

基于多源信息的电网故障综合分析系统

当前,各种电网故障诊断分析系统各自独立运行,缺乏协同机制,导致在对电网故障进行定位、分析和处理的过程中难免比较片面,也造成了事故后分析报告的繁杂臃肿。为进一步加强电网故障分析水平,充分挖掘现有故障分析系统的潜力,更好地协调处理多源头故障信息数据,提出了一种基于多源信息的电网故障综合分析系统。该系统充分利用了多源故障信息系统的故障数据和相关信息,以故障相关的时间信息为坐标,通过对电网结构典型特征的解析,对提高故障分析准确性及保护动作评价正确性等相关指标具有重要意义。

谢俊 李会新 金明亮/国家电网公司华中分部
李敏 赵立/武汉中元华电科技股份有限公司

0 引言

随着电力行业的不断发展,导致电能消耗持续增长,电网规模不断扩大,结构也日益复杂,使得影响电力系统运行的不稳定因素越来越多。同时随着人民生活水平的提高,人们对电力的需求和依赖性越来越大,对安全、优质供电的需求越来越强。

电网系统作为一个高度复杂、规模巨大的动态系统,运行中的不可预料因素很多,发生故障的可能性越来越大。研究和开发有效的故障分析方法具有很大的现实意义和实用价值。

现阶段的SCADA、WAMS、保信系统和故障录波系统等均有自己的一套告警逻辑和故障判断依据,但往往局限于自己系统本身,信息来源不足,缺乏综合分析定位和评价手段。

本文引入了一种新的电网故障综合分析手段,将已有的SCADA、WAMS和故障录波系统等提供的信息综合起来,

更准确地进行故障元件诊断、故障简报推送、事故后数据分析和保护动作行为评价等,对于电力系统的安全稳定运行起着十分重要的作用。

1 电网故障分析信息源

电网中的各类自动装置为电网工作人员的故障分析提供了充足的数据,自动装置将测得的信息上送给不同的故障分析系统,再由不同的故障分析系统(故障信息源)处理故障信息,并推送给电网相关工作人员,以完成故障信息分析、告警与故障处理等相关工作。

1.1 SCADA系统

数据采集与监控系统,通过变电站的监控系统将保护动作信息(主要是硬触电信息)上送到电网调度中心,并能够在故障的第一时间将电网拓扑变化的情况(反映为断路器的状态变化)和保护装置的动作情况通知电网运行人员。其反映的是电网在某一时刻的信息,可作为电网静态安全监视的依据,信息主要包括模拟量信息和事件量信息(如隔离开关状态信息、断路器变位情况),同时服从调度中心发出的调节或控制指令^[1]。

SCADA信息基本组成可认为由“四遥”(遥测、遥信、遥调和遥控)信息所构成,也可以分为远动报文和事件顺序记录(SOE)这两类信息。

1.2 继电保护信息系统

继电保护信息系统采集的信息包含保护动作信息、断路器跳闸信息、来自



谢俊/高级工程师

关键词/Keywords

多源信息·
时间坐标·
故障分析·
协同处理·

录波器的模拟量开关量信息以及保护装置的定值和动作信息。主要是对继电保护所涉及的数据、图形、表格和文件等进行输入、查询、修改、删除和浏览,在系统发生故障后记录当时系统运行方式、保护动作情况、故障录波图、对应的保护定值和有关人员事故过程简述等客观情况。系统主要实现了将涉及电网故障的各种信息进行关联、整合和分析利用,保证在适当的时机,将合适的信息传递给最需要的机构或工作人员^[2-3]。

1.3 故障录波信息系统

故障录波信息系统,主要是利用分布于各个厂站端的故障录波器搜集故障发生前后电气量和状态的变化过程信息,完整地反映故障后的瞬间变化及继电保护的動作行为,并进行数据存档和事故分析。所采集的信息主要包括:电网模拟量信息、变电站内相关断路器的状态信息、所有非数字式保护装置的出口跳闸信息、各种保护装置的定值和保护动作事件等^[4-5]。

