

基于保护信息的城市电网故障元件定位方法

陈星莺, 常慧, 余昆, 李振坤, 陈旦

(河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 智能电网建设要求城市电网能灵活改变运行方式, 在故障发生后能及时恢复对失电负荷的供电。通过对城市电网的运行方式特点和保护动作信息进行分析, 建立保护与元件的双向关联模型, 以及保护与可能故障元件的关联矩阵模型, 提出利用该模型计算所有可能故障元件的故障可信度, 以该指标定位城市电网中的故障元件。将保护分为确定性保护和不确定性保护, 通过扩大确定性保护在关联矩阵中的取值来避免故障信息在计算过程中被湮灭, 以处理拒动和多重故障等复杂情况。实际城市电网的多个案例仿真分析结果表明, 关联矩阵中充分包含了故障信息, 提出的城市电网故障元件定位方法简单实用。

关键词: 城市电网; 自愈控制; 故障元件定位; 保护信息; 关联矩阵; 多重故障

Method of fault component diagnosis in the urban power grid based on relay protection information

CHEN Xing-ying, CHANG Hui, YU Kun, LI Zhen-kun, CHEN Dan

(College of Energy & Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Smart grid requires the urban power grid having flexible operation structure and can restore the lost load in time when fault occurs. Through analyzing the characteristic of operation structure of the urban power grid and its relay protection act information, bidirectional relating model between relay protections and components is built. And then the relating matrix of relay protections and likely fault components is formed. The reliability that fault occurred in some component is calculated by the model presented in this paper. And this index is proposed to diagnose the fault component in the urban power grid. The relay protection is divided into two types: definite protection and non-definite protection. The value of definite protection in relating matrix is enlarged to be a larger positive integer to prevent the fault information withering away in the calculation process, which makes the algorithm be able to deal with complication instance, such as rejecting act of relay protection or breaker, multiple faults, and so on. Simulation test is carried out on data of an actual urban power grid. The result indicates that fault information is entirely contained in the relating matrix, and the diagnosis method of fault information proposed in this paper is simple and practical.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51077043).

Key words: urban power system; self-healing control; fault component diagnosis; relay protection information; relating matrix; multiple faults

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)21-0067-05

0 引言

城市电网的自愈控制是智能电网建设的重要内容, 文献[1]提出了城市电网的自愈控制体系结构, 快速进行故障诊断、恢复供电是其中一项重要的控制任务, 以减少经济损失、维持社会的安定^[1-6]。由城市电网的特点可知, 为加快恢复供电的速度, 进行故障诊断时首先只定位故障元件。

城市电网中10 kV配电网的故障诊断研究较多,

主要是根据馈线上各分段开关处FTU采集的故障指示信息对故障区段进行定位, 由于没有变电站和保护装置, 设备单一, 问题相对简单, 已经比较成熟^[7-11]。而由35 kV和110 kV组成的城市电网的故障诊断与输电网相似, 比10 kV更复杂, 不仅设备类型多、保护装置多, 而且保护范围交错复杂, 主要依靠故障时开关和保护的动作信息对故障元件进行定位, 这方面的研究相对较少。文献[12]提出用集合运算进行电网故障诊断, 要求其诊断结果必须是故障征兆信息的覆盖集。文献[13]将电网的故障诊断描述为0-1整数规划问题, 并运用遗传算法进行求

基金项目: 国家自然科学基金项目(51077043)

解,该方法诊断速度慢,且目标函数复杂。专家系统^[14-15]和人工神经网络^[16-18]在电网故障诊断中的应用也有研究,这类算法诊断速度快,但因知识规则不全或训练样本难以完备而使这类算法不能覆盖全部的故障类型,另外城市电网运行方式灵活多变,继电保护的定值可以在线调整^[19]等,使得此类算法更加难以用于工程实际。

本文通过分析保护的動作信息,建立保护与元件的关系模型和動作保护与可能故障元件的关联矩阵,并将其用于城市电网故障元件的定位。为避免信息被淹没,扩大确定性保护在关联矩阵中的取值,并利用元件的保护動作链来处理。

1 城市电网的保护关系模型

电网发生故障后会引发电压降低、电流增加等电气量变化,这些变化可能引起继电保护装置动作、开关跳闸以切除故障。由此可知,电网的故障征兆可分为三层:故障的电气量信息;由电气量变化引起的保护動作信息;由保护動作引起的开关動作信息。目前,只有采用先进的微机保护装置能够部分获得故障状态下的电气量信息,但一般都能得到比较完整的开关和保护動作信息,因此可以利用这两种信息来定位故障元件。

