

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181155

基于语义网的智能站继电保护隐性故障辨识诊断技术研究

张驰¹, 谢民², 刘宏君³, 周立军¹, 宋杰⁴

(1. 国网安徽电力公司宿州供电公司, 安徽 宿州 234000; 2. 安徽电力调度控制中心, 安徽 合肥 230022;
3. 长园深瑞继保自动化有限公司, 广东 深圳 518057; 4. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200437)

摘要: 继电保护系统的隐性故障是造成保护误动或拒动、系统失稳并造成大面积停电的重要原因之一。分析了继电保护隐性故障机理, 应用语义网技术, 在 CLIPS 平台上建立了智能变电站领域知识库和继电保护隐性故障辨识规则库。对变电站一次系统、二次系统、通信系统、辅助系统的建模体系进行说明, 并在此建模基础上进一步关联了隐性故障辨识规则库。同时, 以某 500 kV 智能变电站为例, 通过可视化平台验证了静态特性、动态特性和不确定隐性故障辨识规则与处理策略的有效性, 为智能变电站运维检修及故障排查提供决策依据。

关键词: 智能变电站; 语义网; 继电保护隐性故障; CLIPS

Research of identification and diagnosis technology for protection relay hidden fault in smart substation based on semantic web

ZHANG Chi¹, XIE Min², LIU Hongjun³, ZHOU Lijun¹, SONG Jie⁴

(1. Suzhou Power Supply Company, State Grid Anhui Electric Power Company Limited, Suzhou 234000, China; 2. Anhui Electric Power Dispatch & Control Center, Hefei 230022, China; 3. CYG SUNRI Co., Ltd., Shenzhen 518057, China; 4. Electrical Science Research Institute of State Grid Shanghai Municipal Power Company, Shanghai 200437, China)

Abstract: The hidden fault of the relay protection system is one of the important reasons for the protection malfunction or refusal, and the power system instability. The hidden failure mechanism of relay protection is analyzed. Based on the semantic web technology, the smart substation domain knowledge base and the relay protection hidden fault identification rule base are established on the C Language Integrated Production System (CLIPS) platform. The modeling system of substation primary system, secondary system, communication system and auxiliary system is explained, and the implicit fault identification rule base is further correlated on the basis of this modeling. At the same time, taking a 500 kV intelligent substation as an example, the effectiveness of static characteristics, dynamic characteristics and uncertain hidden fault identification rules and processing strategies are verified by the visualization platform, which provides decision-making basis for intelligent substation operation and maintenance inspection and troubleshooting.

This work is supported by Science and Technology Project of the Headquarter of State Grid Corporation of China (No. JBB17201500108) and Science and Technology Project of State Grid Anhui Electric Power Company (No. 52120015007T).

Key words: smart substation; semantic web; protection relay hidden fault; C language integrated production system

0 引言

继电保护系统的隐性故障是造成保护误动或拒动、系统失稳导致大面积停电的重要原因之一, 对电力系统的安全稳定运行造成了极大危害^[1]。由于

继电保护隐性故障造成的大面积停电屡有发生, 例如 2003 年的美加大停电、2003 年的意大利大停电^[2-3], 智能站方面则有 2014 年甘肃 330 kV 永登变线路保护拒动, 2015 年西藏 220 kV 墨竹工卡变母差保护误动作等事件。

文献[4]通过对变电站内各设备的信息物理模型映射, 提出了面向断路器的电力系统网络模型, 分析了继电保护系统隐性故障对电力系统可靠性的

基金项目: 国家电网公司总部科技项目(JBB17201500108);
国网安徽省电力公司科技项目(52120015007T)

影响。文献[5-6]提出了应用概率统计分析法和概率模型法对继电保护隐性故障发生的具体概率值进行风险评估。文献[7]提出了“准误动集”的概念，准误动集可以为继电保护隐性故障可能的影响范围提供参考，对隐性故障的反演过程及反事故措施的制定具有实用价值。文献[8]提出了一种基于多源异构数据处理的保护系统安全性与可靠性自适应保护方案，旨在降低隐性故障隐患以减少大面积停电事故的发生。文献[9-10]提出了基于智能变电站的继电保护隐性故障特性研究平台，为实现智能变电站二次系统的风险预控提供了技术手段。上述研究成果大多数仅针对传统继电保护隐性故障进行研究，部分结合智能变电站特征的继电保护隐性故障风险评估方法也只是针对输电断面的风险进行评估，并未对隐性故障辨识规则及处理措施进行研究。