1.4 WAMS系统

广域监测系统,主要是利用PMU装置所提供的信息特征,如向量数据带有准确的时钟、数据的采集密度高等,实现对运行情况下的电网动态过程监控。WAMS系统的信息来源是基于全球卫星定位系统(GPS)技术的同步向量测量装置(PMU),PMU设备的特征是利用GPS提供的时钟信号对电压、电流、功率和频率等进行同步测量,直接实现了对电压相角的测量。PMU装置带有GPS时钟同步功能,可按25帧/s的速率实时上传所采集的电压、电流信号到电网调度中心,能够在电网故障发生时记录动态数据并以Comtrade格式储存。准确的时标可以保证不同地点PMU装置的相量数据同时上送到电网调度中心^[6-8]。

2 多源故障分析系统结构

2.1 系统硬件结构

根据电力监控系统安全防护的要求,发电企业、电网企业内部基于计算机和网络技术的业务系统被划分为生产控制大区和管理信息大区^[9-11]。

在本系统接入的数据源中,SCADA和WAMS主站位于生产控制大区的控制区(安全I区),保护信息主站和故障录波主站位于生产控制大区的非控制区(安全II区)。

基于电力监控系统安全分区的原则,多源故障继电保护故障信息综合分析系统不具备控制功能,将系统部署于安全II区。系统硬件部署示意图如图1所示。

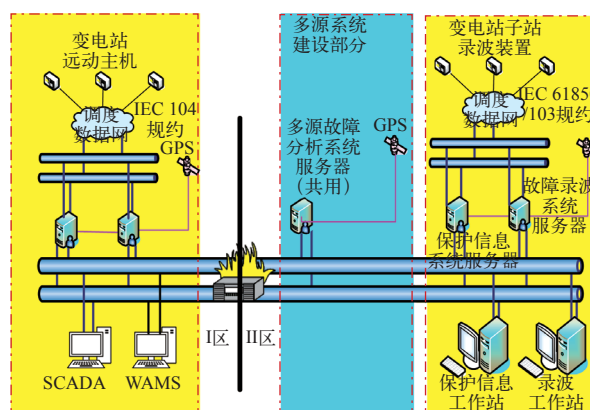


图1 系统硬件部署示意图

2.2 系统软件结构

多源继电保护故障信息综合分析系统采用分层分布式框架^[12],系统软件结构如图2所示,系统应用软件基于D5000多源全景数据平台开发。D5000

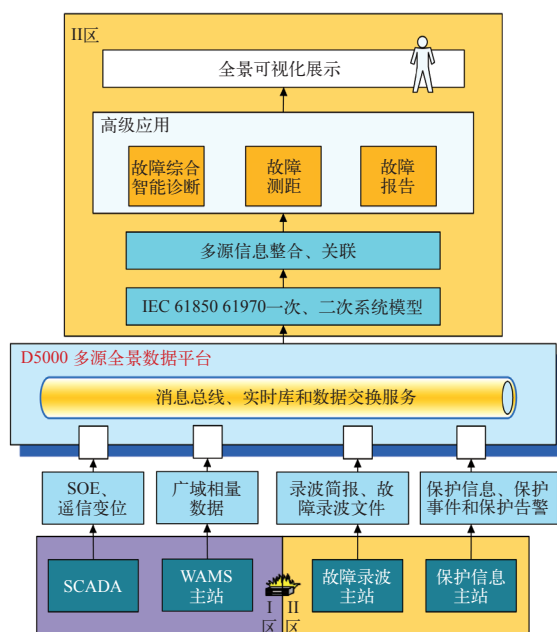


图2 系统软件结构示意图

平台为上层应用提供了底层消息总线、服务总线、实时库、数据交换、图形显示和历史库等服务，同时利用D5000平台上已经实现的EMS/SCADA系统数据，为故障信息智能分析提供必要的开关信息、电网拓扑结构和电网动态监测数据等。

在D5000平台基础上，实现一次、二次系统模型的关联，一次模型以IEC 61970为主，二次模型基于IEC 61850，在D5000平台上通过必要的关联和配置实现一次、二次信息建模，为后续应用提供必要的模型支撑；同时，通过时标、故障设备等特征实现多源继电保护信息的整合及关联，经过最终的故障综合智能诊断，得到准确的故障测

