

## 基于实时站内图映射的故障准确辨识方法

李乃永<sup>1</sup>, 林霞<sup>2</sup>, 李静<sup>3</sup>, 黄秉青<sup>3</sup>, 李瑶<sup>2</sup>, 王昕<sup>3</sup>, 吴金玉<sup>4</sup>, 刘承禄<sup>4</sup>

(1. 国网山东省电力公司, 山东 济南 250001; 2. 国网枣庄供电公司, 山东 枣庄 277102; 3. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250002; 4. 国网潍坊供电公司, 山东 潍坊 261021)

**摘要:** 为了提高电网故障分析处理的快速性, 提出一种基于实时站内图映射的故障矢量分析及故障诊断方法。该方法采用基于站内设备通用信息统一建模及映射技术, 自动上传相关事件的故障录波数据、保护动作信息, 并实现相关间隔的故障电流矢量和的自动计算, 为故障点快速定位和保护动作行为精细评价提供了有效工具。实例分析表明, 本方法实现了各间隔的故障数据在站内图上统一直观展示, 快速准确辨识故障位置和故障类型, 在多起电网故障处理提供了急需的决策支持。

**关键词:** 故障录波系统; 通用信息模型; 故障矢量分析; 故障辨识定位

### Accurate fault identification method based on real-time substation graph mapping

LI Naiyong<sup>1</sup>, LIN Xia<sup>2</sup>, LI Jing<sup>3</sup>, HUANG Bingqing<sup>3</sup>, LI Yao<sup>2</sup>, WANG Xin<sup>3</sup>, WU Jinyu<sup>4</sup>, LIU Chenglu<sup>4</sup>

(1. State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250001, China; 2. State Grid Zaozhuang Power Supply Company, Zaozhuang 277102, China; 3. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250002, China; 4. State Grid Weifang Power Supply Company, Weifang 261021, China)

**Abstract:** In order to improve the rapidity of power system fault analysis and processing, this paper introduces a kind of fault identification method based on the real-time substation graph mapping, with which fault wave record and protection information can automatically upload and fault current vector can be calculated in real time through the general information unified modeling station equipment and mapping technology. The fault vector analysis diagnosis method provides an effective tool for fault location and accurate evaluation of protection operation. Example analysis shows that each gap unit fault data can be shown in a visual unity and fault location and fault type can be identified quickly and accurately. This system provides a much-needed decision support in several fault handling of the large-scale power grid.

**Key words:** fault recorder networking system; general information unified model; fault current vector automatically calculation; fault diagnosis and location

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)08-0058-06

## 0 引言

随着电网规模的扩大, 电网联系不断加强, 恶劣天气、局部电网故障可能引起事故波及范围扩大的概率不断增大。因此, 电网发生故障后, 如何快速进行故障类型判断和故障点定位具有重要意义<sup>[1-8]</sup>。现行模式下, 考虑到故障录波联网系统的覆盖率不断上升, 基于故障录波联网系统, 将各间隔的故障数据在站内图上统一直观展示的可视化高级应用能快速、全面地呈现故障信息, 是目前调度处最想实现的实用性最强的应用。其包括的内容如下。

1) 事故后设备故障信息的收集;

2) 故障设备保护信息(包括故障录波)的可视化;

3) 事故后故障性质判断及保护动作行为评估结果的可视化;

4) 事故后故障隔离及调整系统运行方式策略的可视化。

通过上述可视化内容的实现将完成调度由人工分析型向智能诊断型的转变。

本文以故障事件发生为驱动, 将相关事件的故障录波文件、保护信息自动上传, 建立基于实时站内图映射的故障矢量分析及故障诊断平台。该平台基于一次拓扑图可伸缩矢量图(svg)以及通用信息模型(cim), 搭建站内全部电流互感器的模型, 将站

内设备对应的电流流向、大小等具体的物理量通过 CT 建模映射为基于节点及支路的电流矢量图界面; 以故障量(包括增量及负、零序电流量)流向为搜索路径, 确定需要融合的故障设备子站, 形成广域信息融合平台; 以故障量为搜索引擎, 统一直观展示各间隔故障序分量幅值和实际流向, 实现相关间隔故障电流矢量和的自动计算, 实现故障点快速定位和保护动作行为准确评价。