继电保护隐性故障的发生不仅与二次系统保护原理相关，而且涉及一次系统运行方式、故障位置、故障类型以及二次系统整定原则、动作方式、各保护原理和保护装置之间的配合等多方面的复杂问题^[11]。智能变电站的二次系统全部被封装在配置描述文件(Substation Configuration Description, SCD)中，大量采用网络交换机、智能终端、合并单元等设备，二次电缆被光纤取而代之，存在设备数量大、关联关系复杂、回路信息不直观的问题。鉴于智能变电站继电保护系统的复杂性，继电保护隐性故障风险大大增加，导致现场运维困难，极大增加了电网运行的安全隐患。

语义网，最早应用于网络搜索问题，用于对网络中纷繁复杂的语言描述进行合理的模型构造，从而便于机器理解和搜索^[12]。智能变电站大量采用XML语言描述回路信息、虚端子关联信息、一次系统拓扑连接关系等，为采用人工智能语义网技术提供了可能性。本文运用语义网本体概念对智能变电站一次系统、二次系统、通信系统和辅助系统进行建模，在基于C语言集成产生式系统(C Language Integrated Production System, CLIPS)上设计合理的隐性故障辨识规则库和“准误动集”，使得各类设备间可以对隐性故障的影响区域及其可能诱发连锁故障发生的路径进行搜索，提高智能站隐性故障辨识诊断能力并制定相应处理措施。并通过一个案例，对继电保护隐性故障的诊断效果进行验证。

1 继电保护隐性故障辨识技术研究

1.1 继电保护静态隐性故障辨识

静态特性是指系统正常运行而无故障量的扰动

情况下继电保护装置进行采样和计算，不进行逻辑判断和跳闸出口，此环节涉及的硬件设备有互感器测量回路、合并单元(Merging Unit, MU)、继电保护前置处理电路、智能终端、过程层交换机、连接光纤等^[11]。同常规站相比，智能变电站测量环节采用非常规互感器和合并单元，且大量布置于户外汇控柜中，运行环境恶劣，可靠性降低，隐性故障发生概率大大增加。

1.1.1 测量环节隐性故障辨识

智能变电站保护的测量数据来源于合并单元的SV报文，而SV报文包含所有CT次级信息，按照“谁使用，谁解析”的原则，由SV报文的接收端解析相关保护所需要的模拟量信息。

由此，来源于不同次级模拟量信息可以通过对于SV报文的解析，构成不同源量测量的比对，实现不同间隔保护设备的隐性故障诊断。理论上，来自互感器不同次级的幅值与相位计算值应相等，考虑到实际情况，其关联测量点的计算值应在很小范围内变化，若某一关联测量点的计算值与平均测量计算值之差超过一定范围，则判定其存在隐性故障，其范围可设定为报警门槛值。

以对合并单元多个测量通道中的1个测量通道进行故障诊断为例，可按以下步骤进行。

1) 合并单元测量值均值

$$X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (1)$$

式中： X_i 代表第*i*个参与比较的测量值；在变电站中同一地点互感器有不同次级用于多套保护或测量IED，因此， n 等于IED装置的数量。

2) 当连续多组采样值均满足式(2)。

$$|\hat{X} - X| > \Delta\varepsilon \quad (2)$$

式中： \hat{X} 为连续多组值； $\Delta\varepsilon$ 为隐性故障报警门槛值。则可以确定这一合并单元异常。

1.1.2 保护装置自身隐性故障辨识

保护装置本身的隐性故障是由于不同保护设备厂家对于IEC61850标准理解的偏差，对于不同的保护信息、事件信息等的描述不一致，无法保证站内告警信息的唯一性和正确性。从永登变事故分析来看，事故的根源就在于告警信息的混乱。这种类型的隐性故障辨识就是由软件根据保护装置设计原理自动分析各种告警信号的确切影响，如某保护改信号或停役、某一次设备停役、某保护改定值等，检测保护或一次设备的实际状态是否与分析的结果一致，否则就可能存在隐性故障。