距结果和详细的故障报告，为电网调度及电网故障分析提供有效的依据。

3 基于多源信息的故障综合分析

3.1 数据源接口

本系统位于电力监控系统安全II区，为了获取各数据源的故障事件和数据文件，需要和同区故障录波主站、保护信息主站通信，同时和SCADA和WAMS主站实现跨区互联，通信环境比较复杂。本系统采用了不同的通信方式和各系统实现互联，具体数据信息和通信接口如表1所示。

表1 各数据源通信接口

数据源	通信接口	数据信息	获取方式
EMS/SCADA	数据库访问	SOE、遥信变位	主动请求
故障录波主站	消息总线、文件服务	录波简报、故障录波文件	被动接收+主动请求
保护信息主站	消息总线、文件服务	故障事件、故障简报文件	被动接收
WAMS主站	文件服务	广域相量数据	主动请求

3.2 故障相关设备识别

(1) 故障相关设备识别的意义

一次故障一般会引起电力系统多个功能单位的响应，包括断路器动作、保护动作和故障录波响应等。一般情况下，故障录波主站和保护信息主站只有在发生故障时才会向多源故障分析系统推送故障事件消息，其中包含发生故障的一次设备ID（线路、变压器和母线）和相关保护的動作信息，而不包含断路器等一次设备的动作信息。这些缺失的断路器动作信息可以从EMS/SCADA的SOE和遥信变位表中获取，在获取这些动作信息时，仅仅通过动作时间区间去查询是不准确的，需要通过相关设备ID和动作时间区间联合查找，才能准确识别出反映本次故障的其他设备动作信息。从而整合完整的故障信息，为故障综合分析提供完整的基础数据。

(2) 故障相关设备识别原理

根据上述分析，故障相关设备识别的内容就是根据故障一次设备ID获取与故障设备相关的断路器设备。根据保护配置的原则，一般情况下，

和故障一次设备连接的两级断路器为故障相关设备。如图3所示，和dev设备相关的设备为DL1、DL2、DL4、DL5、DL7、DL8和DL9。

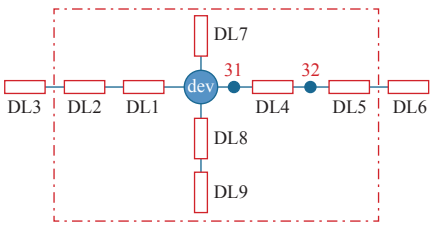


图3 相关设备（断路器）示意图

D5000平台提供了所有的一次设备模型，为了反映一次设备之间的实际连接关系，在各个一次设备表中都提供了元件首尾连接节点ind和jnd，两个有电气连接的一次元件拥有同一个节点。如图3所示，元件dev和DL4共有31#节点，元件DL4和DL5共有32#节点。

通过上述节点连接关系，可以识别任意故障设备的相关设备，实现流程如图4所示。

3.3 故障整合

故障整合是实现多源信息故障分析的前提。

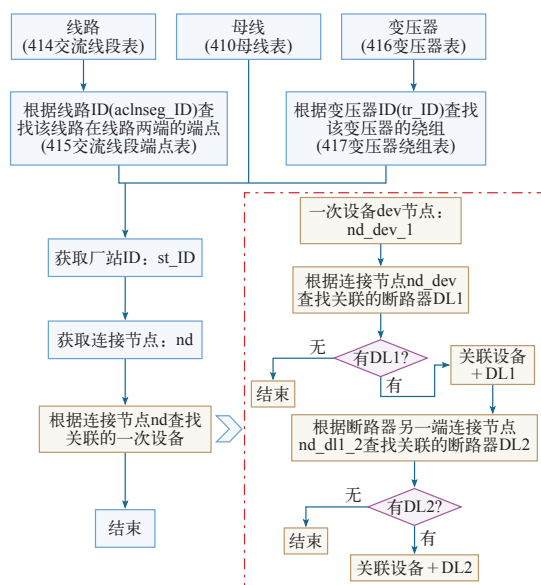


图4 故障相关设备的识别流程

在调度系统中，通信接入环境是比较复杂的，从各个源系统获取的消息具有独立性、多样性和冗余性等特征，系统在部署方式、管理方式及运行方式等方面相互独立，通信接口、传输方式及文件格式等方面差异很大，同时各个系统发送的消息都存在一定程度上的冗余。为了准确有效地综合利用各个数据源的数据进行故障分析，首先必须按故障整合各个数据源的数据，从各个数据源获取的数据中判别出哪些数据反映的是同一次故障。