为了适应城市电网运行方式的动态变化、保护定值的在线整定,加快故障后失电负荷的供电恢复,需实时跟踪保护装置的保护范围,明确保护与元件之间的关系。本文借助拓扑分析动态建立如表1所示的保护与元件的关系,记录当前运行方式下保护与其所保护的元件之间的关系。

表1 保护与元件的关系

Tab.1 Relationship between relay protections and components

保护	元件
保护 1	L1
保护 2	L1、B1、L2
保护 3	L1、B1、L2、T1、T2
⋮	⋮

根据保护装置的保护范围可将保护分为确定性保护和不确定性保护两类,确定性保护只保护一个元件,当该保护動作时一定是对应元件故障;非确定性保护对应多个元件,该保护動作时,保护范围内的元件都有可能发生故障,如在表1中,保护1为确定性保护,保护2和3为非确定性保护。

为缩短搜索时间,在保护与元件的关系基础上,建立元件的保护顺序動作链表,该表记录每个元件在故障情况下相关保护的動作顺序与動作条件。假

设在城市电网中,两个不同装置的保护或两个开关同时拒动的概率非常小,并在工程应用中可以忽略。如元件L1故障时,开关CB1上的I段保护CB1_PrI和CB1動作;若CB1_PrI拒动,则II段保护CB1_PrII和CB1動作;若CB1_PrI和CB1_PrII拒动或者CB1拒动,则开关CB2上的II段保护CB2_PrII和CB2動作,其保护動作链如表2所示。

表2 元件的保护動作链

Tab.2 Act sequence of relay protections to components

	CB1	CB1	CB2
CB1_PrI		CB1_PrII	CB2_PrII

2 故障元件定位的矩阵算法

2.1 保护与元件的关联矩阵

根据继电保护原理可知,若电网故障后保护装置動作,则故障元件在该動作保护的保护范围内,可以利用保护与元件的实时关系,根据保护動作信息筛选出可能的故障元件,再从中确定实际故障元件。假设故障时有 N_p 个保护動作,则可通过保护与元件的关系得到可能故障的元件,即所有被这些保护装置所保护的元件,假设有 N_c 个。将这些信息按矩阵形式组织,可以构建出 N_p 行 N_c 列的保护与元件的关联矩阵 M ,如下所示:

$$\begin{matrix}
 & \xrightarrow{N_c \text{个可能}} \\
 \begin{matrix} N_p \\ \text{个} \\ \text{保护} \\ \text{的} \\ \text{动作} \\ \text{保护} \end{matrix} \downarrow & \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & \cdots & M_{1N_c} \\ M_{21} & M_{22} & \cdots & M_{2N_c} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ M_{N_p 1} & M_{N_p 2} & \cdots & M_{N_p N_c} \end{bmatrix}
 \end{matrix}$$

其中,第 i 行第 j 列的元素 M_{ij} 表示第 i 个保护对第 j 个可能故障的元件的保护情况。为了通过矩阵运算准确地找出实际的故障元件,需要设置合适的矩阵元素值。当第 i 个保护没有对第 j 个元件进行保护,即两者没有任何关系时, $M_{ij} = 0$;当第 i 个保护为第 j 个元件的非确定性保护时, $M_{ij} = 1$;当第 i 个保护为第 j 个元件的确定性保护,即该保护只保护元件 j 时, M_{ij} 取为较大的正整数 K 。

在保护与元件的关联矩阵中,行向量表示某一保护对各可能故障元件的保护情况;列向量表示某一元件被各動作保护的保护情况。

2.2 故障元件的诊断规则

按上述方法建立关联矩阵 M 后,用元素为1的 N_p 维行向量左乘能够得到由 N_c 个可能故障元件

的故障可信度构成的向量 $S_c = [1 \ 1 \ \dots \ 1]M$ 。当故障可信度大于等于 K 时, 该元件为故障元件; 若所有元件的故障可信度都小于 K , 则故障可信度最高的元件为故障元件; 当有多个元件同时具有最高故障可信度时, 根据元件的保护动作链进行诊断, 如果实际动作情况与该链矛盾, 则可确定该元件为误诊, 反之, 如果实际动作情况与其保护动作链吻合则确定该元件为故障元件。

如上所述的计算首先得出各可能故障的元件被各动作保护的覆盖范围所覆盖的次数, 然后依据被覆盖的次数越多则故障概率越大的原则确定故障元件。由于确定性保护在关联矩阵中的取值被扩大为 K , 因此, 可以避免该信息在计算过程中被湮灭, 仍能正确判断故障元件, 并可有效处理多重故障的情况。