### 1 基于实时站内图映射的故障矢量分析平台构架

在广域信息融合过程中, 某一时刻电网发生故障后, 故障录波元件的采样信息、保护装置及 SCADA 信息将上传至统一调度平台; 经过信息分析提取与故障元件相关度高的故障录波, 由相应 CT 建模完成录波器端到系统实时运行图的映射; 通过各序故障分量的提取, 建立基于实时运行方式的各序故障实时矢量图; 通过相关 SCADA 信息的分析及自解释, 锁定故障对象; 最后在统一平台进行交互, 完成故障判断决策支持平台的实时矢量图及故障定位的结论直观展示。该平台结构如图 1 所示。

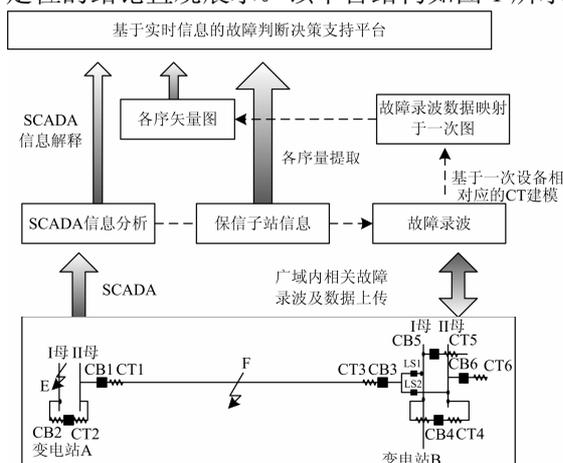


图 1 基于实时信息的故障判断决策支持平台

Fig. 1 Fault diagnosis decision support platform based on real-time information

从信息收集到故障判断决策的过程中存在两方面的信息融合: 一方面是基于 SCADA 和保信子站上传信息的融合过程; 另一方面是基于各个故障录波波形图的图形融合过程。这两个过程交叉比较, 相辅相成; 通过信息的融合、闭环, 最终实现故障定位及性质判断。这种具有一定开放性的信息融合过程, 对判断多间隔的汇流元件的故障情况以及发展性故障的分析十分有效。以发展性故障为例, 若对时间节点进行分割, 在故障发生的不同时间节点

得到的故障对象的判断是一致的, 但故障性质的判断结果却是不同的。由于不同的时间段对应不同的信号集合, 也对应不同的可闭环事件的信息集合, 故录波矢量分析的结果也是对应不同时间窗口下的故障性质分析结论。因此, 只要两者对事故性质的判断一致即认为是可闭环事件, 再结合录波实时矢量图给出最终结论。

### 2 基于方向矢量判断的高容忍度广域故障诊断方法原理

在进行故障诊断时, 若将每个元件(不论是线路、变压器、母线)视为一个封闭点, 根据差流原理可知, 与该封闭点相连接的各支路电流中的任意一个量均可由剩余  $n-1$  个量线性表示, 且这  $n-1$  个量线性无关。因此, 在锁定故障元件时可利用这  $n-1$  个量作为判断某一元件是否发生故障的阈值。现引入两个定义  $F_{Dir}(i)$  和  $F_{Component}(i)$ :

$$F_{Dir}(i) = \begin{cases} 1 & i \text{ 元件判断其故障方向为正向} \\ -1 & i \text{ 元件判断其故障方向为反向} \\ 0 & \text{元件判断方向失败} \end{cases} \quad (1)$$

$$F_{Component}(i) = \left| \sum_{j=1}^n F_{Dir}(j) \right| \quad (2)$$

式中,  $n$  表示与被锁定元件直接相关的方向判断元件数。

用于故障元件锁定的判断规则 1:

若  $F_{Component}(i) > F_{Set}(i)$ , 则被锁定元件为故障状态;