(1) 故障整合依据

故障整合需要寻找多个系统消息的共有特征作为整合依据。本系统中，故障整合基于以下3个条件：故障时间区间、故障设备及相关设备和故障厂站。

时间是描述一次故障的关键因素，也是判断各个源消息是否反映同一次故障的必要条件。但实际情况下，由于调度和各个站的时钟源差异，系统各个源发送的消息时标是有差异的。因此需要用故障时间区间来进行故障信息整合。故障设备就是发生故障的一次设备，包含母线、变压器和线路，用于WAMS主站、保护信息主站和故障录波主站的信息整合；

故障相关设备主要是故障设备相关的断路器设备，用于EMS/SCADA系统的信息整合。同时，在整合过程中，利用故障厂站进行检索及整合，是故障定位的关键。

(2) 故障整合流程

从表1中可以看出，故障发生时保信主站和故障录波主站会向多源故障分析系统发送消息，而SCADA和WAMS的消息及文件只能主动召唤获取。因此，本系统的故障整合流程以保护信息主站和故障录波主站发消息为触发条件。

保护信息主站触发的故障整合流程如图5所示。系统在 t_1 时刻收到保护信息主站发送的消息，表明一次新的故障开始。由于各个源系统在接入条件和系统性能上的差异，给每个源系统设定一个接收延时。系统在 Δt_{SCA} 延时后从EMS/SCADA的SOE告警表中获取相关设备动作信息，在 Δt_{WAMS} 延时后从WAMS获取广域相量文件。同时，在 $\Delta t_{故障}$ 的延时时间内，系统等待故障录波主站发送故障消息，收到消息之后根据故障特征判断是否和触发故障的消息是同一次故障，是则将这两条故障消息整合，赋予同一个故障ID，否则判断为该条消息触发了一次新的故障，进入故障录波触发的故障整合流程。

故障录波主站触发的故障整合流程如图6所示。处理流程和保护信息主站触发的故障整合流程类似，不同在于当线路发生故障时，故障录波主站需要上送线路两端厂站的录波列表消息。但实际运行过程中，有可能只收到一个厂站的录波

