

文章编号: 1002-0411(2004)06-0740-05

基于 Petri 网的变电站故障诊断方法

张明锐¹, 徐国卿¹, 贾廷纲²

(1. 同济大学电子与信息工程学院, 上海 200331; 2. 上海继电器有限公司, 上海 200092)

摘要:为提高配置多级继电保护的变电站故障诊断的效率, 本文以 Petri 网络模型中变迁矢量的不同权重表示继电保护配置的级别, 使得诊断结果中产生对应继电器和断路器信号的特定诊断标志, 从而增强了故障信号的识别能力. 诊断过程通过单向矩阵运算实现. 真实变电站故障诊断仿真过程表明, 该方法运算速度快, 诊断正确率高.*

关键词:变电站; 故障诊断; Petri 网; 变迁矢量权重

中图分类号: TP271

文献标识码: B

Substation Fault Diagnosis Using Petri Net

ZHANG Ming-rui¹, XU Guo-qing¹, JIA Ting-gang²

(1. School of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 200331, China;

2. Shanghai Relay Company Limited, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of the substation fault diagnosis with multiple protections, the proposed method describes protection grades by varied weights of the transition vector in the Petri net models. According to relays and circuit breakers, special markings are produced in the diagnosis results that enhance the identifying capability of error information. The process of fault diagnosis is accomplished by algebra matrixes calculation. An simulation on actual substation fault diagnosis process indicates that the improved method has fast calculation speed and high veracity.

Keywords: substation; fault diagnosis; Petri net; weight of transition vector

1 引言 (Introduction)

不论是日益扩大的电力系统自身, 还是现代生活对电能的高度依赖, 都要求供电系统具有高度的可靠性. 为此, 各种先进的装置和手段, 包括微机继电保护、备用电源自动投入装置、变电站监控和数据采集系统 (SCADA)、各级监控中心等等, 不断地用于各级输配电系统. 然而, 电力系统的故障是不可避免的. 所以, 在电力系统发生故障时, 如何利用这些自动装置所提供的信息来查找故障点、识别故障类型以实现快速检修和恢复供电, 就显得十分重要. 与此相关的方法统称为电力系统故障诊断技术, 它已经成为电力系统的一个重要研究领域, 受到国内外学者的广泛关注.

目前用于电力系统故障诊断的方法主要有基于人工智能技术的人工神经网络、专家系统、遗传算

法、模糊理论等. 这些方法从不同的途径解决了故障诊断的相关问题, 但是, 在实际的工程应用上都会遇到很多困难^[1,2]. 而文献^[3]所提出的以 Petri 网络理论为工具的电力系统故障诊断方法, 以静态的图形网络表示故障点与继电器和断路器之间的逻辑关系, 利用简单的矩阵运算演绎故障诊断的动态行为过程. 整个系统物理概念清晰, 表达方式形象, 求解速度快, 可用于实时诊断. 国外已经有人利用 Petri 网络进行变电站故障诊断的工程实践^[4], 在国内, 对于利用 Petri 网络进行变电站故障诊断的研究刚刚起步, 主要集中在理论仿真方面, 实际工程应用的研究还未深入^[5-7]. 变电站是电力系统的主要构成部分, 也是故障易发地, 提高变电站的故障诊断水平对于提高电力系统的运营效率具有重要的意义.

本文提出的诊断模型充分考虑变电站继电保护配置的多重性, 在变迁集不变的情况下, 通过变迁矢

量的权表示继电保护的配置级别.诊断结果除可以实现故障定位外,还可以确定继电器和断路器动作的正确性,针对其拒动和误动,都有特定的诊断标志.诊断过程只有后向运算,速度快^[4].错误信号识别采用保护配置原则进行推理,物理概念明确,逻辑严密.对具有多级电压等级和继电保护配置的变电站故障诊断,本方法能显著地改善故障诊断效果.