1.1.3 执行环节隐性故障辨识

智能变电站保护装置采用 GOOSE 报文向智能终端发出保护跳闸指令和自动重合闸指令, 智能终端通过 GOOSE 报文向保护装置反馈断路器的分合闸位置信息。因此, 保护的跳合闸通道实际上就是 GOOSE 报文虚通道, GOOSE 虚通道的状态应该满足保护工作状态的需求。执行环节隐性故障辨识需要检查 GOOSE 虚通道相关的软压板、硬压板、闭锁信号以及智能终端的检修压板状态等是否能够与保护工作状态相适应。

1.1.4 软件版本隐性故障辨识

智能变电站软件版本方面存在的隐性故障包括配置文件、程序版本管理混乱的问题。在二次设备软件版本信息建模基础上, 运用在线版本校核技术, 通过从装置上召软件版本信息, 与发布的基准信息实时比对校验, 实现运行设备软件版本隐性故障的在线辨识。根据变电站新建、改造、运维不同阶段的不同用户需求, 研发规范化的软件管控流程。完善由调试单位、制造厂家、系统集成商、工程管理部门、二次管理部门、运维单位、检修单位参与的软件管理流程, 并实现软件网络装载、版本升级权限控制及操作痕迹记录, 并保证全过程文件版本可追溯。管理层面研究基于角色的权限设置, 保证用户的各种操作基于权限控制(譬如, 调控部门具有配置文件审核权限; 运维部门具有配置文件签入签出权限, 配置文件修改权限等), 实现软件版本隐性故障在线、离线辨识。

1.2 继电保护隐性故障在线诊断

继电保护隐性故障影响着保护装置的动作正确性, 可分为保护原理与保护定值两个方面。继保装置以互感器的模拟量作为输入, 通过采样、滤波后, 利用保护原理计算、逻辑判断、定值比对, 确定是否存在故障。继保装置的隐性故障通常出现于系统发生扰动的场景下, 当系统发生故障、振荡等事件时, 若原理与逻辑存在问题或定值整定不合理, 保护装置将会出现拒动或误动的情况, 给系统的安全运行带来严重隐患。保护装置的隐性故障可通过事件发生后的录波数据进行分析, 但由于是事后分析, 无法及时避免保护不正确动作事件的发生, 因此保护装置隐性故障的在线监测对于超高压与特高压系统尤其重要。

1.2.1 基于保护原理的隐性故障辨识

保护原理的隐性故障大多出现于单端保护, 即需要上下级配合的保护方法可能存在隐性故障, 因此此类隐性故障通常针对电流保护或距离保护。就相间故障的电流保护而言, 当线路发生故障时, 保

护装置先通过检测电流、电压判断是否满足启动条件, 然后再利用傅立叶算法计算电流相量, 这时除了涉及保护装置的数据采集预处理部分的硬件装置外, 还涉及保护算法软件模块和微机保护硬件部分, 仅当从硬件采样、硬件滤波、软件计算、逻辑判断等环节都能正常工作时, 才能说明保护装置的动态特性正常。

智能变电站站域保护提供全站保护的冗余, 如果存在隐性故障将使得全站保护处在高风险隐患之中, 后果不堪设想。如图 1 所示, 站域保护中的简易母线保护, 由于母线 I 保护和母线 II 保护存在重叠的保护范围(如图中虚线框图), 站域保护的正确动作需要保护本体和母线上的支路元件共同完成, 保护重叠范围会因原理上的隐性故障而发生误动作, 因此是隐性故障易发、多发的高风险区域。