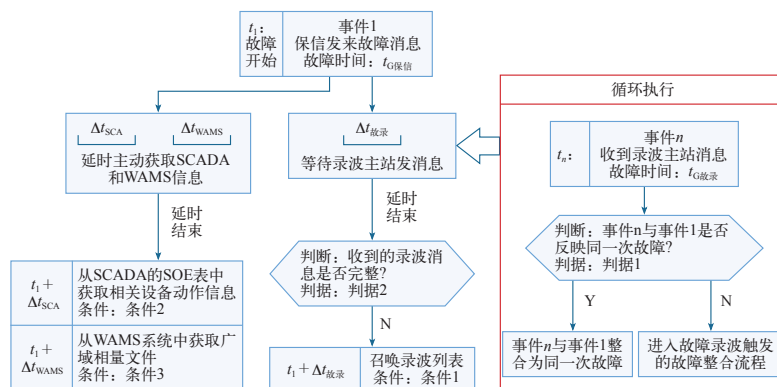


图5 保护信息触发的故障整合流程

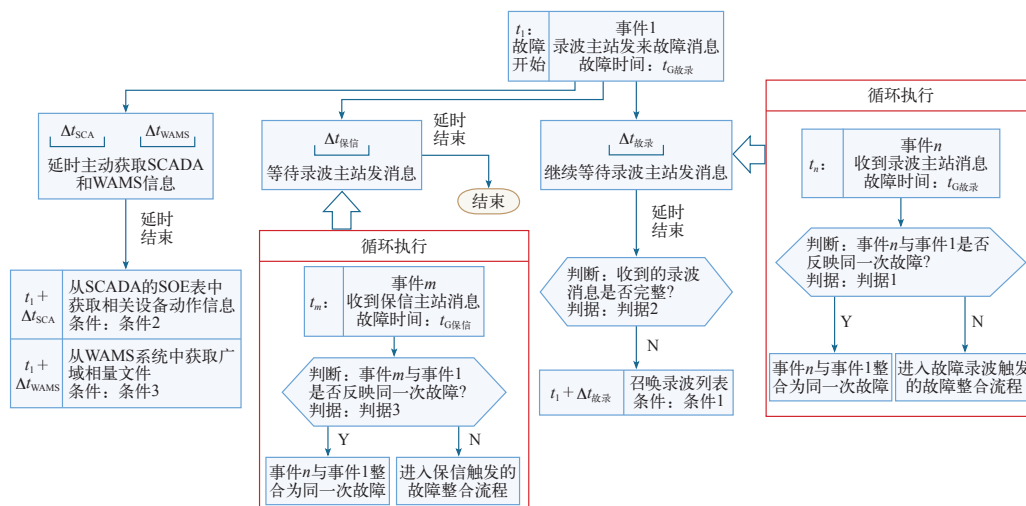


图6 故障录波触发的故障整合流程

列表。因此，需要在收到消息时进行录波消息完整性判断。其次，在等待故障录波主站发送消息延时结束后，如果判断录波主站消息不完整，可以由多源故障分析主站向录波主站发起录波列表召唤，从而最大可能获取完整的信息。

根据上述分析，在故障整合过程中，需要提供多种整合判断条件进行多源消息的区分和整合。本系统中，故障整合均基于故障时间区间、故障设备及相关设备、故障厂站进行判断，图5和图6中的各项具体整合条件如表2所示，表2中的 Δt 均可配置，用于最大限度消除由于站端和调度端时间不一致或者调度端各系统时间不一致带来的影响。

3.4 故障综合分析

经过上述故障整合流程，可以将多源信息

实现以故障为单位的整合。这些信息包含故障消息及初步分析报告（保护信息主站）、故障录波信息（故障录波主站）、相关断路器及保护动作信息（SCADA）以及相关广域测量数据（WAMS）。分析内容如下。

(1) 故障测距

实现基于故障信息系统的录波文件进行双端定位。故障测距满足COMTRADE 1991或COMTRADE 1999版格式波形文件显示及分析。通过波形融合，对一个或多个录波通道进行高级分析，包括数据的函数运算、波形拟合、数据填充和谐波分析等。支持各类型数据文件，软件自身应可以支持标准comtrad格式的波形数据，也可以在外挂外部转换程序或插件的情况下读取各录波器厂家特

表2 故障录波触发的故障整合流程

整合条件		判断条件和召唤参数
保护信息触发流程	判据1	故障厂站相关、故障设备相同、故障时间 $t_{G故障录} \in [t_{G故障录} - \Delta t_{G故障录}, t_{G故障录} + \Delta t_{G故障录}]$
	判据2	非线路故障时收到故障所在厂站消息，线路故障时收到两端厂站消息
	条件1	相关故障厂站、故障设备、召唤故障时间区间 $[t_{G故障录} - \Delta t_{G故障录}, t_{G故障录} + \Delta t_{G故障录}]$
	条件2	相关故障厂站、故障设备及相关设备、动作时间区间 $[t_{G故障录} - \Delta t_{G故障录}, t_{G故障录} + \Delta t_{G故障录}]$
故障录波触发流程	条件3	相关故障厂站、故障设备、召唤数据时间区间 $[t_{G故障录} - \Delta t_{G故障录}, t_{G故障录} + \Delta t_{G故障录}]$
	判据1	故障厂站相关、故障设备相同、故障时间 $t_{G故障录} \in [t_{G故障录} - \Delta t_{G故障录}, t_{G故障录} + \Delta t_{G故障录}]$
	判据2	非线路故障时收到故障所在厂站消息，线路故障时收到两端厂站消息
	判据3	故障厂站相关、故障设备相同、故障时间 $t_{G故障录} \in [t_{G故障录} - \Delta t_{G故障录}, t_{G故障录} + \Delta t_{G故障录}]$
	条件1	相关故障厂站、故障设备、召唤故障时间区间 $[t_{G故障录} - \Delta t_{G故障录}, t_{G故障录} + \Delta t_{G故障录}]$
	条件2	相关故障厂站、故障设备及相关设备、动作时间区间 $[t_{G故障录} - \Delta t_{G故障录}, t_{G故障录} + \Delta t_{G故障录}]$
	条件3	相关故障厂站、故障设备、召唤数据时间区间 $[t_{G故障录} - \Delta t_{G故障录}, t_{G故障录} + \Delta t_{G故障录}]$

