

基于停电区域及广域同步信息的电网故障快速诊断研究

戴志辉¹, 李强²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003; 2. 重庆市万州区光泰电力勘察设计有限公司, 重庆 404000)

摘要: 提出了一种基于停电区域, 利用广域同步信息进行电网故障快速诊断的方法。该方法利用故障时变位开关信息以及从故障发生到故障切除之间元件的电压相量得到可能的故障元件集, 进一步结合方向信息进行推理判断, 确定故障元件, 还可进行保护动作行为评价和简单的故障选相。该方法仅利用停电区域内的同步数据, 不受系统网络规模的制约, 只与故障情况的复杂度有关, 对快速分析事故、评价设备及装置动作行为、简化故障诊断流程具有一定意义。

关键词: 广域同步信息; 停电区域; 故障诊断; 容错能力; 故障选相

Fault diagnosis based on power failure zone and wide-area synchronization information

DAI Zhi-hui¹, LI Qiang²

(1. School of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
2. Guangtai Electrical Power Survey and Design Co., Ltd., Chongqing 404000, China)

Abstract: This paper presents a quick power network faults diagnosis method based on wide-area information and circuit breakers information in power failure zone. It identifies the fault element by analyzing voltage, the time sequence of circuit breakers and direction information. Wide-area and synchronization information of power failure zone makes this method impregnable to scale of network and significant for analyzing fault, predigesting conventional diagnosis diagram, evaluating actions of electric power devices and ensuring the safety and stabilization of power system.

Key words: wide area information; power failure zone; fault diagnosis; fault-tolerant ability; phase selection

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)12-0050-04

0 引言

为了提高故障诊断的准确性和快速性, 国内外学者先后提出了多种基于保护信息和断路器信息, 结合专家系统^[1]、人工神经网络^[2]、Petri网^[3]、优化理论、信息理论^[4-5]等的电网故障诊断方法。这些方法各有特点并获得了一定的应用, 但在系统发生复杂故障或开关、保护存在误动、拒动以及信息丢失等诸多不确定因素情况下, 完全依赖逻辑量信息的故障诊断方法往往难以取得令人满意的效果, 因此也有文献在故障诊断过程中引入故障录波信息^[6-7], 但传统电力信息系统仍有不足, 如: 信息的传输速度相对较慢; 信息不具备统一的时间标签, 很难做到全局优化协调等。尤其是复杂故障及保护和开关误动、拒动等情况下, 大量非同步信息甚至相互矛盾的原始信息, 增大了故障诊断工作的难度。

广域测量系统能在时、空、幅值三维坐标下实时并且同步地观测系统全局的动态过程, 弥补了现

有EMS/SCADA系统和故障录波系统的不足, 为电力系统动态分析与监控提供了最直接的技术手段。当前广域测量系统的PMU装置以GPS为采样基准, 能全网同步采集机组和线路的电压以及重要的开关、保护信号, 不少厂家的PMU还能提供扰动触发的暂态记录^[8], 因此本文引入广域信息, 旨在进一步提高故障诊断的快速性和准确性。

考虑到电力系统发生故障后, 保护与断路器动作, 使得故障元件最终将与电源隔离, 因而在正常区域中寻找故障元件费时且无意义^[9]。若能构造一种基于停电区域的更简单、求解速度更快的故障诊断模型, 则能更快达到在线应用的要求。

本文提出了一种基于停电区域, 利用广域同步信息进行快速故障诊断的方法。运用广域同步信息和开关变位信息进行推理判断, 确定故障元件, 并进行保护动作行为评价。只需要确定时段内停电区域的电压、电流信息和开关动作信息; 只与故障情况的复杂性有关, 而与保护信息和系统网络规模无

关, 诊断方法快速有效。

1 停电区域的快速识别

电力系统发生故障后, 在较短的时间内继电保护装置将动作隔离故障元件与电源, 使故障元件不再与系统相连而处于孤立的无源网络中, 这些无源网络形成停电区域^[10]。在找到停电区域后, 故障元件的识别就可局限于这些区域中所包含的元件。