3 算例分析

上述城市电网故障元件的定位方法是城市电网自愈控制系统的一部分, 已在实际工程中获得成功应用。本文将对图1所示的城市电网设计4个案例进行分析, 分别为开关和保护均正确动作、开关拒动、多重故障且有开关拒动、保护和开关均有拒动。该电网共有两个220 kV变电站, 4个110 kV变电站, 即S1、S2、S3、S4, 和4个35 kV变电站, 即B1、B2、B3、B4。

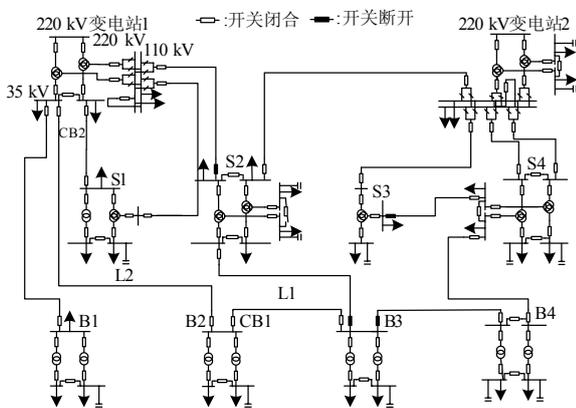


图1 某城市电网接线图

Fig. 1 Wiring diagram of an urban power grid

由上述的定义知, 线路的I段保护及母线和变压器的差动保护为确定性保护, 线路的II段和III段保护为非确定性保护。在仿真过程中, 设置确定性保护在关联矩阵中对应的值 $K=100$ 。

3.1 案例1分析

假设线路L1发生故障, 开关CB1上装设的I段保护CB1_PrI动作, CB1断开。此时只有一个保护动作,

且该保护仅保护线路L1, 为确定性保护, 因此生成的关联矩阵维数为 1×1 , 且其值为100, 故系统确定故障元件是L1, 这与实际情况完全吻合。

3.2 案例2分析

假设线路L1发生故障, 开关CB1上装设的I段保护CB1_PrI动作, 但开关CB1拒动, 使得线路L2上装设的II段保护CB2_PrII动作, 开关CB2动作, 此时有CB1_PrI和CB2_PrII两个保护动作, 由保护与元件的关系可知: CB1_PrI只保护L1, 为确定性保护; CB2_PrII保护的元件有五个: L2、变电站B2内的35 kV母线(B2_Bus_35)和两台变压器(B2_T1、B2_T2)、线路L1, 为非确定性保护。2个保护所覆盖的元件共有5个, 故生成的关联矩阵维数为 2×5 , 如表3所示。

表3 开关拒动时保护与元件的关联矩阵

Tab.3 Relating matrix between relay protections and components with breaker rejecting

	L1	L2	B2_Bus35	B2_T1	B2_T2
CB1_PrI	100	0	0	0	0
CB2_PrII	1	1	1	1	1

用向量 $[1 \ 1]$ 左乘该矩阵可得5个元件的故障可信度向量为 $[101 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$, 所以系统确定L1为故障元件。

3.3 案例3分析

在案例2基础上, 同时发生变电站S3内的110 kV母线故障, 而该母线的差动保护S3_Bus110_PrD动作, 断开相连的开关。该案例有三个保护动作, 覆盖的元件共有6个, 形成的关联矩阵如表4所示。

表4 多重故障时保护与元件的关联矩阵

Tab.4 Relating matrix between relay protections and components with multiple faults

	L1	L2	B2_Bus35	B2_T1	B2_T2	S3_Bus110
CB1_PrI	100	0	0	0	0	0
CB2_PrII	1	1	1	1	1	0
S3_Bus110_PrD	0	0	0	0	0	100

通过计算得出6个元件的故障可信度向量为 $[101 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 100]$, 有两个元件对应的故障可信度大于等于 K , 因此, 系统判断线路L1和变电站S3内的110 kV母线故障, 与实际情况完全吻合。

若确定性保护在关联矩阵中取1, 则可得出元件L1的故障可信度最高, 值为2, 其他元件的故障可信度均为1, 此时会误诊为故障元件只有L1, 变电站S3内的110 kV母线被遗漏。换句话说, 将确定性保护的取值扩大能够防止故障信息的湮灭, 而有效