有格式的录波文件；对于非标准comtrad格式，具有良好的容错功能，并进行修正。测距软件可实现以下分析功能，如向量分析、序量分析、阻抗分析、谐波分析、功率分析、变压器差动与过激磁分析以及母线差动分析等。同时，具有较强的数据派生功能，能计算突变量、直流分量、谐波和有效值等常用派生量，能进行信号加减、信号叠加等常用运算功能。

(2) 保护动作正确性分析

电力系统发生故障后，继电保护装置将动作跳开相应的断路器，将故障元件隔离。利用断路器的节点信息和时序信息综合分析，能够识别出故障区域。事故平息后，调度中心接收到大量的警报信息时间序列，此时可利用时间序列中故障区域内的特定时间 t 和相似裕度 Δt 进行分析，结合保护动作的关联特性，对保护动作正确性进行有效评价，其具体实现方式表述如下。

设 $x=(v,t)$ 为时间序列中的元素，定义警报信息 v 为一个3元组，即

$$v=(A,\Delta t,S) \quad (1)$$

式中， A 为警报事件，其既可表示在调度中心收到的设备动作或警报信息，也可表示系统中发生的某一事件（如输电线路发生单相接地故障）； Δt 为时间误差长度，用于描述事件发生时间不确定的情况， t 和 Δt 共同组成了一个时间约束，即事件 A 发生时间为 $[t-\Delta t/2, t+\Delta t/2]$ ； S 为模糊项标识位， $S=1$ 和 $S=0$ 分别表示元素 $x=(v,t)$ 为必须项和模糊项。

若元素 $x_i=(v_i,t_i)$ ($i=1,2,\dots,n$) 为模糊项，则时间序列 $X_1=\{x_1,x_2,\dots,x_n\}$ 虽然比 $X_2=\{x_1,x_2,\dots,x_{i-1},x_{i+1},\dots,x_n\}$ 多了元素 x_i ，但 X_2 与 X_1 之间的编辑距离仍为0，称编辑距离为0的两个时间序列为等价时间序列。若元素 $x_i=(v_i,t_i)$ ($i=1,2,\dots,n$) 为必须项，则 X_2 与 X_1 之间的编辑距离为1。

电力系统中发生的部分事件由于不具备信息上传能力，调度中心获取的时间序列并不包含这些事件，这部分警报信息与漏报/误报信息应该在诊断过程中加以区分。如发生故障的电气设备的保护装置动作发出跳闸指令后，断路器拒动，或

断路器动作后绝缘被击穿，均有可能触发断路器失灵保护；然而，断路器拒动事件无法直接从警报信息中获得，调度中心既有可能收到了断路器的动作信息（断路器动作后被击穿），也有可能未收到（断路器拒动），因此对该断路器上传的信息应有所警惕，不应简单视为漏报或误报。引入模糊项概念有利于区分这些信息，提高故障诊断准确度。

在时间序列模型中，当 A_i 为以下事件时，元素 $x_i=(v_i,t_i)$ 应为模糊项： A_i 为电气设备故障，如输电线路、母线和变压器等发生故障； A_i 为断路器动作且 A_{i+1} 为该断路器的失灵保护动作。

当电力设备遥信动作时，保护设备或者智能电力仪表会自动记录下动作时间、动作原因，形成基于统一时标基准的SOE信息。本系统通过对SOE表中的警报信息时序相似性分析和比对，结合保护动作的关联特性，能够快速、有效地进行保护动作正确性分析，为调度工作人员实时评价保护系统运行状况提供参考。

4 结束语

提出了一种应用于500 kV及以上线路的故障综合分析策略并建立实例化的故障综合分析系统，很好地解决了SCADA、WAMS等系统分析故障信息时信息来源不足，分析策略不一致等原因造成的故障分析不准确、保护动作评断出错等问题。本系统已在华中电网成功部署实施，运转良好，效果显著，对故障实时诊断和事后分析均有极大的帮助，有效提高了调度工作人员的工作效率，在类似层级的电网中具有一定的推广价值和应用前景。