若

若  $F_{Component}(i) < F_{Set}(i)$ , 则被锁定元件为正常状态;

若

若  $F_{Component}(i) = F_{Set}(i)$ , 则被锁定元件可能故障;

$F_{Set}(i)$  是判断被锁定元件为故障元件的阈值。

其定义为与被锁定元件直接相关的方向判断元件总个数减 1, 即为  $n-1$ 。

扩展到任一广域封闭区域, 存在以下区域内是否发生故障的闭环判断规则 2:

$$F_{Confirm}(i) = \left| \sum_{j=1}^k F_{N-R}(j) \right| \quad (3)$$

式中,  $k$  表示所需判断的封闭区域分界点直接相关故障方向元件个数。

如果存在  $F_{Confirm}(i) > F_{Con-set}(i)$ , 则可闭环信息判断成功。

其中  $F_{Con-set}(i)$  是可闭环信息的判断阈值, 即封闭区域分界点方向动作个数减 1,  $k-1$ 。

为了保证优先考虑最小故障隔离范围, 首先假

设故障为单元件线路，如果故障发生在母线直接相关线路远端 II 段距离交叉区时，可判为母线故障，因此存在判断规则 3 如下：

如果存在  $DR_C^{\text{II}}(i)=1$ ，则故障在母线。

其中  $DR_C^{\text{II}}(i)=1$  为母线直接相关线路远端保护 II 段距离动作信息。

为了使事件性质判据可以实现故障全过程监测，引入开关动作行为，则判断规则 4 如下：

若  $WR_S^{\text{T}}(i)=1$  且  $CB_S(i)=0$ ，则  $CB_B(i)=1$  ( $i \in N_B$ )。

其中  $WR$  为广域保护所发跳闸信息；当开关未变位，则将跳闸开关扩展至其背后侧直接相关开关  $N_B$ 。

### 3 基于方向矢量判断故障诊断方法算法原理及平台搭建

#### 3.1 基于负序故障电流的一次电流矢量图

以负序故障分量为例说明方向矢量算法原理，该原理适用于故障分量(包括突变量，零序量及故障量综合判据)。假设母线上有  $n$  条分支(包括进线和出线)，电流正方向为母线流向线路。如图 2 所示，在出线  $i$  上 k1 点发生不对称故障；由于负序电流存在于各种不对称故障中，则由基尔霍夫电流定律有：

$$-i_i^{(2)} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n i_j^{(2)} \quad (4)$$

式中， $i_j^{(2)}$ 、 $i_i^{(2)}$  分别为不对称故障时流向支路  $j$ 、 $i$  的负序电流。

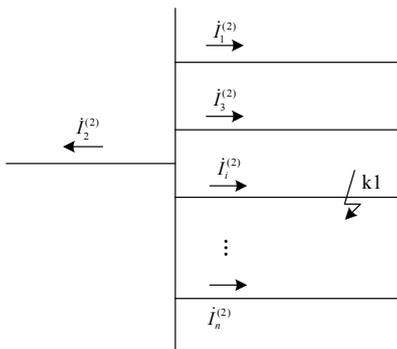


图 2 母线接有  $n$  条分支的变电站

Fig. 2 Bus bar with  $n$  branches in the substation

已知负序阻抗角范围为  $70^\circ \sim 85^\circ$ ，故  $\phi_{i_j}^{(2)} = -(70^\circ \sim 85^\circ)$ ， $\phi_{i_i}^{(2)} = 95^\circ \sim 110^\circ$ ，各负序电流满足矢量合成法则，如图 3 所示。

零序故障电流的一次矢量图除了其故障方向搜索路径与接地点有关外，其他性质与负序相似，不

再赘述。

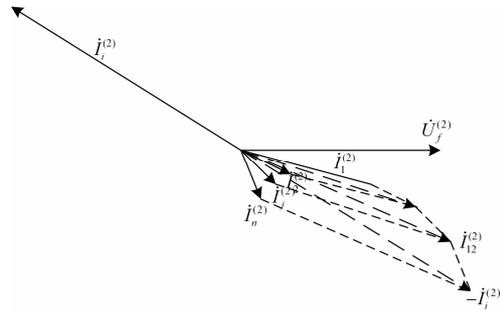


图 3 支路  $i$  不对称故障各支路负序电流的矢量关系

Fig. 3 Branch  $i$  negative sequence current vector relationship for asymmetric fault