诊断发生多重故障的情况。

3.4 案例4分析

假设变电站B3内的35 kV母线B3_Bus35故障，该母线差动保护失灵而未动作，装设于开关CB1处的II段保护CB1_PrII动作，但开关CB1拒动，导致上游CB2处的III段保护CB2_PrIII动作，CB2断开。此时有两个保护动作，在图1所示的运行方式下CB1_PrII保护的元件有4个：L1、B3_Bus35、B3_T1、B3_T2，CB2_PrIII保护的元件较多，有9个：L2、B2_Bus35、B2_T1、B2_T2、B2_Bus10、L1、B3_Bus35、B3_T1、B3_T2。两个动作保护所覆盖的元件共9个，因此可形成2×9维的保护与元件的关联矩阵。

由于故障元件的主保护失灵，没有确定性保护动作，因此没有元件的故障可信度大于等于100。系统通过计算得出最高故障可信度为2，共有4个元件：L1、B3_Bus35、B3_T1、B3_T2，因此，这4个元件均为可能的故障元件。然后，通过其保护动作链可知，CB2_PrIII不在L1、B3_T1和B3_T2的保护动作链中，因此这几个元件不是故障元件，而动作保护CB1_PrII、CB2_PrIII的动作情况与B3_Bus35的保护动作链吻合，所以系统确定B3_Bus35为故障元件。

4 结论

为了适应城市电网灵活运行，提高控制的智能化水平，本文从两个角度建立保护与元件的关系模型，该模型能实时跟踪城市电网的运行情况，当故障发生时，快速形成动作保护与可能故障元件的关联矩阵。提出通过简单的矩阵运算快速获得各元件的故障可信度，并辅以简单的逻辑判断确定故障元件。通过对实际城市电网设计的案例仿真分析可知，该方法简单、快速、可靠，且能够有效处理拒动和多重故障等复杂情况。

参考文献

[1] 陈星莺, 顾欣欣, 余昆, 等. 城市电网自愈控制体系结构[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (24): 38-42.
CHEN Xing-ying, GU Xin-xin, YU Kun, et al. Architecture for self-healing control of urban power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (24): 38-42.

[2] 唐葆生. 伦敦南部地区大停电及其教训[J]. 电网技术, 2003, 27 (11): 1-5, 12.
TANG Bao-sheng. Blackout in south of London and its lessons[J]. Power System Technology, 2003, 27 (11): 1-5, 12.

[3] 鲁顺, 高立群, 王珂, 等. 莫斯科大停电分析及启示[J].

继电器, 2006, 34 (16): 27-31, 67.
LU Shun, GAO Li-qun, WANG Ke, et al. Analysis and inspiration on blackout of Moscow[J]. Relay, 2006, 34 (16): 27-31, 67.

[4] AMIN M. Toward self-healing energy infrastructure systems[J]. IEEE Computer Applications in Power, 2001, 14 (1): 20-28.

[5] Rahman S, Pipattanasomporn M, Teklu Y. Intelligent distributed autonomous power systems[C]. //IEEE Power Engineering Society General Meeting. Tampa (USA): 2007.

[6] 王明俊. 自愈电网与分布能源[J]. 电网技术, 2007, 31 (6): 1-7.
WANG Ming-jun. Self-healing grid and distributed energy resource[J]. Power System Technology, 2007, 31 (6): 1-7.

[7] 卫志农, 何桦, 郑玉平. 配电网故障区间定位的高级遗传算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (4): 127-130.
WEI Zhi-nong, HE Hua, ZHENG Yu-ping. A refined genetic algorithm for the fault sections location[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (4): 127-130.

[8] Senger E C, Manassero G Jr, Goldemberg C, et al. Automated fault location system for primary distribution networks[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20 (2): 1332-1340.

[9] 杨俊起, 陈滢涛, 杨凌霄, 等. 配电网故障定位的改进矩阵算法研究[J]. 高电压技术, 2007, 33 (5): 135-138.
YANG Jun-qi, CHEN Yan-tao, YANG Ling-xiao, et al. Study on improved matrix algorithm for fault location in power distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33 (5): 135-138.

[10] Salim R H, de Oliveira K, Filomena A D, et al. Hybrid fault diagnosis scheme implementation for power distribution systems automation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23 (4): 1846-1856.

[11] Chien Chen-fu, Chen Shi-lin, Lin Yih-shin. Using Bayesian network for fault location on distribution feeder[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17 (3): 785-793.

[12] 段振国, 高曙, 杨以涵. 一种电网故障智能诊断求解模型的研究[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.

