

DOI: 10.7667/PSPC180371

基于规则式的多重故障诊断及最优送电路径策略

金明亮¹, 李会新¹, 谢俊¹, 杨增力², 郭明宇³, 李敏³

(1. 国网华中调控中心, 湖北 武汉 430077; 2. 国网湖北省电力有限公司, 湖北 武汉 430077;
3. 武汉中元华电科技股份有限公司, 湖北 武汉 430223)

摘要: 为了提高电网多重故障诊断的准确性, 提出一种基于多系统数据信息融合的故障诊断算法。通过对故障全过程的数据特征进行分析, 以故障数据与电网结构图为基础对一次设备进行建模, 形成断路器、线路、母线、主变诊断模型。对来自不同信息源(SCADA、保信系统、录波联网系统)的数据进行统一处理, 形成故障全过程智能诊断数据源, 并以此为基础进行深度数据融合, 提升信息的质量。充分利用故障后的断路器状态和电气量信息, 对故障进行精确诊断, 确定故障区域, 然后, 采用基于规则式的故障恢复路径算法, 给出快速恢复供电的最优的路径。该系统运行情况表明, 所提出的方法具有较强的实用性。

关键词: 数据特征; 融合; 信息质量; 故障恢复

Rule based intelligent fault diagnosis and recovery power delivery algorithm

JIN Mingliang¹, LI Huixin¹, XIE Jun¹, YANG Zengli², GUO Mingyu³, LI Min³

(1. Central China Branch of State Grid Corporation of China, Wuhan 430077, China; 2 State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077, China; 3. Wuhan Zhongyuan Huadian Science and Technology Co. Ltd., Wuhan 430223, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of power grid multiple fault diagnosis, a power grid fault diagnosis algorithm based on multi-layer data fusion is proposed. Through the analysis of the data characteristics of the whole process of fault, the fault data and the power grid structure diagram are used to model the primary equipment, and the diagnosis model of circuit breaker, line, bus and main transformer is formed. The data from different sources of information (SCADA, prudential system, recording system) is treated uniformly to form the whole process of fault intelligent diagnosis data source, and on the basis of in-depth data fusion, the quality of information is improved. This paper makes full use of the circuit breaker status and electrical information after fault to accurately diagnoses the fault and determine the fault area, and then adopts the recovery path algorithm based on fault rules to give the optimal path of the rapid restoration of power supply. The operation results show that the proposed method has strong practicability.

This work is supported by Central China Division of State Grid Corporation of China (No. SGHZ0000DKJS1700140).

Key words: data characteristics; fusion; information quality; fault recovery

0 引言

电力系统故障诊断是利用故障发生后所产生的信息及时、有效地确定故障元件, 为调度人员快速辨识故障提供辅助决策, 为快速恢复供电提供参考依据^[1-3]。但现有的各系统往往存在以下问题: 故障发生时, 传输到调度中心的警报信息由于缺失、误传等原因不能确定故障发生的本质, 与故障无关的

信息也可能传输到调度中心, 或是与故障相关的类似警报信息从多个途径重复传至调度中心, 尤其是在多重故障以及故障未及时处理略有扩大时, 将会导致调度员接受到比较繁杂的报警信息, 难以做出正确的判断和处理^[4]。同时, 在电网发生复杂性故障时, 开关量误动、拒动、信息畸变丢失等不确定性因素导致难以获得准确的诊断结果。因此, 如何综合利用各系统的故障信息进行快速、准确的电网故障诊断至关重要^[5]。

随着各系统不断完善, 系统间的交互愈来愈紧密, 用于电网故障诊断的相关信息可以由多个系统

基金项目: 国家电网华中分部项目资助 (SGHZ0000DKJS 1700140)

获得, D5000 综合智能告警系统可提供基础的数据模型、电网拓扑结构, SCADA 系统能提供大量的断路器以及开关信息, 录波联网系统提供各电气量信息。故障信息之间可以互联共享和互相校验, 可有效地提高故障信息的准确性, 因此必须对多系统的故障信息建立有效合理的融合、使用规则, 才能提高故障诊断的准确性^[6-7]。

