器 ($C1 \sim C40$) 和 84 个保护. 84 个保护中包括 36 个主保护 ($Rm1 \sim Rm36$), 48 个后备保护 ($R37 \sim R84$), 其中 24 个第一后备保护, 24 个第二后备保护. 图 5 中各部分名称如下所示. A 和 B: 母线; T: 变压器; L: 线路. 28 个元件: $A1, \dots, A4; B1, \dots,$

B8;T1,⋯,T8;L1,⋯,L8. 40 个保护: CB1,CB2,⋯,CB40. 36 个主保护: A1m,⋯,A4m;B1m,⋯,B8m;T1m,⋯,T8m;L1Sm,L1Rm,⋯,L8Sm,L8Rm. m:主保护. S:线路发送端. R:线路接收端. 48 个后备保护:L1Sp,L1Rp,⋯,L8Sp,L8Rp;T1p,⋯,T8p;L1Ss,L1Rs,⋯,L8Ss,L8Rs;Tls,⋯,T8s.

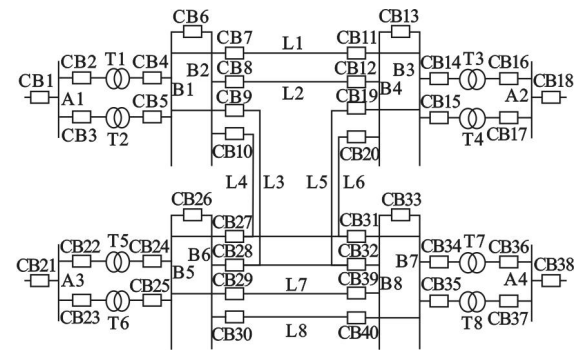


图 5 电网示意图
Fig. 5 Connection diagram of power grid

系统的诊断过程如图 6 所示. 小波神经网络的隐含层采用 5 个节点,其中学习率 η_m 分别取 0.1,0.105,0.11,0.102,0.1,动量因子 α_n 分别取 0.935,0.94,0.93,0.945,0.945. ARN 采用三层结构,惩罚因子 C 根据经验取 1.

4.2 仿真结果分析

算例 1 A3 故障发生,T5s 和 T6s 动作,故障区域由断路器 CB22,CB23,CB24,CB25 跳闸形成. 故障区域中,元件 A3,B5,B6 需要进行故障诊

断,编号为 S1~S3. 断路器 CB21~CB30 编号为 $c_1 \sim c_{10}$. A3m,B5m,B6m,T5S,T6S 保护编号为 $r_1 \sim r_5$. 保护、断路器实际状态向量为

$$c=[c_1\ c_2\ c_3\ c_4\ c_5\ c_6\ c_7\ c_8\ c_9\ c_{10}]=[0\ 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]$$
 (13)

保护实际状态向量为

$$R=[r_1\ r_2\ r_3\ r_4\ r_5]=[0\ 0\ 0\ 1\ 1]$$
 (14)

按照逻辑推理准则,实际状态正确,仿真结果见表 1. 若考虑一个断路器 CB22 拒动时,仿真结果见表 2,结果出现误判,根据式(5)~式(7),判定断路器 CB22 实际状态为 1.

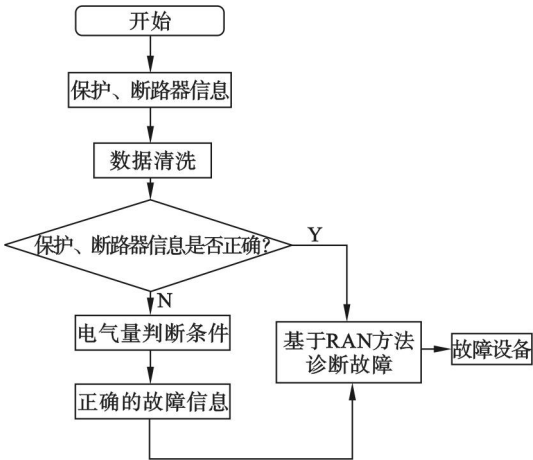


图 6 故障诊断流程
Fig. 6 Schematic diagram of fault diagnosis process

表 1 算例 1 的 ARN 仿真结果 1

Table 1 ARN simulation results 1 of example 1														$\times 10^3$	
A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	T1	T2		
-0.406	0.947	0.999	0.044	0.955	0.014	0.300	0.153	0.324	1.058	0.579	0.192	-0.111	-0.130		
T3	T4	T5	T6	T7	T8	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8		
0.168	0.007	-0.215	0.619	0.157	0.274	-0.495	0.623	-1.015	0.397	-0.612	-0.721	0.354	-0.756		

表 2 算例 1 的 ARN 仿真结果 2

Table 2 ARN simulation results 2 of example 1															
A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	T1	T2		
-0.207	0.319	1.627	0.298	0.376	0.353	-0.978	0.094	0.495	-0.846	0.914	0.191	-0.268	-0.488		
T3	T4	T5	T6	T7	T8	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8		
-0.800	0.033	-0.276	-0.439	0.016	-0.278	-0.197	-0.502	-0.750	-0.443	-0.270	0.560	-0.183	0.747		