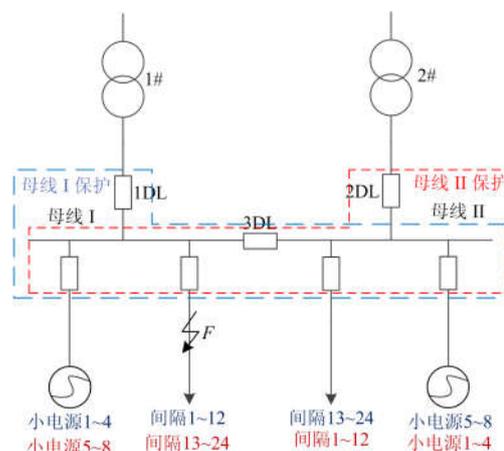


图 1 站域保护隐性故障分析示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hidden fault analysis for substation area protection

若间隔 1 线路 F 处发生故障, 间隔 1 出线保护和站域保护均会起动, 间隔 1 出线保护应正确动作将故障切除, 并且以过程层 GOOSE 发出闭锁信号至站域保护。但是如果间隔 1 出线保护闭锁元件存在隐性故障, 将导致站域保护无法闭锁而造成全站停电的严重后果。上述保护原理的隐性故障是在故障的发生、发展的动态过程中逐步显现出来的, 在智能变电站中造成的危害更加严重。

为实现对站域保护的在线监测, 需要将全站保护的联闭锁信息进行全局考虑, 有如下关系。

$$I_2(i(t)) = I_1(i(t)) + \varepsilon(t) \quad (3)$$

式中: $I_2(i(t))$ 为站域保护测量电气量; $I_1(i(t))$ 为闭锁元件测量电气量; $\varepsilon(t)$ 为隐性故障报警门限值。

若保护 P1、P2 存在隐性故障, 则以下条件成立:

$$|I_2(i(t)) - I_1(i(t))| > \varepsilon(t) \quad (4)$$

反之则说明保护不存在隐性故障。

1.2.2 基于整定值的隐性故障诊断

馈线发生故障时，需由保护装置检测、判断并发出信号至断路器，由断路器切除故障。若馈线故障被可靠切除，馈线保护应发出闭锁信号，防止站域保护误动；若故障未被正确切除，支路元件闭锁信号应瞬时返回，站域保护作为支路保护的后备，应可靠动作切除故障支路所在母线。

由于站域保护闭锁元件采用支路过流启动计算值，为了定量分析站域保护隐性故障发生概率，应用保护过流保护安全裕度的定义^[14]。

$$P_r = \frac{I_m}{I_{set} g K_{sr}} \quad (5)$$

式中： P_r 为保护安全裕度； I_m 为故障相电流测量元件计算值； I_{set} 和 K_{sr} 分别为馈线保护整定值与灵敏度系数。当 P_r 大于1时，表示该整定值越不容易发生误动或拒动。

2 基于语义网的智能变电站继电保护隐性故障辨识可扩展建模

2.1 语义网概述

语义网是将 Web 中数据以 RDF 与 OWL 来表示，建立数据之间的语义关系，是一套减少数据摩擦，加快数据流动速度的方法，语义网的目标是提供一个通用的语义框架，实现数据在不同应用之间的共享和集成^[15-16]。

语义网的多层构架自上而下功能逐渐弱化，分别为信任层、验证层、逻辑层、本体层、资源描述框架、句法层与基础层。语义网的多层构架如图 2 所示。本体(ontology)作为语义网的基本单位，是对专业领域知识模型化和概念化的一种途径，通常被用来描述信息的语义涵义^[17]。目前学界普遍采用 Studer 在 1998 年提出的关于本体的概念：“本体是共享概念模型的明确的形式化的规范说明”^[18]。