文献[8]提出基于 WAMS 的电力系统故障诊断方法, 所构造的用于识别故障位置的判据利用了故障发生后的电气量特性信息, 并可以分析保护和断路器的误动和拒动情况。文献[9-10]对 PMU 的配置进行研究, 提出了利用潮流信息进行故障诊断的方法。文献[11]根据录波联网系统的信息, 提出了基于故障录波的故障综合诊断算法。文献[12-13]根据保信系统中保护的動作信息进行故障诊断, 提出了基于保护信息的故障诊断方法。文献[14-20]提出针对单一数据源的故障诊断方法, 并给出了相应的算法。然而这些方法都有各自的侧重点, 诊断出的结果也略有差异, 无法全方位地展示故障的全过程特征。

本文结合现有的各系统的运行特征, 把可获取的信息引入故障诊断过程中, 将多系统的信息进行整理融合, 以断路器、线路、母线、变压器为单位, 提出建立电网故障诊断模型, 进行故障诊断, 得出准确的故障设备。并以此为基础, 结合现场应用的恢复供电的规则, 制定出最优的送电路径, 构建基于规则式的变电站多重故障智能识别及最优送电路径决策系统。通过实例, 对典型系统进行仿真测试, 验证了该系统的可行性。

1 基于多系统信息的故障诊断系统架构

变电站多重故障智能识别及最优送电路径决策系统的基础数据来源于保信系统、SCADA、WAMS、录波联网等系统。根据目前各系统的分区情况, 其系统架构如图 1 所示。

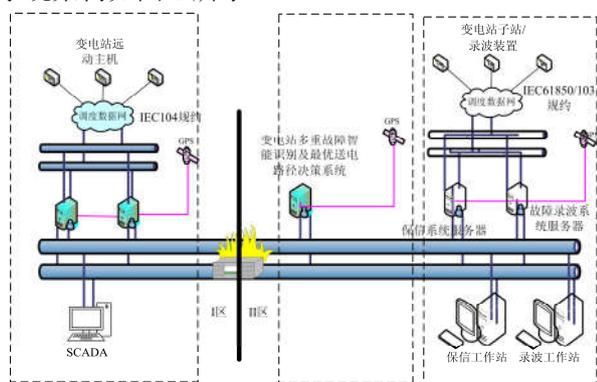


图 1 系统架构

Fig. 1 System structure

整个系统部署在安全 II 区, 考虑到在现有系统架构的基础上不增加设备并且实现起来方便, 直接与 SCADA、保信系统和故障录波联网系统进行数据交互。

2 故障诊断信息模型

实现多层信息融合故障诊断技术的关键在于信息的综合整理。考虑到变电站内, 由于设备的误动、时间偏差、信道传输错误等原因, 造成采集到信息存在较大的不确定性, 因此, 必须对信息进行处理, 提升信息质量。

按照目前各系统信息可信度以及各信息的特征, 数据包含有开关变位信息、电网模型拓扑、电网断面数据、保护波形及简报、故障录波文件, 通过对其进行整理, 形成故障诊断原始文件, 其信息形成过程如图 2 所示。

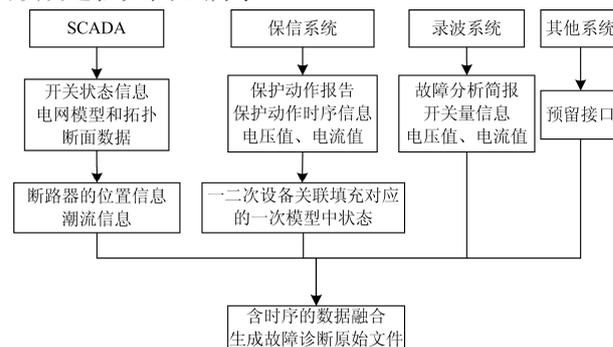


图 2 信息来源对应关系

Fig. 2 Information source correspondence

通过分析各系统的信息特征, 建立故障设备的模型, 对能够反映一次设备与故障分析相关的状态参数进行统一的描述。一方面通过对多源系统将其监视的信息关联关系进行配置, 将与一次设备相关的信息以文件的方式上送至调度端。另一方面, 对表征故障断路器状态的信息实时上送。基于多层数据源的故障诊断系统包含有一二次设备故障时的所有信息。考虑到信息采集过程中, 会出现一个断路器有多个 SOE 信息, 为避免结构体间的重复, 需要将部分信息合并处理。