#### 3.2 基于故障量的搜索引擎设定

从上述分析可知，以本地电压为基准量即可确定故障量(包括突变量、零、负序量)的搜索方向，通过基于站内一次设备的 CT 建模和通道配置，以及在故录联网系统上建立的基于网络的广域网故障状态序网流向图，并以此作为搜索引擎，可快速确定故障设备。由于采用的是基于当地量(电流、电压量)的故障分量方向的确定，然后经 coBase 平台确定流过一次系统的故障序量方向，因此这种定性的搜索方向，加以借助一次系统中信息的融合所确定的故障搜索方向，克服了广域同步的问题，是简洁实用的故障系统基于网络及信息融合的高级应用。

#### 3.3 基于 coBase 系统的站内 CT 建模

建立统一的故障判断决策支持平台需要将实际电网中分布式存在的电力设备纳入其中，根据 IEC TC57 提出的 IEC61970E 和 IEC61850<sup>[9-15]</sup>可将现有电力系统设备以统一的标准纳入到 EMS/SCADA 系统中。这种基于 IEC61970 的全局信息建模建立的全网一次、二次保护设备的数据库，包含一次设备真实情况及二次保护配置情况，并可根据网内实际设备情况进行实时更新，如图 4 所示。在此基础上实现的继电保护基础信息平台(coBase)采用可伸缩矢量图(svg)以及通用信息模型(cim)，可统一抽取特征量信息，用于搭建站内所有 CT 电流互感器，包括对应安装位置及变比等模型信息。同时将 CT 与站内故障录波通道一一对应，完成将站内设备对应的电流流向大小等这些具体的物理量通过 CT 建模这一中间量，映射为直观的基于节点及支路的电流矢量图界面；通过滤波算法实现基于各序网的故障电流流向图，据此实现以故障后电流流向快速锁定故障定位及故障性质判定一系列分析，提供了直观有效的分析平台，如图 5 所示。