2 模型 (Model)

2.1 Petri 网络定义

Petri 网概念由德国人 Carl Adam Petri 先生于 1962 年首先提出.它以网络理论为基础描述系统中离散事件之间的逻辑关系,以代数矩阵运算演绎系统中同时发生、次序发生的各种动态活动,是分析计算机系统、制造系统、电力系统继电保护行为的理想工具.数学定义如下:

基本网络 $N = (S, T, F, M_0, M_1, U, C)$, 其中, $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\} (m \geq 0)$, $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\} (n \geq 0)$, 满足:

- (1) $S \cap T = \emptyset$;
- (2) $S \cup T \neq \emptyset$;
- (3) $F \subseteq (S \times T) \cup (T \times S)$;
- (4) $\text{dom}(F) \cup \text{cod}(F) = S \cup T$.

其中 S 是库所 (place) 节点的有限集合,在此,其元素包括母线、线路、断路器和继电器; T 是变迁节点的有限集合,由继电器的时间标记信号或动作信号决定; F 表示从库所节点到变迁节点和变迁节点到库所节点的有向关系,反映了电网的继电保护配置关系,用关系矩阵 C 描述, $c_{ij} \in C$ 定义如下:

$$c_{ij} = \begin{cases} -w(s, t) & \text{表示网络中从库所 } s_i \text{ 到} \\ & \text{变迁 } t_j \text{ 有 } w \text{ 条有向弧} \\ w(s, t) & \text{表示网络中从变迁 } t_j \text{ 到} \\ & \text{库所 } s_i \text{ 有 } w \text{ 条有向弧} \end{cases} \quad (1)$$

矢量 M_0, M_1 与库所集 S 对应,分别描述网络的初始标记状态和终了标记状态, m_i 代表库所集 S 中第 i 个节点的标记 (token) 数目,在有向网络图中用黑点表示.定义矢量 $U = [U_1, U_2, \dots, U_n]^T$, 对应变迁集 T .系统的动态变迁过程遵循下式^[3]:

$$M_1 = M_0 + CU \quad (2)$$

它表示初始网络标记状态 M_0 在变迁 T 的触发下,按照关系矩阵 C 所描述的逻辑关系重组为 M_1 .这一特性与变电站产生故障时,各级继电保护装置有选择性清除故障的动作过程完全吻合,而故障诊断的过程,恰好是其逆过程,目的是找出这一变迁过程的

触发源,即故障点.Petri 网络变迁过程所遵循的推理规则与变电站对其继电保护系统动作要求的一致性是将 Petri 网络用于变电站故障诊断的理论依据.而推导结果所包含的信息又可以用来诊断 SCADA 系统所提供的相关断路器和继电器信号的正确性.

2.2 故障清除模型

采用如图 1 所示^[4]的变电站网络模型,出线 N_1 配置了三重保护,即主保护、第一后备保护、第二后备保护.

N_1 处短路时应该由其主保护 R_1 起动断路器 CB_1 切除故障,如果 CB_1 拒动(或 R_1 拒动),第一后备保护 R_2 和 R_3 分别起动断路器 CB_2 和 CB_3 切除故障.同理,如果第一后备保护失败,则由第二后备保护 R_4, R_5, R_6, R_7 分别起动断路器 CB_4, CB_5, CB_6, CB_7 切除故障.如果有更多级的保护配置,可以依次类推.

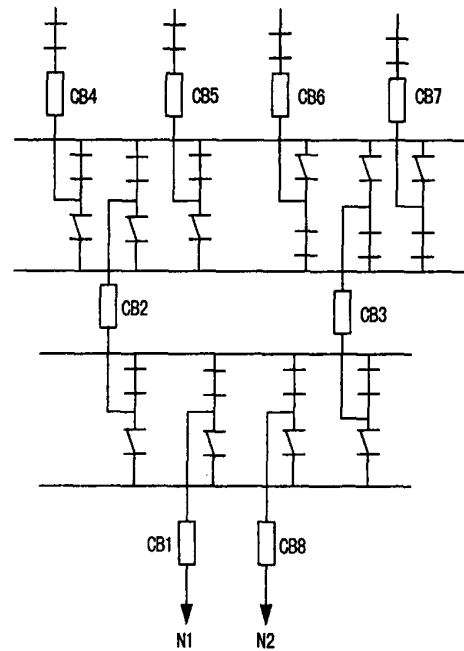


图 1 变电站网络简化模型

Fig.1 Simplified substation network model

依照上述保护配置原则,可得图 2 所示的 Petri 网络故障清除模型.