1) 断路器模型

断路器模型分为断路器本身状态、变位信息以及其保护相关信息。其结构如表 1 所示。

2) 线路模型

线路信息模型包含有线路的实时状态、关联断路器以及保护的相关信息、模拟量信息, 其结构如表 2 所示。

表 1 断路器模型
Table 1 Breaker model

属性名称	涵义
断路器本身状态	
Id	断路器 ID(调度 ID)
Type	断路器类型
Status	断路器初始状态
Curform	断路器 CT 位置
Failureproact	失灵保护动作
Failureprotime	失灵动作时间
Blindproact	死区保护动作
Blindprotime	死区保护动作时间
Fbpronum	失灵和死区所相关联的断路器序号
From	信息来源
断路器变位信息	
Run #N	N 次变位后的状态
Runtime #N	第 N 次变位相对时间

表 2 线路模型
Table 2 Line model

属性名称	说明
线路自身信息	
ID	线路 ID(调度 ID)
Name	线路名称
Type	线路类型
Run	线路状态
From	信息来源
关联断路器	
Sm #N	关联断路器 ID, N 表示关联多个
Diffproact #N	主保护动作。N 取 1,2 表示套数
Backproact #N	后备保护动作。N 取 1,2 表示套数
Hrxproact #N	高抗保护动作, N 取 1,2 表示套数
模拟量信息	
Pre Voltage	故障前电压
Pre Current	故障前电流
Fault Voltage	故障时电压
Fault Current	故障时电流
Fault Distance	故障测距结果

3) 变压器模型

变压器信息模型包含有变压器的运行状态、关联断路器以及保护的相关信息、模拟量信息, 其结构如表 3 所示。

4) 母线模型

母线信息模型包含有母线的运行状态、关联断路器以及保护的相关信息、模拟量信息, 其结构如表 4 所示。

表 3 变压器模型

Table 3 Transformer model

属性名称	涵义
变压器自身信息	
ID	变压器 ID
TYPE	类型
Run	主变运行状态
FROM	信息来源
关联信号量	
SM #N	关联断路器(N 表示断路器序号)
Diffproact #N	主保护动作, N 表示套数
Backproact #N	非电量保护动作, N 表示套数
模拟量信息	
Diff Current	变压器差动电流
Brake Current	变压器制动电流

表 4 母线模型

Table 4 Bus model

属性名称	涵义
ID	母线 ID(调度 ID)
Run	母线运行状态
FROM	信息来源
关联断路器	
Sm #N	关联断路器(N 表示断路器序号)
DiffProact #N	主保护动作, N 取 1,2 表示套数
模拟量信息	
Diff Current	差动电流
Brake Current	不平衡电流

3 故障诊断规则

由多系统提供的数据间相互独立, 部分数据存在冗余, 通过建立故障诊断信息模型, 实现了数据的关联、整合、过滤以及筛选, 构成故障诊断的基础数据, 并以此为基础, 建立合理的故障诊断规则, 完成故障的综合诊断。

3.1 线路故障诊断规则

对于线路故障诊断, 首先要对其运行状态进行判断。线路的运行状态可结合断路器的位置进行实时判断。当线路各侧断路器最少有一个处于运行状态, 并且该线路的电流不为零, 则该线路处于运行状态; 当线路两侧的断路器均处于断开状态, 并且该线路的电流降为零, 则该线路处于停运状态。

针对线路故障, 如果该线路的主保护动作, 其所关联主断路器全部跳开, 并且断路器跳开是由该保护发出的, 同时结合该线路的故障录波中的模拟量信息, 具有典型的故障特征, 则该线路属于故障