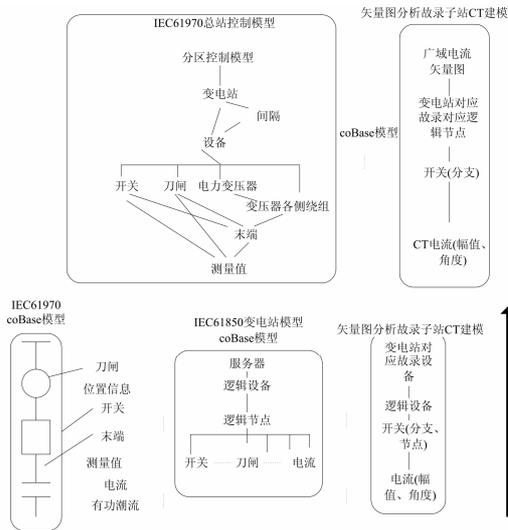


图4 基于 IEC61970 的 coBase 平台  
Fig. 4 IEC61970 based coBase platform

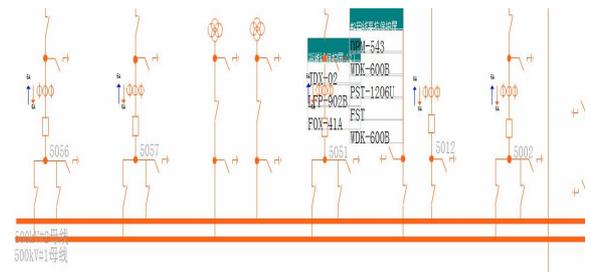


图5 基于 coBase 的 CT 建模平台  
Fig. 5 coBase based CT modeling platform

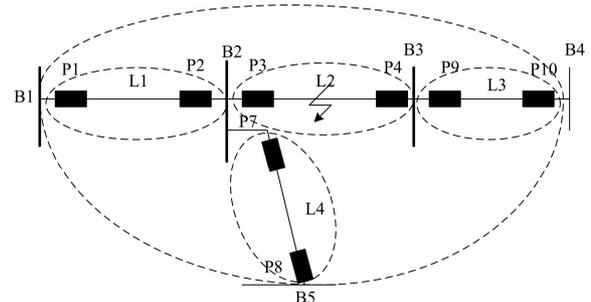
### 3.4 基于 CT 建模的实时站内图映射的故障矢量分析及故障诊断平台

变电站基础数据平台和故障录波联网系统可通过数据接口进行数据融合, 数据分布整个网络的关系型数据库中, 使用目录服务基于层次树状结构访问这些数据库, 把从多种来源实时集成的数据提供给功能故障矢量分析及故障诊断平台。这种信息集成可以通过网络服务使用的逻辑 XML 编码按照标准建模。其中, Web 服务定义语言(WSDL)可用于定义提供特定服务的语义以及如何使用它; HTTP/S 模式中的答单对象访问协议(SOAP)可以用来完成网络服务要求。通用描述, 发现和集成的 UDDI 协议是用来发现 Web 服务。信息集成技术, 如 XML 的公共密钥管理系统(XKMS)和 XML 签名可以扩展安全规定, 压缩/解压技术可用于提高信息传输速率。

采用模块化和可扩展的设计便于新的站点接入后新的变电站建模及相应 CT 的增添, 也可以随着网络中量测点增加或者开关及 CT 的增加来更新其模型, 同时可以在已有的各序电流矢量图基础上做出多种高级应用。最直接的功能即是以各序电流量为搜索引擎的故障点定位, 各序网络直接给出的故障性质判断等这些高级应用。这一系统的递增可以是: 区域面积的增加, 变电站接入数量及故障录子站、功能及设备增加。这些都建立在标准的计算机, 通信和数据综合基础上, 如图 6(a)所示, 其中基于 CT 建模后的站内实时电流流向图其 CT 极性是可调的, 图 6(b)和表 1 为高级应用实例判断。



(a) 基础数据平台



(b) 高级应用案例

图6 基于 coBase 的 CT 建模平台  
Fig. 6 CT modeling-based fault diagnosis platform

表1 基于方向矢量原理的故障辨识

Table 1 Fault identification based on direction vector principle

判断区	元件	方向元件	F <sub>Dir</sub>	F <sub>Set</sub>	F <sub>Component</sub>	状态
最小判别区	L2	P3	1	1	2	故障
		P4	1	1	2	
	B2	P2	-1			正常
		P3	1	2	1	
最大判别区	L1	P1	1	1	0	正常
		P2	-1	1	0	
	L3	P9	-1	1	0	正常
		P10	1	1	0	
	L4	P7	-1	1	0	正常
		P8	1	1	0	
		P4	1	1	0	
闭环判断	B3	P4	1	1	0	正常
		P9	-1	1	0	
		P1	1	1	0	
闭环判断	P10	P1	1	2	3	闭环
		P8	1	2	3	
		P10	1	2	3	

### 4 具体算例

某 220 kV 变电站(主接线如图 7 所示)发生故障时, 220 kV III 线两侧 C 相开关跳闸, 85 ms 后该站与 220 kV III 线运行于同一母线的 220 kV I 线、220 kV II 线、#1 主变、母联开关等间隔均三相跳闸不重合。采用上述 CT 建模的实时站内图映射方法进行故障量计算分析, 故障矢量序分量值见表 2、表 3, 序分量图见图 7。