利用电力系统的网络拓扑信息可帮助进行停电区域的识别, 本文用一个图 $G=(V, E)$ 来描述电力系统的网络拓扑图, 其中节点集合 V 包括母线、线路、变压器、发电机等; 边集合 E 由开关组成。边的通断状态取决于开关的状态。故障发生后, 用广度优先搜索方法遍历网络拓扑, 生成一个或多个无源网络即停电区域。具体的:

1) 对正常运行的电力系统进行结线分析, 把对应于发电机或等效电源的元件标注为有源节点。

2) 对故障后的系统重新进行结线分析, 此时会有若干个子系统产生。为避免开关信息的传输错误本文同时结合开关信息和 PMU 模拟量测信息并辅以状态估计进行综合判断。如需要判开关断开, 除了开关信息外, 还要结合相应的电流值是否小于设置的无流门槛。

3) 对于每个子系统, 首先将所有跳闸开关的两端节点作为边界节点, 形成边界节点集合, 进行节点扩展。如果在节点扩展过程中, 发现节点与有源节点相连, 则停止扩展, 并置当次扩展的部分子系统中的所有节点状态为带电; 否则, 一直到该子系统不能进行节点扩展为止, 对所确认的停电区域进行编号, 列出其中的元件作为可能的故障元件集。

在所有节点都搜索完成后, 与边界节点所连接的所有停电域都已被搜索出来, 同时那些故障后仍然带电的边界节点的带电状态也已确定。由于故障时只从变位开关搜索停电区域, 因此该拓扑范围只和故障的复杂程度有关, 拓扑搜索的效率较高。

2 电网故障快速诊断

2.1 基于故障电流的方向判别新方法

本文仅用电流进行方向判别, 主要基于: 1) 保护中普遍使用的方向判别元件往往要引入阻抗、电压等参数, 这有利于提高基于就地信息进行方向判断的可靠性, 但增加了故障诊断的数据传输和计算复杂度。采用广域信息以后, 方向判别可以充分利用广域信息的优势, 适当减少变量种类; 2) 目前广泛使用的突变量方向元件实质上更多地反映电流的突变; 3) 根据广域量测的模拟值判断而非其它 IED

的方向判断结果可避免其它 IED 方向误判给故障诊断带来的不利影响。

为了快速、正确地利用广域电流信息进行方向判别, 在理论分析和仿真研究的基础上, 提出利用停电区域内故障后电流相量值结合高性能相电流差“突变量”选相原理进行选相, 利用选出来的电流进行方向判别, 其受过渡电阻、故障类型、正常负荷电流影响较小。具体步骤如下:

1) 利用广域信息搜索停电区域中最先动作的开关动作时间, 计算该时间点之前一段时间内各测点的相电流差变化量, 取具有最大相电流差变化量的测点电流作为输入电流。

2) 利用相电流差“突变量”选相原理对 1) 产生的输入电流进行“选相”, “选相”结果为进行方向判别的“故障相”。不同于传统选相元件的是, 该“选相”元件利用了停电区域中的多点电流信息, 有助于提高故障电流相别的正确识别率。

3) 利用第 2) 步选出的故障相电流进行方向判别, 若为多相故障, 可选择任一故障相电流进行方向判别。

对于高阻故障, 若过渡电阻大到无法判别最大的一个电流, 则将三相的电流信息分别进行方向判别, 只要有一相电流的两侧/多侧方向多次一致, 即认为该元件为故障元件。

判别两个电流相量是否同向的判据如式 (1) 所示, 其中 $\text{Arg} \frac{I_1}{I_2}$ 为两个被比较的电流相量 I_1 、 I_2 之间的夹角。

$$-90^\circ \leq \text{Arg} \frac{I_1}{I_2} \leq 90^\circ \quad (1)$$

以图 1 所示系统为例, 其中母线 B1、B4 及 B5 为 500 kV 有源节点, 各条线路长度均为 100 km, 线路参数如下:

$$\begin{aligned} r_1 &= 0.02563 \ \Omega/\text{km}, \quad r_0 = 0.1466 \ \Omega/\text{km}, \\ l_1 &= 0.2811 \ \text{mH}/\text{km}, \quad l_0 = 0.6505 \ \text{mH}/\text{km}, \\ c_1 &= 0.0128 \ \mu\text{F}/\text{km}, \quad c_0 = 0.0078 \ \mu\text{F}/\text{km} \end{aligned}$$

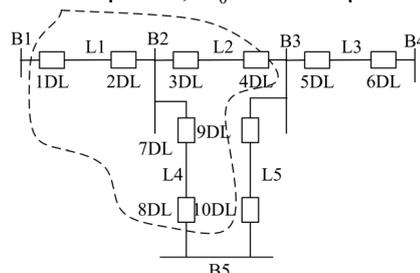
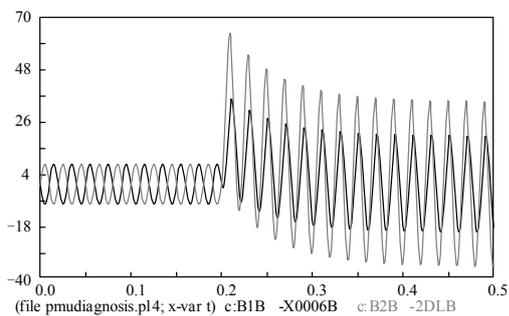


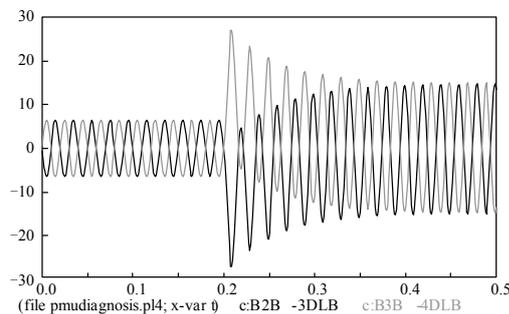
图 1 简单输电系统

Fig. 1 A test transmission network

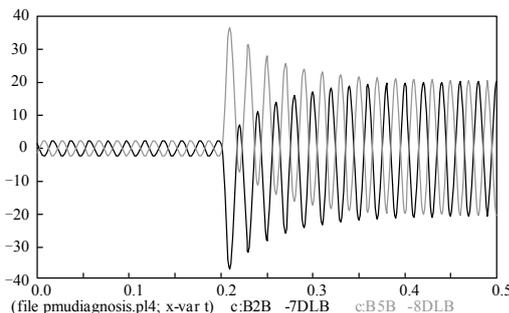
以线路 L1 在母线 B2 出口 0.2 s 时发生 BC 两相接地故障为例，由仿真得到停电区域中各测点的电流相量，计算得到线路 L1 的相电流差突变量差值最大，故以 L1 处 PMU 电流量测值进行相电流差突变量选相，这里采用故障相之一的 B 相电流进行故障方向判别。列出故障区域内线路 L1、L2、L4 两端 B 相电流变化曲线如图 2 所示。由图 2 可见，故障后只有线路 L1 两侧故障相之一 B 相电流的相位相同（便于观察，列出瞬时值），非故障线路两侧的电流方向相反。其他类型故障可按照上述方法得到相应结论，不再赘述。



(a) 线路 L1 两侧 B 相电流



(b) 线路 L2 两侧 B 相电流



(c) 线路 L4 两侧 B 相电流

图 2 用于方向判别的电流选取

Fig.2 Current selection for direction discrimination

2.2 故障定位流程

诊断流程如图 3 所示。发生故障后，首先快速识别停电区域，然后结合模拟量、开关动作信息和电网拓扑关系，在每个停电区域中搜索该停电区域

最先动作的开关动作之前电压值有较大跌落的元件，如果只有一个且该元件不是母线（避免出口故障且存在保护或开关误/拒动时误判为母线故障），则该元件为故障元件；如果不只一个元件或唯一的元件是母线，则需要利用短路时的电流方向来做进一步的判断。