设备。其诊断规则如图 3 所示。

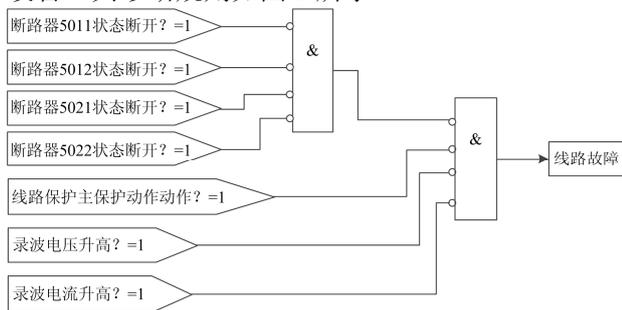


图 3 线路判断规则

Fig. 3 Judgment rule of line

3.2 保护试验过滤规则

为减少线路在试验过程中的故障误判，引入保护试验过滤规则，如图 4 所示。考虑到实际过程中，保护的压板状态无法准确获取，采用辅助断路器信息和故障录波信息综合判断是否处于保护动作试验环境。

保护试验时，线路与母线之间的断路器应处于断开状态。故障录波数据中，线路所关联的母线电压无波动，该数据中只有保护动作信息，无断路器变位信息。保护过程中，保信系统有保护的报告，但 SCADA 系统没有断路器的变位信息。

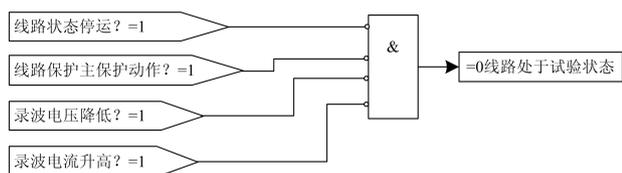


图 4 保护试验过滤规则

Fig. 4 Filtration rule of protection test

3.3 线路由运行转操作规则

为避免线路由运行转操作和故障导致的断路器变位对故障诊断的影响，需要对断路器的变位时序进行分析。保护动作导致的断路器变位相差只有几十毫秒，人工操作时断路器变位时间相差会有几分钟。当断路器判定为非保护跳闸，在规定的时间内，该设备相关联的其他断路器都为非保护跳闸时，设置该线路为人工操作。线路转操作判断规则如图 5 所示。

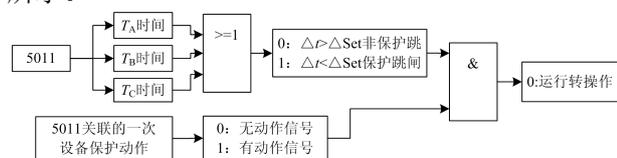


图 5 线路转操作判断

Fig. 5 Line switching operation judgment

(1) 当断路器由分到合时，根据其他判据判定该设备为故障状态，或检测要保护动作报告中有重合闸信号，则该断路器为故障跳闸后合闸。

(2) 当断路器由分到合时，根据其他判据判定该设备前状态为操作状态，则该断路器的分到合状态为操作转运行。

3.4 功率计算

取故障录波中的稳态数据段的电压电流值进行傅里叶变换。

当 $P > 0$ 时，本节点的功率流出母线；

当 $P < 0$ 时，本节点的功率流向母线。

3.5 主变故障诊断规则

针对主变故障，如果该主变的主保护或后备动作，其所关联主断路器全部跳开，并且断路器跳开是由该保护发出的，同时结合该主变的差流大于制动电流，则该主变属于故障设备。其诊断规则如图 6 所示。

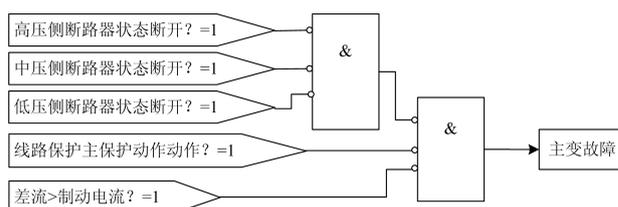


图 6 主变判断规则

Fig. 6 Judgment rule of main transformer

3.6 母线故障诊断规则

针对母线，如果该母线的主保护或后备动作，其所关联主断路器全部跳开，并且断路器跳开是由该保护发出的，同时结合该母线的差流大于制动电流，则该母线属于故障设备。其诊断规则如图 7 所示。