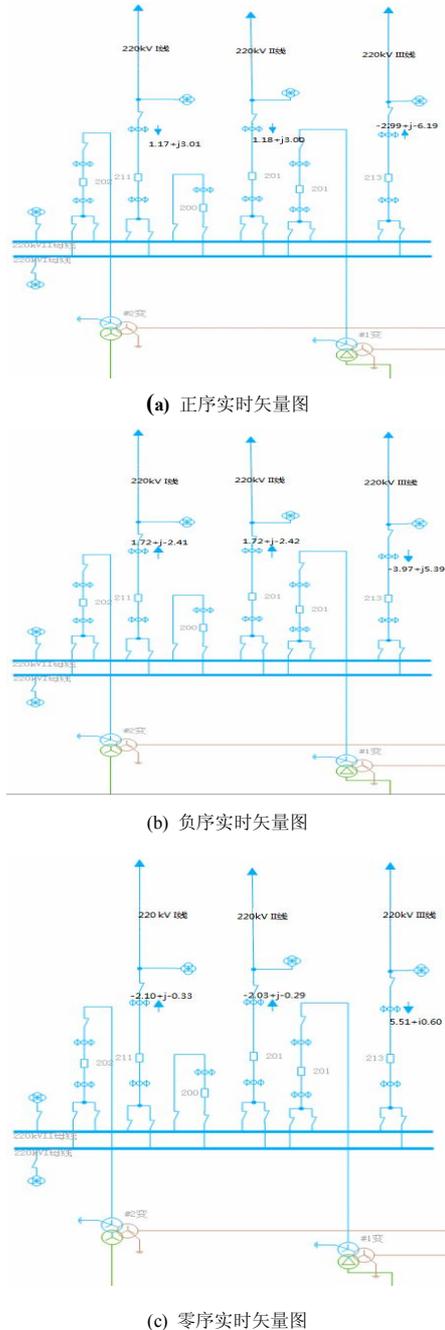


图 7 故障时的各序量流向图

Fig. 7 Various fault sequence flow chart

表 2 故障后, II 母线序分量列表

Table 2 Fault sequence of II bus

间隔名称	正序	负序	零序
220 kV I 线	1.17+j3.01	1.72-j2.41	-2.10-j0.33
220 kV II 线	1.18+j3.00	1.72-j2.42	-2.03-j0.29
220 kV III 线	-2.99-j6.19	-3.97+j5.39	5.51+j0.60
I#主变	0.25+j0.06	0.23-j0.23	-1.38+j0.01
II#主变	0.33+j0.12	0.29-j0.29	0.01+j0.00
矢量和	-0.01+j0.00	-0.01+j0.04	0.00-j0.01

表 3 故障后, 220 kV III 线路, 序分量列表

Table 3 Fault sequence of line 220 kV III

间隔名称	正序	负序	零序
A 站侧	-2.99-j6.19	-3.97+j5.39	5.51+j0.60
B 站侧	-4.22-j9.04	-5.63+j8.50	11.3+j0.77
矢量和	-7.21-j15.23	-9.60+j13.89	16.81+j1.37

故障时从站内各间隔故障矢量展示图可直观看出, 各间隔故障正序量均流向 220 kV III 线路, 故障零、负序分量均由 220 kV III 线路经母线流向各分支, 因此可确定此次电网故障为 220 kV III 线路 C 相接地故障, 故障点在 220 kV III 线路 C 相, 母线保护动作行为异常导致 220 kV I 线、220 kV II 线、#1 主变、母联开关三相跳闸不重合。

### 5 结论

本文建立的基于实时站内图映射的故障矢量分析及故障诊断平台, 可实现相关间隔的故障电流矢量和的自动计算, 为故障点快速定位和保护动作为准确评价提供了有效工具。主要特点如下。

(1) 基于继电保护基础信息平台(coBase)可伸缩矢量图(svg)以及通用信息模型(cim), 搭建站内所有 CT 电流互感器的模型信息, 将站内设备对应的电流流向、大小等物理量通过 CT 建模这一中间环节, 映射为直观的基于节点及支路的电流矢量图界面, 为快速锁定故障元件、进行暂态故障分析提供了直观有效的分析平台。

(2) 采用基于通用信息模型(cim)CT特征值的提取技术, 建立与录波通道的有效链接, 实现录波通道采样值(包括暂态故障量)与站内 CT 一一映射的关系, 进而实现基于站内设备及其拓扑关系决定的各故障序网图的建模。