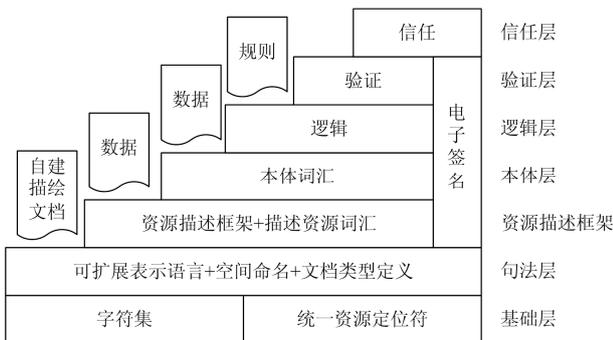


图 2 语义网的多层构架

Fig. 2 Multi-layered structure of semantic web

上述多层构架中的本体层、资源描述框架和句法层是实现语义网的核心层。其中，可扩展标示语言 XML 是句法层的基本语言，数据则是资源描述框架层的基本要素，本体层则是面向对象建模的核心^[19]。

运用本体的特征对智能变电站各系统进行建模，具有以下两方面的优点：

1) 基于本体的逻辑推理使得领域知识间的概念明确、结构清晰，便于智能变电站在结构和规模上的扩展和删减，为知识的运用奠定了良好的基础。

2) 统一的构架便于机器对相关领域规则的理解，有利于提高继电保护隐性故障辨识的精确度和制定相应的反事故措施。

2.2 分系统建模

保护状态监视、SCD 全站模型和保护定值及录波数据管理是智能变电站隐性故障辨识的三个重要组成部分，保护系统隐性故障辨识及风险评估的实现基础是部署在变电站内的在线监测装置。运用语义网本体概念中关于类的继承和关系继承的概念，结合 IEC61850-6 标准中 SCL 对对象模型的要求，构建智能变电站分系统的本体模型^[20]。

1) 变电站一次系统：包括 IEC61850 中已给出的 SSD(System Specification Description)文件涉及的一次设备及其拓扑连接关系，例如变压器、母线、线路、断路器等设备的连接和功能描述。

2) 变电站二次系统：包括 IEC61850 中给出的 SCD 文件中涉及的二次设备，例如继电保护设备、监控设备、合并单元和智能终端等 IED(Intelligent Electronic Device)和 LN(Logic Node)实现。

3) 通信系统：包括智能站与通信相关的设备，例如交换机、光纤等，并以 LN 和服务器之间的连接关系为基础，描述通信设备之间的连接关系。

4) 辅助系统：该部分应包括直流系统、消防、空调、暖通等辅助系统的相关对象模型，并拓展到站外电网的信息建模。

基于语义网本体的智能变电站分系统建模，有助于为智能变电站继电保护隐性故障“准误动集”搜索路径提供统一的模型信息，分系统建模如图 3 所示。

3 案例分析

3.1 应用案例建模

为验证基于语义网智能变电站继电保护隐性故障诊断技术应用的有效性，以如图 4 所示的某 500 kV 智能变电站为应用场景，在 CLIPS 平台上对建模过程、隐性故障辨识及其处理措施进行验证。

表 1 智能变电站继电保护隐性故障辨识案例
Table 1 An example of protection relay hidden fault identification in smart substation

隐性故障种类	异常设备	准误动集	处理措施
静态特性隐性故障	3号主变 220 kV 侧合并单元采样值误差超过门槛值	3号主变、220 kV 侧母线及其所有支路	停 3号主变, 退出 3号主变保护, 退出 220 kV 母线侧 3号主变支路采样链路
	5042 断路器保护智能终端跳闸 1 回路异常	5041、5043 断路器, 5907、5622 线路	退出 5042 断路器智能终端出口硬压板, 并断开其装置电源, 切换保测装置。
	2号主变 220 kV 侧 GOOSE 交换机异常	2号主变、220 kV 侧母线及其所有支路	断开该交换机光纤, 更换交换机
动态特性隐性故障	5907 线路保护区内故障, 5043 断路器失灵保护未启动	5907 线路、5043 断路器、500 kV II 母	停用 5043 断路器保护进行检修
	2号主变后备保护安全裕度<1	2号主变、220 kV 侧母线	停用 2号主变保护检查定值整定
不确定隐性故障	220 kV 母线保护装置电源 FSVM 评价结果低于阈值	220 kV 母线, 1、2、3号主变	停用 220 kV 侧母线保护进行检修
	220 kV 母线合并单元网口光强 FSVM 评价结果低于阈值	220 kV 母线, 1、2、3号主变	停用 220 kV 侧母线保护进行检修