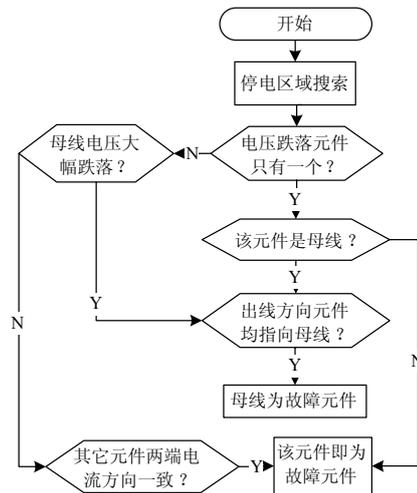


图 3 电网故障定位流程

Fig.3 Flow chart of power network fault location

对于母线，看电流方向是否均指向母线，如果是则判为母线故障。对于非母线元件如线路、变压器等，则看有较大电压跌落元件各端的电流方向是否一致为正向，如果一致则说明是该元件发生故障，如果不一致则说明不是该元件发生故障。

最后，进行保护、开关动作行为评价。

2.3 故障定位算例

仍以图 1 所示仿真模型为例验证诊断方法的正确性，线路 L1 在母线 B2 出口处发生 C 相单相接地，也作为对 2.1 节中提出的用于方向判别电流选取方法正确性的进一步验证。故障后开关 1DL 跳开，开关 2DL 拒动，开关 4DL、8DL 跳开。

首先根据停电区域快速识别方法确定停电区域为图 1 中虚线包含部分。其次，取该停电区域内最先跳闸的开关 1DL 动作之前 1~3 个周波的电压、电流相量值进行分析，如表 1、表 2 所示。

按照 2.2 节的诊断流程进行判断，首先得到可能的故障元件集为线路 L1、L2、L4 和母线 B2，且只有唯一的母线电压跌落，此时不能准确定位故障元件，故进一步采用带方向的判断流程。由表 2 所示数据及前述选相方法，确定以 2DL 处 C 相电流作为方向判别电流，不难发现，只有线路 L1 两侧 C 相电流即流过 B1-1DL 和 B2-2DL（符合正方向规定）同相，而其他线路两侧各相对应电流均为反向，

母线 B2 所连出线的方向不一致, 故为非故障元件。

表 1 停电区域内电压相量值

Tab.1 Voltage phasor in power failure zone

	U_a / kV	U_b / kV	U_c / kV
B2	368.4∠124.7	392.2∠3.84	0.16∠158.8

表 2 停电区域内电流相量值

Tab.2 Current phasor in power failure zone

	I_a / kA	I_b / kA	I_c / kA
B1-1DL	8.19∠-54.9	8.547∠-175	19.87∠134.4
B2-2DL	8.19∠125.1	8.547∠4.258	35.11∠172.4
B2-3DL	6.36∠-43.9	6.58∠-165.6	15.1∠3.441
B3-4DL	6.36∠136.1	6.58∠14.38	15.1∠-177
B2-7DL	2.29∠-86.7	2.37∠155.1	20.5∠-15.8
B5-8DL	2.29∠93.34	2.37∠-24.9	20.5∠164.2

2.4 保护、开关动作行为评价

在短路事故发生且得到方向信息后, 不仅能够做到对故障元件准确定位, 结合电压跌落时间和保护信息还可进行保护、开关动作行为评价:

1) 故障元件集中的开关是否全为断开状态。

2) 如果全为断开状态, 说明是主保护或近后备保护动作, 进一步查看这些开关背后的 PMU 测量的电压跌落时间, 如果跌落时间在主保护切除故障时间范围内, 则说明是主保护动作, 否则说明主保护拒动、近后备保护切除故障。