算例 2 A1,B1,B2,L3 故障同时发生,一个断路器状态错误. T1S,L1RS,L2RS,L3Rp,L4Rs 动作,断路器 CB1,CB2,CB3,CB4,CB5,CB9,CB11,CB12,CB28,CB27 跳闸,元件 A1,B1,B2,L1,L2,L3,L4,T1,T2 需要进行故障诊断. 14 个断路器分

别为 CB1,CB2,CB3,CB4,CB5,CB6,CB7,CB8,CB9,CB10,CB11,CB12,CB27,CB28. 33 个保护分别为 A1m,B1m,B2m,T1m,T2m,L1Rm,L1Sm,L2Rm,L2Sm,L3Rm,L3Sm,L4Rm,L4Sm,L1Sp,L1Rp,L2Sp,L2Rp,L3Sp,L3Rp,L4Sp,L4Rp,T1p,

T2p, L1Ss, L1Rs, L2Ss, L2Rs, L3Ss, L3Rs, L4Ss, L4Rs, T1s, T2s. 故障发生后,保护、断路器实际状态向量为

$$\boldsymbol{c} = [c_1, c_2, \cdots, c_{13}, c_{14}] = [1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1] . \tag{15}$$

保护实际状态向量为

$$\boldsymbol{R} = [r_1, r_2, r_3, \cdots, r_{32}, r_{33}] =$$

$$[0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1] . \tag{16}$$

断路器状态量正确时的诊断结果见表 3. 考虑断路器 CB2 拒动时,仿真结果见表 4,结果出现误判,根据式(5) ~ 式(7),判定断路器 CB22 实际状态为 1.

表 3 算例 2 的 ARN 仿真结果 1

Table 3 ARN simulation results 1 of example 2													$\times 10^3$
A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	T1	T2
999	1	-1.46	-0.003	1001	999	0.345	0.088	0.186	2.120	1.020	0.215	-1.730	-1.190
T3	T4	T5	T6	T7	T8	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8
-0.033	-9.318	-0.395	1.190	0.275	0.310	-0.562	-1.410	999	0.247	-0.901	-0.778	0.629	-1.030

表 4 算例 2 的 ARN 仿真结果 2

Table 4 ARN simulation results 2 of example 2													
A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	T1	T2
1.945	0.335	1.276	0.380	1.157	0.745	-0.348	1.212	0.221	0.273	1.084	-0.442	-0.078	0.556
T3	T4	T5	T6	T7	T8	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8
-0.281	0.338	-0.263	0.316	-0.943	-0.490	-0.439	-0.192	0.945	-0.390	0.159	0.030	0.549	0.122

5 结 论

本文提出的对开关量状态校验的电网故障诊断方法是一种尝试,开关量和电气量信息共同作为故障诊断的信息源,增强信息源的冗余度. 提出的模型预测方法,提高了电气量信息的准确性. 通过算例仿真,提出的电网故障诊断方法能够处理断路器信息误动、拒动等问题. 考虑实际电力系统的继电保护和安全自动装置情况,提出的诊断方法有待进一步研究.

参考文献:

[1] 刘道兵,顾雪平,李海鹏. 电网故障诊断的一种完全解析模型[J]. 中国电机工程学报,2011,31(1):85-91.
(Liu Dao-bing, Gu Xue-ping, Li Hai-peng. A complete analytic model for fault diagnosis of power systems[J]. *Proceedings of the CSEE*,2011,31(1):85-91.)

[2] Guo W X, Wen F S, Ledwich G, et al. An analytic model for fault diagnosis in power system considering malfunctions of protective relays and circuit breakers taken into account[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*,2010,25(3):1393-1401.

[3] Wei L H, Guo W X, Wen F S, et al. An on-line intelligent alarm processing system for digital substations[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*,2011,26(3):1615-1624.

[4] Sun J, Qin S Y, Song Y H. Fault diagnosis of electric power systems based on fuzzy Petri nets[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*,2004,19(4):2053-2059.

[5] Chantler M, Pogliano P, Aldea A, et al. The use of fault-recorder data for diagnosing timing and other related faults in electricity transmission network[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*,2000,15(4):1388-1393.

[6] Novosel D, Bartok G, Henneberg G, et al. IEEE PSRC report on performance of relaying during wide-area stressed condition[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*,2010,25(1):3-16.

[7] 戴志辉,李强. 基于停电区域及广域同步信息的电网故障快速诊断研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(12):50-53.
(Dai Zhi-hui, Li Qiang. Fault diagnosis based on power failure zone and wide-area synchronization information[J]. *Power System Protection and Control*, 2010, 38 (12): 50-53.)

[8] 刘晓琴,王大志,张翠玲,等. 基于遗传小波神经网络的电网故障诊断方法研究[J]. 石油化工高等学校学报,2013,26(6):78-82.
(Liu Xiao-qin, Wang Da-zhi, Zhang Cui-ling, et al. Fault diagnosis approach of power grid based on genetic wavelet neural network[J]. *Journal of Petrochemical Universities*, 2013,26(6):78-82.)

[9] Rahm E, Do H H. Data cleaning: problems and current approaches[J]. *IEEE Data Engineering Bulletin*, 2000, 23 (4):3-13.

(下转第 480 页)