后续工作将继续积极探索接入不同故障信息源的可行性和分析方法，尝试使用各种不同的分析手段来完善本综合分析系统，进一步推动电力系统故障诊断的智能化、精细化和准确化，为电力系统的安全稳定运行作贡献。

参考文献

- [1] 李兆飞, 陈青. 采用多源信息的电网故障诊断方

- 法与研究 [D]. 济南: 山东大学, 2013.
- [2] 刘海波, 高厚磊, 刘文格. GPS定位和授时原理及其在电力系统中的应用 [J]. 山东电力技术, 1998 (5): 12-14.
- [3] 傅鸿志, 朱祖仪. 关于电网时间统一系统的探讨 [J]. 电力系统自动化, 1994, 18 (10): 44-46.
- [4] 陈小林, 罗毅, 王伟平, 等. 基于故障录波数据的保护特性分析方法及其实现 [J]. 电网技术, 2005, 29 (18): 71-74.
- [5] 章坚民, 朱炳铨, 蒋月良, 等. 继电保护故障信息处理主站系统设计的核心问题 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (14): 72-74.
- [6] 陈德. 500 kV变电站故障录波器联网后台信息调取系统的组建 [J]. 中国新技术新产品, 2010 (14): 23.
- [7] 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): 26-38.
- [8] 毛鹏, 许扬, 蒋平. 输电网故障诊断研究综述及发展 [J]. 继电器, 2005, 33 (22): 79-86.
- [9] 郭创新. 电力企业信息融合及知识管理研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [10] 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应用 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15 (6): 71-79.
- [11] 廖志伟, 叶青华, 王钢, 等. 基于GRNN的多故障自适应电力系统故障诊断 [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2005, 33 (9): 6-9.
- [12] Dash P K, Samantaray S R. Fault classification and section identification of an advanced series-compensated transmission line using support vector machine [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22 (1): 67-73.
- (收稿日期: 2015-09-14) **EA**

(上接第55页)

- [2] 赵洪, 胡柱国, 屠德民, 等. 用全息摄影术测量XLPE高压电缆绝缘中杂质颗粒的研究 [J]. 电工技术学报, 1990, 5 (3): 56-61.
- [3] 李锐. 监测电缆绝缘击穿的新方法 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (23): 58-59.
- [4] 姚林朋, 王辉, 钱勇, 等. 基于半监督学习的XLPE电缆局部放电模式识别研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39 (14): 40-46.
- [5] 郑文栋, 杨宁, 钱勇, 等. 多传感器联合监测技术在XLPE电缆附件局部放电定位中的试验研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39 (20): 84-88.
- [6] 沈小军, 江秀臣, 达世鹏. 轨道交通直流电缆诊断技术现状及展望 [J]. 电工技术学报, 2007, 22 (9): 22-27.
- [7] 邢海瀛, 袁汉川, 邓春, 等. 基于分布参数的电力电缆故障定位新型算法研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39 (14): 16-25.
- [8] 孙鸣, 谢芝东, 张航. 10 kV电力电缆绝缘在线监测的一种新方法 [J]. 继电器, 2006, 34 (22): 32-35.
- [9] 郑晓泉, Chen G, Davies A E. 交联聚乙烯电缆绝缘中的电树枝与绝缘结构亚微观缺陷 [J]. 电工技术学报, 2006, 21 (11): 28-33.
- [10] 龙望成, 高炎辉, 关根志, 等. 交叉互联接线的交联聚乙烯 (XLPE) 电力电缆绝缘在线监测理论分析 [J]. 电力自动化设备, 2008, 28 (3): 59-62.
- [11] Abou-Dakka M, Bulinski A, Bamji S S. On-site diagnostic technique for smart maintenance of power cables [C]. 2011 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2011, 5 (22): 1-5.
- [12] Dakka M A, Bulinski A, Bamji S S. On-site diagnostics of medium-voltage underground cross-linked polyethylene cables [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2011, 27 (4): 34-44.
- [13] Oyegoke B, Birtwhistle D, Lyall J. New techniques for determining condition of XLPE cable insulation from polarization and depolarization current measurements [J]. 2007 IEEE International Conference on Solid Dielectrics, 2007: 150-153.
- (收稿日期: 2015-10-03) **EA**