如果存在闭合的开关, 则说明该开关或该侧保护拒动, 对该开关所连节点在停电区域中进一步搜索, 直到找到断开的开关为止, 查看故障元件的电压跌落时间是否和该后备保护的时间定值大致一致, 如果不一致, 则可能是保护或开关越级跳闸。

3) 在对开关所连节点的搜索过程中如果发现跳闸开关流过的电流为线路流向母线, 则说明该开关或保护误动。

2.5 故障类型简单判别

确定故障元件后, 首先根据 2.2 节的选相方法进行选相。然后利用电压量进行判断, 如果 PMU 量测到故障元件只有一相电压值有较大跌落, 则判为单相故障; 如果三相电压都有跌落则判为三相故障; 如果有两相电压值有较大跌落则判为两相接地故障; 如果有两相电压有跌落, 但跌落的幅度不是很大, 则判为两相短路故障。最后结合电流、电压二者判断结果进行综合判定。

3 快速诊断方法的容错性

1) 通过结合开关信息和 PMU 模拟量量测信息,

提高了开关信息的准确性。

2) 故障诊断过程由于不使用保护信息, 而直接利用自身的量测值进行诊断, 避免了保护信息本身有误或者传输过程中出错带来的问题。

3) 停电区域确定后, 故障诊断基于停电区域内的广域同步信息, 需要的信息种类及信息量有所减少; 另一方面, 方向信息不取自其他 IED 设备, 而采用广域电流同步信息进行判断, 较之传统利用开关量结合人工智能等方法, 其容错性更强。

4 结语

1) 提出了基于停电区域, 利用广域同步信息进行电网故障快速诊断的方法。该方法与保护信息无关, 不受网络规模制约, 只与故障情况的复杂度有关, 快速有效。

2) 该方法在识别出故障元件后, 还可以进行保护动作行为评价、简单识别故障类型。

3) 停电区域的不同, 所反映的电网拓扑结构也发生变化, 因此需要前期的网络拓扑结构分析功能实时刷新停电区域。

参考文献

- [1] Lee Heung-jae, Ahn Bok-shin, Park Young-moon. A fault diagnosis expert system for distribution substation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15 (1) .
- [2] 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) .
- [3] 徐青山, Tobias Mirbach, 唐国庆. 集成冗余保护信息的扩展 Petri 网故障诊断[J]. 继电器, 2005, 33 (10): 45-48, 61.
XU Qing-shan, Tobias Mirbach, TANG Guo-qing. Fault diagnosis based on extended Petri nets upon the integrated protection information[J]. Relay, 2005, 33 (10): 45-48, 61.
- [4] 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, SI Da-jun. A study of fault diagnosis in distribution line based on rough set theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21 (10): 73-77.
- [5] 廖志伟, 孙雅明. 基于数据挖掘模型的高压输电线系统故障诊断[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.

(下转第 58 页 continued on page 58)

影响, 提高电流补偿具有很好的效果。

参考文献

[1] Choi Jung-Soo. A novel dead time minimization algorithm of the PWM inverter[J]. 34th IAS, 1999 (S): 2188-2193.

[2] 夏向阳, 罗安. 有源滤波器中逆变器的死区效应与补偿方法[J]. 高电压技术, 2006 (8): 73-75.
XIA Xiang-yang, LUO An. Dead-time effects and compensation strategy of inverters in active power filter[J]. High Voltage Engineering, 2006 (8): 73-75.

[3] 余凤兵, 梁冠安, 钟龙翔. 并联型有源滤波器的死区效应及其补偿策略研究[J]. 通信电源技术, 2006 (5): 4-7.
YU Feng-bing, LIANG Guan-an. Study on dead-time effect of the parallel active power filter and its compensation strategies[J]. Telecom Power Technologies, 2006 (5): 4-7.