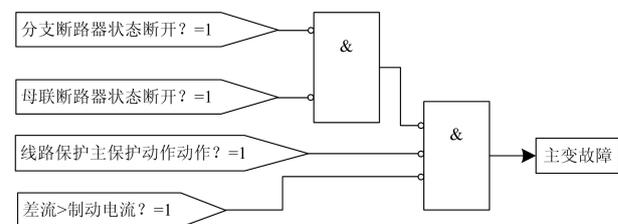


图 7 母线判断规则

Fig. 7 Judgment rule of bus

3.7 多重故障诊断规则

针对因 CT 故障、断路器失灵或死区保护动作导致的连锁跳闸，导致多个一次设备停运，则该故障应为多重故障，故障设备应为断路器，受该断路器影响，其他断路器变位对应的一次设备应不是故障设备。其诊断流程如图 8 所示。

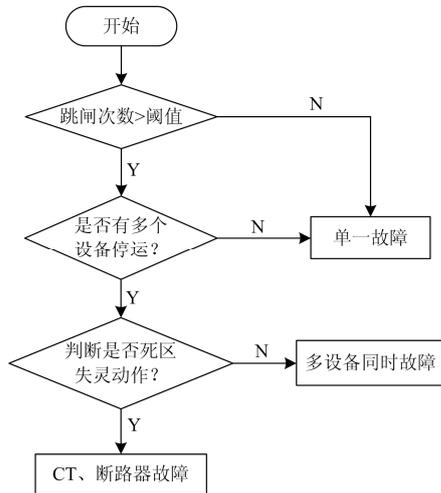


图 8 多重故障判断规则

Fig. 8 Judgment rule of multiple fault

4 基于规则式的恢复供电路径策略

当电网发生故障时，通过上述诊断策略判断出故障设备后，采用自动方式隔离故障电气设备，依据负荷的需求，在满足相关条件约束的情形下，找到一种最优送电的方案，对非故障设备进行恢复供电，特别是在复杂故障时(如 CT 故障后)导致多条线路连跳，可有效降低停电时间。针对恢复过程应当遵守一系列的操作规则。

对于仅有单条线路故障时的送电规则如下：

- (1) 当线路故障类型为单相或相间故障时，尝试送电一次，三相故障不送。
- (2) 从远离故障点(10%~20%)侧先送。
- (3) 从没有高抗那一侧开始送。
- (4) 如果是一侧电厂，则从变电站侧送。

对于多条线路同时故障，其送电规则如下：

- (1) 如果其中包含有省间联络线，则先送该线路。
- (2) 系统会读入 D5000 重要断面数据，当线路处于某一个重要断面中，且跳闸前，该断面处于重载状态(大于当前断面总限额的 80%)，重载线路优先送。

对于母线或主变故障时，其送电规则如下：

有任意母线或主变的主保护动作，该母线或主变必须先检查无误后才能送电。

5 结论

本文分析了故障时多系统的信息特征，对目前调度端各系统的故障信息进行整理，建立了基于多层信息的故障诊断模型。通过该模型可提高故障相关信息的准确性，有效地提高故障诊断的精确性和

过程处理的效率。故障恢复依赖故障诊断的结果，通过设置相关的规则，制定快速恢复供电的路径决策，为现场运维人员提供有效的参考依据。

变电站多重故障智能识别及最优送电路径决策系统在华中调控中心运行以来，多次准确判断故障，并给出了合理的恢复送电路径。系统运行表明，该诊断模型和诊断规则具有良好的可行性，为调度端的决策人员提供更全面可靠的信息，具有较强的现场实用性。

参考文献

[1] 闫丽梅, 周忠媛, 徐建军, 等. 基于告警时序的输电设备故障定位方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 38-48.

YAN Limei, ZHOU Zhongyuan, XU Jianjun, et al. Research on the method of fault location of transmission device based on time series of alarm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 38-48.

[2] 刘毅, 高振兴, 郭创新, 等. 一种考虑多层信息融合的电网故障诊断辅助决策方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 14-18.

LIU Yi, GAO Zhenxing, GUO Chuangxin, et al. An auxiliary decision making method for power grid fault diagnosis considering multi layer information fusion[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 14-18.

[3] 董明, 韦刘红, 文福拴, 等. 电力系统故障诊断的机会约束规划模型与方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(20): 47-52.

DONG Ming, WEI Liuhong, WEN Fushuan, et al. A chance-constrained programming based model and method for power system fault diagnosis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(20): 47-52.

[4] 杨健维, 何正友. 基于时序模糊 Petri 网的电力系统故障诊断[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(15): 46-51.