(3) 实现了故障情景下, 以站内设备为背景, 以故障电流向为呈现形式的分析界面, 可以快速实现故障元件的判断, 特别是具有汇流作用的多元件联接元件的故障判断直观、有效。

## 参考文献

- [1] HUANG Y C, YANG H T, HUANG C L. A new intelligent hierarchical fault diagnosis system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(1): 349-356.
- [2] MINAKAWA T, KUNUGI M, SHIMADA K. Development and implement of a power system fault diagnosis expert system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(2): 932-940.
- [3] Working Group H-5 of the Relaying Channels Subcommittee of the IEEE Power System Relaying Committee. A new standard for common format for transient data exchange[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(4): 1920-1926.
- [4] 方勇灵, 陆榛, 宋福海, 等. 一种继电保护故障信息智能分析方案及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(5): 114-118.  
FANG Yongling, LU Zhen, SONG Fuhai, et al. Program and application of relay fault information intelligent analysis[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(5): 114-118.
- [5] 童晓阳, 谢红涛, 孙明蔚. 计及时序信息检查的分层模糊Petri网电网故障诊断模型[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(6): 63-68.  
TONG Xiaoyang, XIE Hongtao, SUN Mingwei. Power system fault diagnosis model based on layered fuzzy Petri net considering temporal constraint checking[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6): 63-68.
- [6] 郭创新, 游家训, 彭明伟, 等. 基于面向元件神经网络与模糊积分融合技术的电网故障智能诊断[J]. 电工技术学报, 2010, 25(9): 183-190.  
GUO Chuangxin, YOU Jiaxun, PENG Mingwei, et al. A fault intelligent diagnosis approach based on element-oriented artificial neural networks and fuzzy integral fusion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(9): 183-190.
- [7] 杨健维, 何正友. 基于时间约束 Petri 网的电网警报处理及故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 77-84.  
YANG Jianwei, HE Zhengyou. Power systems alarm processing technology and fault diagnosis based on Petri nets with timing constraints[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 77-84.
- [8] 宋功益, 王晓茹, 周曙. 基于贝叶斯网的电网多区域复杂故障诊断研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 20-25.  
SONG Gongyi, WANG Xiaoru, ZHOU Shu. Research on complex faults diagnosis of multi-area power network based on Bayesian networks[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 20-25.
- [9] 刑佳磊, 杨洪耕, 陈文波. 智能电网框架下的开放式电网模型管理系统[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 227-232.  
XING Jialei, YANG Honggeng, CHEN Wenbo. Model design of electric system state estimation based on CIM[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 227-232.
- [10] 罗建, 朱伯通, 蔡明, 等. 基于CIM XML 的CIM 和 SCL 模型互操作研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 25(7): 18-22.  
LUO Jian, ZHU Botong, CAI Ming, et al. Interoperability of CIM and SCL model based on CIMXML[J]. Power System Protection and Control, 2011, 25(7): 18-22.
- [11] 罗杰, 程宏波, 陈赤培. 基于CIM 模型的电力企业应用集成系统的研究与设计[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(13): 74-77.  
LUO Jie, CHENG Hongbo, CHEN Chiwei. Research and design of data exchange platform based on CIM in power system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(13): 74-77.
- [12] IEC61970 energy management system application program interface part 301: common information modelbase[S]. 2007.
- [13] IEC61850 communication networks and system in substations part 6: configuration description language for communication in electrical substations related to IEDs[S]. 2006.
- [14] 崔巍, 史永, 孙兵. 基于IEC61970/61968 电网模型构建和整合[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17): 60-63.  
CUI Wei, SHI Yong, SUN Bing. The construction and integration of grid model based on IEC61970/61968[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 60-63.
- [15] 高翔. 数字化变电站应用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 142-150.

收稿日期: 2014-06-17; 修回日期: 2015-01-31

作者简介:

李乃永(1981-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行与控制、故障诊断、分布式发电等。E-mail: guyan1127@163.com

(编辑 姜新丽)