表 1 中得到的准误动集和处理措施与预期相符, 隐性故障诊断推理结果准确、有效。通过上述仿真测试可以得出如下结论:

1) 合并单元隐性故障率高, 影响范围大。如母线合并单元故障, 会导致相关的所有线路保护、主变保护、母差复压闭锁功能受到影响, 甚至误动。

2) 智能站使用大量交换机用于实现信息共享, 交换机作为信息枢纽, 数据流量大、牵涉范围广, 故障时影响多套测控、保护和自动装置, 产生大量告警信号, 多达近万条, 给运维人员带来很大困难。如智能站母差保护通过中心交换机接收所有间隔的失灵信号, 若中心交换机故障, 存在失灵保护拒动越级跳闸风险。

3) 智能站保护采样环节增加了合并单元, 出口环节增加了智能终端, 导致整体动作延时增加 7~10 ms, 保护速动性和可靠性降低, 影响电网安全和供电可靠性。

4) 合并单元、智能终端及部分保护装置布置于户外智能控制柜内, 运行环境恶劣, 增加了不确定隐性故障的发生几率, 可靠性降低, 不便开展运维检修工作。

4 结语

本文提出了一种基于语义网的智能变电站继电保护隐性故障辨识诊断技术, 根据智能变电站继电保护系统特点, 基于语义网的集成产生式系统 (CLIPS) 平台建立了包括变电站一次设备、二次设备、通讯系统、辅助系统的多层规则及辨识策略, 实现了智能变电站从 IED 设备到直流辅助系统的立

体化全方位隐性故障辨识。以某智能变电站为例, 校验了基于语义网的智能变电站继电保护隐性故障准误动集和处理措施, 为智能变电站的运行状态进行评估, 对智能变电站结构方面的缺陷提出进一步改进的建议, 具有广泛的实用价值。本文提出的方法深度依赖于专家知识库的准确度和完整性, 但是, 智能变电站不断更新迭代的构架使得专家知识库需要在实践中不断完善和补充, 今后仍需对传统变电站和智能变电站继电保护隐性故障知识间的关联关系即本体的属性关系进行更深入的研究。同时, 本文仅针对部分典型故障建立了本体模型, 下一步将研究重点放在建立智能变电站完整本体模型上面, 实现更加智能和完备的隐性故障辨识。

参考文献

[1] ANDERSON P. Power system protection[M]. New York: IEEE Press Power Engineering Series, 1999.

[2] 戴志辉, 王增平. 继电保护可靠性研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 161-167.

DAI Zhihui, WANG Zengping. Overview of research on protection reliability[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 161-167.

[3] 吴宏斌, 盛继光. 继电保护设备可靠性评估的数学模型及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(9): 65-68.

WU Hongbin, SHENG Jiguang. Mathematical model and its application of relay protection device reliability assessment[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(9): 65-68.

[4] YANG F, MELIPOULOS A P S, COKKINIDES G J, et al. A bulk power system reliability assessment methodology[C] // International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, September 12-16, 2004, Ames, USA: 44-49.