其中 tr_i 分别与主保护、第一后备保护、第二后备保护对应.模型中 tn 代表 N_1 处发生故障, $R_1 \sim R_7$ 表示对 N_1 起保护作用的继电器, tr_i 表示相应继电器与断路器之间的触发关系.模型反映故障产生后,断路器在继电器的触发下工作,从而清除故障的逻辑关系.网络大小与保护配置级数对应,但是,大的网络总是可以表达保护级数少的电网模型^[4].对于一个具体的电网模型,只需建立一个与其最大的

保护配置级数对应的 Petri 网络模型。

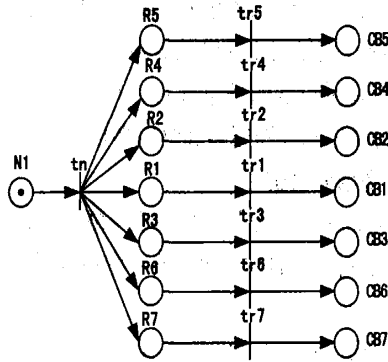


图2 Petri 网络故障清除模型

Fig.2 Petri net model for fault clearance

2.3 故障诊断模型

将图2网络模型求逆(与图2对应,箭头方向相反),即可得到诊断用 Petri 网络模型,表示从断路器和继电器的动作信息寻找故障点。

根据公式(1)可得其关系矩阵 C 如下:

$$C = \begin{matrix} & tn & tr_1 & tr_2 & tr_3 & tr_4 & tr_5 & tr_6 & tr_7 & \\ \begin{matrix} N_1 \\ R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \\ R_5 \\ R_6 \\ R_7 \\ CB_1 \\ CB_2 \\ CB_3 \\ CB_4 \\ CB_5 \\ CB_6 \\ CB_7 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & - & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

用变迁矢量的权表示保护级别,其存在与否根据继电器的时间标记信号和节点信号确定.图1中网络变迁矢量的权如下:

$$U = [1 \ 1 \ 2 \ 2 \ 3 \ 3 \ 3 \ 3]^T$$

3 仿真 (Simulation)

3.1 数学处理

如果图1网络得到如下信息:

$$CB_1 = 10, CB_2 = 00, CB_3 = 11, R_1 = R_2 = R_3 = 11, tr_1 = 0.1s, tr_2 = tr_3 = 0.3s$$

所有断路器和继电器的动作信息用两位表示,分别代表动闭和动开接点,当且仅当动开、动闭接点同时为1时,取逻辑1,同时为0时,取逻辑0,否则视作不确定信号,诊断时先作逻辑0处理. tr_i 表示继电器从保护启动到跳闸接点动作所持续的时间,称为时间标记. tr_i 非0时,变迁矢量中对应元素存在,否则取0.

以上信息说明 N_1 处短路时, CB_1 拒动,由第一后备保护 R_2 和 R_3 分别起动断路器 CB_2 和 CB_3 将清除故障.收到的信息中 CB_2 是错误的, CB_1 信息不确定.

利用故障诊断模型进行仿真检验,初始标记矢量由断路器信息决定,所以 M_0 如下:

$$M_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

变迁矢量 U 由时间标记和其权决定,第一个元素总是置1,表示 N_1 处有故障,本例中:

$$U = [1 \ 1 \ 2 \ 2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

由 $M_1 = M_0 + CU$ 可得:

$$M_1 = [1 \ 0 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -2 \ -1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

3.2 结果分析

继电器信号的正确性诊断对照表1进行. M_1 中 $R_1 = 0, R_2 = R_3 = 1$,继电器输入信息 $R_1 = R_2 = R_3 = 11$,逻辑值均为1,诊断结论为: N_1 处发生故障,继电器 R_1, R_2, R_3 正确工作,SCADA提供的继电器信号正确.