YANG Jianwei, HE Zhengyou. Power system fault diagnosis approach based on time sequence fuzzy Petri net[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(15): 46-51.

[5] 宣晓华, 周野, 宋晓芳, 等. 基于系统与元件动态交互量化分析的电力系统连锁故障事故链识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 101-109.

XUAN Xiaohua, ZHOU Ye, SONG Xiaofang, et al. A novel searching method of fault chains for power system cascading outages based on quantitative analysis of dynamic interaction between system and components[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 101-109.

- [6] 周子冠, 白晓民, 李文锋, 等. 基于广域测量系统的电网故障在线智能化诊断与分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 1-7.
ZHOU Ziguan, BAI Xiaomin, LI Wenfeng, et al. Novel smart on-line fault diagnosis and analysis approach of power grid based on WAMS[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 1-7.
- [7] 王海云, 田莎莎, 张再驰, 等. 基于负荷预测与关联规则修正的不良数据辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 24-33.
WANG Haiyun, TIAN Shasha, ZHANG Zaichi, et al. A new bad data identification method based on load forecasting and the correction of association rule[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 24-33.
- [8] 林霞, 李瑶, 李强, 等. 基于多 Agent 的分层扩展电网故障信息融合处理系统[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 129-137.
LIN Xia, LI Yao, LI Qiang, et al. Information integration processing system of layered-expanding grid fault based on multiple Agent[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 129-137.
- [9] 高振兴, 郭创新, 俞斌, 等. 基于多源信息融合的电网故障诊断方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 17-23.
GAO Zhenxing, GUO Chuangxin, YU Bin, et al. Research on power grid fault diagnosis method based on multi-source information fusion[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 17-23.
- [10] 王涛, 张尚, 顾雪平, 等. 电力系统运行状态的趋势辨识[J]. 电工技术学报, 2015, 30(24): 171-180.
WANG Tao, ZHANG Shang, GU Xueping, et al. Trends identification of power system operating states[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(24): 171-180.
- [11] 王海港, 黄太贵, 孙月琴, 等. 多变电站故障录波数据同步自动化方法与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 102-107.
WANG Haigang, HUANG Taigui, SUN Yueqin, et al. Auto synchronization method and its implementation of fault recorder data from multi-substations[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 102-107.
- [12] 王跃强, 廖华兴, 袁晓青, 等. 基于保信系统的继电保护状态评价系统的开发与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 134-139.
WANG Yueqiang, LIAO Huaxing, YUAN Xiaoqing, et al. Development and application of relay protection condition evaluation system based on fault information processing system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 134-139.
- [13] WEI Liuhong, GUO Wenxin, WEN Fushuan, et al. Waveform matching approach for fault diagnosis of high voltage transmission lines employing harmony search algorithm[J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2010, 4(7): 801-809.
- [14] LEE H J, AHN B S, PARK Y M. A fault diagnosis expert system for distribution substations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 92-97.
- [15] MAHANTYR N, GUPTA P B D. Application of RBF neural network to fault classification and location in transmission lines[J]. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 2004, 151(2): 201-212.
- [16] GUO Wenxin, WEN Fushuan, LIAO Zhiwei, et al. A temporal constraint network based approach for alarm processing in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2435-2447.
- [17] GUO Wenxin, WEN Fushuan, LEDWICH G, et al. An analytic model for fault diagnosis in power systems considering malfunctions of protective relays and circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3): 1393-1401.
- [18] YAN Y, QIAN Y, SHARIF H, et al. A survey on smart grid communication infrastructures: motivations, requirements and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 5(1): 5-20.
- [19] XUE C, LI C, HUANG X, et al. Application of intelligent substation information integration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(7): 110-114.
- [20] GUO S, HUANG H Z, WANG Z, et al. Grid service reliability modeling and optimal task scheduling considering fault recovery[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2011, 60(5): 263-274.

收稿日期: 2018-04-02; 修回日期: 2018-06-08

作者简介:

金明亮(1978—), 男, 博士, 高工, 主要研究方向为电力系统保护与控制;

李会新(1973—), 男, 硕士, 高工, 主要研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: jdbh2007@sina.com

(编辑 张爱琴)