[13] 文福柱, 韩祯祥, 田磊, 等. 基于遗传算法的电力系统故障诊断的解析模型与算法(第一部分: 模型与方法) [J]. 电力系统及其自动化学报, 1998, 10 (3):

- 1-7.
WEN Fu-shuan, HAN Zhen-xiang, TIAN Lei, et al. An analytic model and genetic algorithm based methods for fault diagnosis in power systems (part 1: the model and method) [J]. Proceedings of the EPSA, 1998, 10 (3): 1-7.
- [14] 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, 71.
LIU 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, 71.
- [15] Heung-jae Lee, Deung-yong P, Bok-shin Ahn, et al. A fuzzy expert system for the integrated fault diagnosis[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15 (2): 833-838.
- [16] 毕天姝, 倪以信, 吴复立, 等. 基于混合神经网络和遗传算法的故障诊断系统[J]. 现代电力, 2005, 22(1): 31-36.
BI Tian-shu, NI Yi-xin, WU Fu-li, et al. Novel method for fault diagnosis in power systems with hybrid neural network and genetic algorithm[J]. Modern Electric Power, 2005, 22 (1): 31-36.
- [17] Aygen Z E, Seker S, Bagnyanik M. Fault section estimation in electrical power systems using artificial neural network approach[C]. //IEEE Transmission and Distribution Conference. New Orleans (USA): 1999.
- [18] Thukaram D, Khincha H P, Vijaynarasimha H P. Artificial neural network and support vector machine approach for locating faults in radial distribution systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20 (2): 710-721.
- [19] 段献忠, 杨增力, 程道. 继电保护在线整定和离线整定的定值性能比较[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 58-61.
DUAN Xian-zhong, YANG Zeng-li, CHENG Xiao. Performance analysis of relay settings determined according to off-lines calculation and on-line calculation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (19): 58-61.

收稿日期: 2010-04-20

作者简介:

陈星莺(1964-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统经济运行分析与控制、电力市场与电力经济、可再生能源发电系统的运行分析与控制; E-mail: xychen@hhu.edu.cn

常慧(1985-), 女, 硕士生, 研究方向为城市电网运行分析与控制;

余昆(1978-), 男, 博士研究生, 讲师, 研究方向为地区电力经济运行、地区电网安全分析与控制。E-mail: kun.yu@vip.sina.com

(上接第 66 页 continued from page 66)

参考文献

- [1] 埃弗雷特·M·罗杰斯. 创新的扩散[M]. 辛欣, 译. 北京: 中央编译出版社, 2006.
- [2] 陶大坤. 我国手机电视运营模式探析[J]. 温州大学学报: 社会科学版, 2009 (7): 99-104.
TAO Da-kun. The discusses of China's mobile TV operation mode[J]. Journal of Wenzhou University: Social Sciences, 2009 (7): 99-104.
- [3] 王健, 姜久春. 电动汽车充电站信息管理系统的设计与实现[J]. 微计算机信息, 2006, 22 (5-3): 16-17.
WANG Jian, JIANG Jiu-chun. Design and implementation of electric vehicle charging station management information system[J]. Micro Computer Information, 2001, 24 (5-3): 16-17.
- [4] 徐剑涛. 供电企业的运营模式分析研究[J]. 中国市场, 2008 (19).
XU Jian-cao. The analysis of circulating and marking mode to the power supply enterprise[J]. China Market, 2008 (19).
- [5] 黄李, 张维戈, 姜久春. 2008 年奥运会电动车充电站规划及运营模式方案[J]. 现代交通技术, 2007 (4).
HUANG Li, ZHANG Wei-ge, JIANG Jiu-chun. The design and the running mode of the vehicle charge-station for the 2008 Olympic Games[J]. Modern Transportation, 2007 (4).
- [6] 康继光, 卫振林, 程丹明, 等. 电动汽车充电模式与充电站建设研究[J]. 电力需求侧管理, 2009, 11 (5): 69-71.
KANG Ji-guang, WEI Zhen-lin, CHENG Dan-ming, et al. Research on electric vehicle charging mode and charging stations construction[J]. Demand Side Management, 2009, 11 (5): 69-71.
- [7] 腾乐天, 何维国, 杜成刚, 等. 电动汽车能源供给模式及其对电网运营的影响[J]. 华东电力, 2009 (10).
TENG Le-tian, HE Wei-guo, DU Cheng-gang, et al. Power supply modes for electrical vehicles and their impacts on grid operation[J]. East China Electric Power, 2009 (10).

收稿日期: 2010-06-05

作者简介:

周逢权(1969-), 男, 博士, 高级工程师, 从事电力系统运行与控制、继电保护方面的研究。E-mail: fengquanzh@xjgc.com