- [5] 蔡伟贤. 继电保护隐藏故障风险分析及电网扰动记录方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
CAI Weixian. Risk analysis of hidden failures in relay protection and research on power system disturbance recording method[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
- [6] 熊小伏, 蔡伟贤, 周家启, 等. 继电保护隐藏故障造成输电线路连锁跳闸的概率模型[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(14): 6-10.
XIONG Xiaofu, CAI Weixian, ZHOU Jiaqi, et al. Probabilistic model for transmission lines cascading trips caused by hidden failures in relay protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(14): 6-10.
- [7] 陈为化, 江全元, 曹一家. 考虑继电保护隐性故障的电力系统连锁故障风险评估[J]. 电网技术, 2006, 30(13): 14-19, 25.
CHEN Weihua, JIANG Quanyuan, CAO Yijia. Risk assessment of power system cascading failure considering hidden failures of protective relays[J]. Power System Technology, 2006, 30(13): 14-19, 25.
- [8] BERNABEU E E, THORP J S, CENTENO V. Methodology for a security/dependability adaptive protection scheme based on data mining[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(1): 104-111.
- [9] 李仲青, 高翔, 李永丽, 等. 考虑继电保护隐性故障的风险评估技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(增刊): 29-35.
LI Zhongqing, GAO Xiang, LI Yongli, et al. The development of risk assessment technology related to a hidden failure of protection system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(S): 29-35.
- [10] 邱智勇, 高翔, 陈建民, 等. 基于镜像技术的智能变电站二次系统隐性故障诊断研究[J]. 电气技术, 2016(8): 89-94.
QIU Zhiyong, GAO Xiang, CHEN Jianmin, et al. The development of intelligent diagnosis associated with a hidden failure relay protection based on mapping technology of secondary circuit of substation[J]. Electrical Engineering, 2016(8): 89-94.
- [11] 李博通, 李永丽, 姚创, 等. 继电保护系统隐性故障研究综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(7): 34-39.
LI Botong, LI Yongli, YAO Chuang, et al. Overview of research on hidden failure in protection system[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2014, 26(7): 34-39.
- [12] 宋杰, 徐洁, 周德生, 等. 基于语义网的智能变电站运维专家系统可扩展建模与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 144-151.
SONG Jie, XU Jie, ZHOU Desheng, et al. Modeling and application of expert system for scalable smart substation based on semantic web[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 144-151.
- [13] 李仲青, 胡炎, 王德林, 等. 基于录波数据的保护安全裕度评估方法[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 1109-1114.
LI Zhongqing, HU Yan, WANG Delin, et al. Evaluation of protection security margin based on fault recording data[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 1109-1114.
- [14] 李洁, 丁颖. 语义网关键技术概述[J]. 计算机工程与设计, 2007(8): 1831-1833, 1836.
LI Jie, DING Ying. Survey of semantic web key techniques[J]. Computer Engineering and Design, 2007(8): 1831-1833, 1836.
- [15] 陈谷川, 陈豫. 语义网知识组织系统的研究与构架[J]. 现代图书情报技术, 2006(4): 24-28.
CHEN Guchuan, CHEN Yu. Research and architecture of semantic web knowledge organization system[J]. New Technology of Library and Information Service, 2006(4): 24-28.
- [16] 瞿裕忠, 胡伟, 郑东栋, 等. 关系数据库模式和本体间映射的研究综述[J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(2): 300-309.
QU Yuzhong, HU Wei, ZHENG Dongdong, et al. Mapping between relation database schemas and ontologies: the state of the art[J]. Journal of Computer Research and Development, 2008, 45(2): 300-309.
- [17] 陈谷川, 陈豫. 语义网知识组织系统的研究与构架[J]. 现代图书情报技术, 2006(4): 24-28.
CHEN Guchuan, CHEN Yu. Research and architecture of semantic web knowledge organization system[J]. New Technology of Library and Information Service, 2006(4): 24-28.
- [18] 刘孝刚, 施琳, 张帆, 等. 智能变电站二次安措策略自动生成和在线校核技术[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 82-89.
LIU Xiaogang, SHI Lin, ZHANG Fan, et al. Automatic generation and online checking technology for secondary safety measures of smart station[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 82-89.
- [19] 安永帅, 李刚, 樊占峰, 等. 新一代智能变电站控制保护一体化智能终端研究与开发[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 138-146.
AN Yongshuai, LI Gang, FAN Zhanfeng, et al. Research and development on intelligent terminal units incorporated with control and protection functions in new generation smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 138-146.

收稿日期: 2018-09-07; 修回日期: 2018-11-04

作者简介:

张 驰(1974—), 男, 本科, 高级工程师, 从事电力系统输变、配电网管理; E-mail: 272155398@qq.com

谢 民(1975—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统继电保护专业运行管理和研究工作;

刘宏君(1974—), 男, 通信作者, 硕士, 教授级高工, 研究方向电力系统继电保护及自动化设备的研发。E-mail: liuhj@sznari.com

(编辑 张爱琴)