表1 继电器诊断对照表

Tab.1 Reference information for relay diagnosis		
M 中标记 (token)	继电器输入信息逻辑值	诊断结论
≥0	1	正确工作
	0	拒动(跳闸命令未成功发出)
-1	1	误动(错误的跳闸命令)
	0	不相关继电器

断路器按照对照表2诊断,根据最终标记, CB_1, CB_2 拒动, CB_3 作为 N_1 故障的第一后备保护动作,将故障清除.但是根据保护动作原理,如果某特定故障被正确清除,所有保护级别相同的断路器

必须全部正确工作(断开),否则下一级保护启动,这是一条基本的推理规则.由此可知, CB_2 已经断开,其输入信息 $CB_2 = 00$ 错误,应该为 $CB_2 = 11$,否则故障就不可能被清除.诊断结论为: N_1 处发生故障,断路器 CB_1 拒动,第一后备保护 CB_2 、 CB_3 将故障清除,SCADA 提供的 CB_1 、 CB_2 信号有误.事实上,如果 SCADA 提供的信号中 $CB_2 = 11$,就可以得到 M_1 中 CB_2 的标记数为 -1,即 CB_2 作为第一后备保护启动.

表 2 断路器诊断对照表

Tab.2 Reference information for circuit breaker diagnosis

断路器保护级别	M_1 中标记(token)	诊断结论
3	- 3	拒动
	- 2	第二后备保护启动
	1	误动
	0	不相关断路器
2	- 2	拒动
	- 1	第一后备保护启动
	1	误动
	0	不相关断路器
1	- 1	拒动
	0	主保护启动
	1	误动

考虑更加复杂的情形,如果上例中, N_1 处发生

故障后, CB_1 、 CB_2 拒动,而且信号错误或不确定,由第一后备保护 CB_3 和第二后备保护 CB_4 、 CB_5 将故障清除.故障发生后得到 SCADA 提供如下信息:

$$CB_1 = 10, CB_2 = 11, CB_3 = 11, CB_4 = 11, CB_5 = 10, R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = 11, tr_1 = 0.1s, tr_2 = tr_3 = 0.3s, tr_4 = tr_5 = 0.5s.$$

用前述方法进行故障诊断,这时取:

$$U = [1 \quad 1 \quad 2 \quad 2 \quad 3 \quad 3 \quad 0 \quad 0]^T$$

根据以上分析,可以将表 1 和表 2 所描述的诊断对照原则形成继电器和断路器的诊断规则,添加至故障诊断系统规则库.在实际的诊断中,将诊断信息数据库所提供的信息调至诊断程序,得出诊断标记后,调用不同的诊断规则进行推理,给出解释.

3.3 实例验证

为了说明本方法的诊断效果,本文以“上海地铁一号线上海体育馆主变电站”^[8]为对象进行诊断仿真,其主接线如图 3 示,继电保护配置如图 4 示.从中可以看出,对于 10kV 出线,有 5 级保护继电器和断路器配合清除其故障.按照本文所给出的诊断方法,诊断模型中变迁矢量的权有 5 种,对应于主保护和 4 级后备保护.仿真结果表明,对于继电保护级数较多的系统,本文提出的变权重变迁矢量,对诊断结论的解释有明显的效果,对诊断规则库的建立和分类提供了基本的思路.