[4] 范瑞祥, 罗安. 并联型APF死区效应分析及对策[J]. 电机与控制学报, 2009 (1): 73-77.
FAN Rui-xiang, LUO An. Analysis and countermeasures of dead-time effect in shunt active power filter[J]. Electric Machines and Control, 2009 (1): 73-77.

[5] WU Mao-gang, ZHAO Rong-xiang, TANG Xin-zhou. Dead-time effects analysis and compensation of SPWM and SVPWM inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (12): 101-105.

[6] Zitzelsberger J, Hofmann W. Space vector modulation with current based dead time compensation using

Kalman-filter[C].//IEEE industrial electronics. IECON 2006 - 32nd Annual Conference. 2006.1533-1538.

[7] 张少锋, 高艳霞, 徐妍萍. 一种基于空间矢量PWM的死区效应补偿策略研究[J]. 变频器世界, 2009(3): 44-47.
ZHANG Shao-feng, GAO Yan-xia, XU Yan-ping. Research on dead-time compensation strategy based on SVPWM[J]. The World of Inverters, 2009(3): 44-47.

[8] 荆涛, 范蟠果. 一种新颖的空间矢量死区补偿算法研究[J]. 电力电子技术, 2008(3): 84-86.
JING Tao, FAN Pan-guo. Research on a novel dead-time compensation method with SVPWM[J]. Power Electronics, 2008(3): 84-86.

[9] Summers T J, Betz R E. Dead-time issues in predictive current control[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004, 40(3): 835-844.

[10] Ambrozic V, Fiser R, Nedeljkovic D. Direct control-A new current regulation principle[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2003,18(1).

收稿日期: 2009-07-24; 修回日期: 2009-10-23

作者简介:

张波(1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量控制技术; E-mail: zhangbos@126.com

唐昆明(1959-), 男, 副研究员, 主要研究方向为电力系统继电保护及自动化。

(上接第 53 页 continued from page 53)

[6] 杜一, 张沛超, 郁惟镛, 等. 基于故障录波数据的分布式电网故障诊断系统[J]. 继电器, 2003, 31 (1): 26-29, 38.
DU Yi, ZHANG Pei-chao, YU Wei-yong, et al. A distributed power system fault diagnosis system based on recorded fault data[J]. Relay, 2003, 31 (1): 26-29, 38.

[7] 许仪勋, 陆拯, 郭志忠. 基于遗传算法的电力系统分层信息故障诊断方法[J]. 继电器, 2000, 28(10): 15-18.
XU Yi-xun, LU Zheng, GUO Zhi-zhong. Layered information fault diagnosis based on genetic algorithm[J]. Relay, 2000, 28 (10): 15-18.

[8] 丁剑, 白晓民, 王文平, 等. 电力系统中基于 PMU 同步数据的应用研究综述[J]. 继电器, 2006, 34 (6): 78-84.
DING Jian, BAI Xiao-min, WANG Wen-ping, et al. Overview of application researches based on synchronous data measured by PMUs in power system[J]. Relay, 2006, 34 (6): 78-84.

[9] 文福拴, 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方法, 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]. Proceeding of the EPSA, 1998, 10 (3): 1-7.

[10] 文福拴, 钱源平, 韩祯祥, 等. 利用保护和断路器信息的电力系统故障诊断与不可观测的保护的状态识别的模型与 Tabu 搜索方法[J]. 电工技术学报, 1998, 13 (5): 1-8.
WEN Fu-shuan, QIAN Yuan-ping, HAN Zhen-xiang, et al. A tabu search based approach to fault section estimation and state identification of unobserved protective relays in power systems using information from protective relays and circuit breakers[J]. Transactions of China Electro-technical Society, 1998, 13 (5): 1-8.

收稿日期: 2009-08-07; 修回日期: 2009-09-30

作者简介:

戴志辉(1980-), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为电力系统保护与控制;

李强(1980-), 男, 本科, 工程师, 从事电力系统变电一次、二次设计工作。