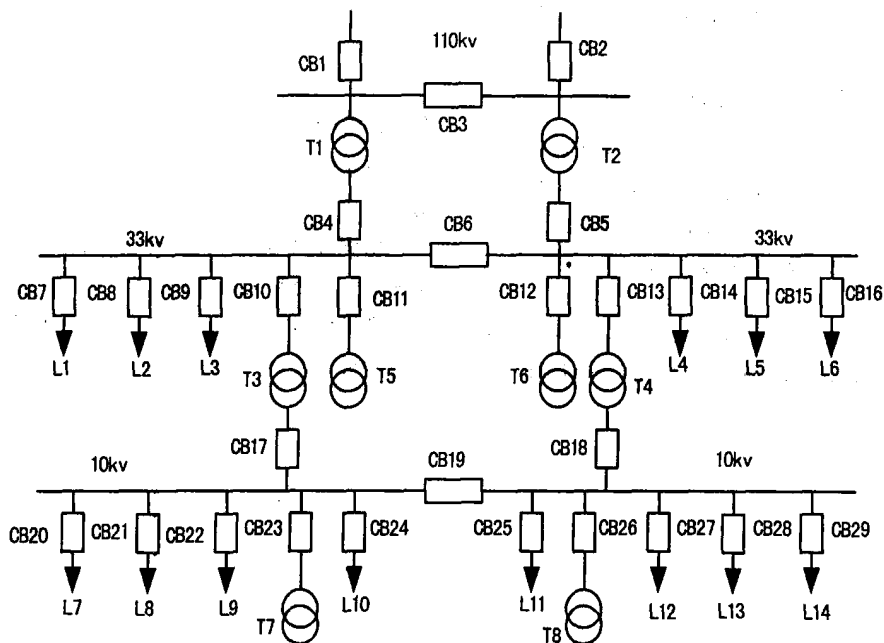


图 3 实际变电站网络模型

Fig.3 Actual substation network model

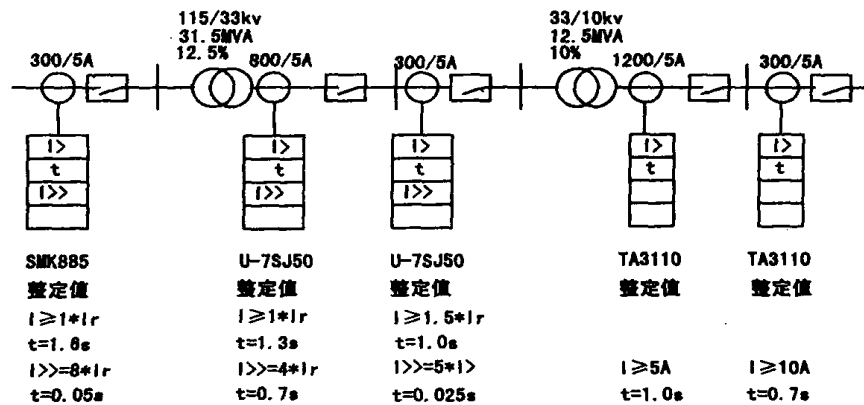


图4 继电保护配置系统图

Fig.4 Configuration scheme of relay protection

4 结论 (Conclusion)

本文提出用变迁矢量的权描述变电站继电保护配置的多重性,物理概念清楚,逻辑严密,较之文献[4,9],省去了前向运算,也不需生成错误伴随阵,诊断过程简化,运算速度提高,诊断结论更加明确.对于继电保护配置级数较多的变电站,其效果更加显著.文章通过对5级保护配置的真实变电站进行仿真,证明了本方法的快速准确性.变电站运行方式改变时如何自动生成对应的关系矩阵,重置变迁矢量的权,如何将变电站继电保护配置原则在诊断规则库中系统表达,多重故障时故障区如何精确定位,需要借助网络拓扑学、专家系统、模糊推理技术等其它方法加以解决,这也是本课题的后续研究范围.

参 考 文 献 (References)

- [1] 毕天姝,倪以信,杨奇逊.人工智能技术在输电网络故障诊断中的应用述评[J].电力系统自动化,2000,24(2):11~15.
- [2] 廖志伟,孙雅明,叶青华.人工智能技术在电力系统故障诊断中的应用[J].电力系统及其自动化学报,2003,15(6):71~79.
- [3] Lo K L, Ng H S, Trecat J. Power systems fault diagnosis using Petri nets [J]. IEE Transactions on Generation, Transmission and Distribu-

tion, 1997, 144(3): 231~236.

- [4] Lo K L, Ng H S, Grant D M, et al. Extended Petri net models for power systems fault diagnosis for substation automation [J]. IEE Transactions on Generation, Transmission and Distribution, 1999, 146(3): 229~234.
- [5] 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.
- [6] 赵洪山,米增强,杨奇逊.基于冗余嵌入Petri网技术的变电站故障诊断[J].电力系统自动化,2002,26(4):32~35.
- [7] 王建元,纪延超. Petri网络在变压器故障诊断中的应用[J].电网技术,2002,26(8):21~24.
- [8] 石礼安.地铁一号线工程[M].上海:上海科学技术出版社,1998.
- [9] Hadjicostis C N, Verghese G C. Power system monitoring using Petri net embeddings [J]. IEE Transactions on Generation, Transmission and Distribution, 2000, 147(5): 299~303.

作者简介

张明锐(1971-),男,博士研究生,讲师.研究领域为电力系统实时控制,变电站综合自动化等.

徐国卿(1967-),男,博士,教授,博士生导师.研究领域为控制理论和交流传动技术.

贾廷纲(1974-),男,工程师.研究领域为电力系统继电保护的开发和工程应用.