

## 继电保护系统状态评价研究综述

熊小伏<sup>1</sup>, 陈星田<sup>1</sup>, 郑昌圣<sup>1</sup>, 余锐<sup>2</sup>

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030; 2. 四川省电网公司, 四川 成都 610041)

**摘要:** 为了适应智能电网建设安全、高效的核心要求, 对继电保护系统状态评价研究进行了综述。重点关注继电保护系统的状态划分、隐藏故障的诊断方法、风险分析三方面的研究进展, 分别从诊断方法、评估模型、风险评价指标与基础数据来源等方面比较了研究成果的优缺点, 指出进一步研究应围绕构建继电保护状态指标、研究在线诊断技术、提出信息接口标准等方面展开。

**关键词:** 继电保护; 风险评估; 可靠性; 隐藏故障; 状态评价

### Overview of research on state evaluation of relaying protection system

XIONG Xiao-fu<sup>1</sup>, CHEN Xing-tian<sup>1</sup>, ZHENG Chang-sheng<sup>1</sup>, YU Rui<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. Sichuan Electrical Power Company, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Being safe and highly efficient is the core requirement of the smart grid construction. This paper summarizes the studies on the state assessment of relaying protection system. The state division of relaying protection system, diagnostic methods of hidden failure and risk assessment are focused. Based on the comparison of the advantages and disadvantages of all the studies from the aspects of diagnostic methods, assessment models, indexes of risk evaluation and fundamental data source, this paper points out new indexes of relaying protection system state evaluation, real time diagnosis technology and new standard for information interface will be the main issue of research in the future.

**Key words:** relaying protection; risk assessment; reliability; hidden failure; state evaluation

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)05-0051-08

## 0 引言

随着我国逐渐加快智能电网建设的步伐, 新能源大量接入, 智能电力电子器件不断增多, 使得对新型继电保护装置的需求日益增加, 保护的整定配合随之更加复杂, 继电保护系统发生不正确动作的可能性会更大。此外, 为了节省二次设备的巡视、检修资源消耗, 减少检修停运时间和次数, 急需实施继电保护设备的状态维修。因此研究继电保护状态诊断, 开发继电保护状态评价体系就具有重要意义。

隐藏故障是影响继电保护正确工作的重要因素。继电保护系统含有隐藏故障, 会在一定条件下导致继电保护装置的误动或者拒动, 其直接后果是被保护元件错误断开或导致故障停电区域扩大。因继电保护隐藏故障具有威胁性大, 隐蔽性高等特点, 受到国内外研究学者的广泛关注。北美电力可靠性

协会(NERC)在对 1988~1996 年电网重大事故的分析报告中指出, 70%的 N-2 停运事件由继电保护系统的误动造成<sup>[1]</sup>。2003 年 8 月伦敦南部电力传输系统出现故障, 由于继电器安装错误, 导致线路的后备保护误动, 造成伦敦近 20%的负荷损失<sup>[2]</sup>。在巴西“2011·2·4”大停电事故当中, 起因同样是一回线路与母线之间的开关失灵保护装置误动, 随后, 又因某水电站辅助设备的保护整定值不合理, 造成机组全部停运, 导致事故再次扩大, 受停电影响的人口超过 1 000 万<sup>[3]</sup>。近年来的运行统计表明, 继电保护装置的错误动作一般不是原理不正确, 而是多由运行中整定错误或外部回路故障造成, 由运行原因引起的误动所占比例为 50%以上<sup>[4]</sup>。

以往针对继电保护系统运行能力的评价体系, 重点强调是否正确动作的结果, 大多从历史数据分析误动与拒动概率、正确动作率、故障率、可用度、经济效益等。缺少针对继电保护运行状态识别

的在线诊断技术, 缺少将“安全性能”量化的全面性指标。虽然继电保护装置的四项基本要求规范了设备的技术性能, 但是对性能优劣的描述是定性的、模糊的, 亟需对继电保护装置的运行状态进行在线诊断和定量的评价, 以满足智能电网建设“安全、高效”的核心要求。

继电保护系统状态评价是指通过状态诊断对运行过程中继保设备性能、系统功能优劣的评判。本文对现有的继电保护系统诊断及状态评价方法进行了分析, 阐述了目前研究较为深入的模型和算法的优缺点, 指出了需要进一步研究的方向。

## 1 继电保护系统状态

继电保护系统是指完成继电保护功能的所有硬件和软件装备, 包括继电保护装置以及与装置相连的交流回路和直流回路。所谓继电保护状态是指继电保护系统完成预定保护功能的能力。已有研究依据继电保护系统工作的特点, 普遍从继保装置的硬件、软件状态, 回路状态, 系统功能状态等方面进行状态空间的确立和分析。

### 1.1 设备状态

设备状态通常包括继电保护装置的硬件状态和软件运行状态。设备状态不仅与设计水平、制造工艺、软件版本、元器件质量有密切联系, 也与运行环境和维护水平有着很大关系。

设备状态最基本的区分方式为投运、停运状态的区分方式。早期的文献中将停运状态细分为五种: (1)计划检修停运; (2)随机停运; (3)误动停运; (4)拒动停运; (5)无选择停运<sup>[5]</sup>。其中(5)指的是保护失去选择性的不正确跳闸情况, 现在大多将其归为误动停运类别。由于继电保护具有结构复杂, 工作模式较多等特点, 需要根据不同的分析目的进行状态划分。文献[6]通过“一类失效”和“二类失效”的概念, 对一次系统自身原因的停运和二次系统引发的误动、拒动状态加以区分。从误动、拒动的原因入手, 文献[7]通过研究误碰、运行维护不良等案例, 划分出由于人为因素导致的误动状态。实际运行中继电保护系统存在多重化配置, 文献[8]讨论了2套主保护, 2套主保护及1套近后备保护, 2套主保护及1套远、近后备保护情况下的停运状态划分方法; 另外, 考虑冗余配置之后, 检修状态也可进一步分为带电检修与停电检修状态<sup>[9]</sup>。考虑到继电保护系统具有一定的自诊断能力, 通过将设备失效状态划分为可自诊断失效状态与不可自诊断失效状态<sup>[10]</sup>, 会使状态模型更接近实际。由于继电保护设备长期处于准备工作的状态, 部件腐蚀老化等环境因素对

设备状态的影响会从量变积累到质变, 有必要在设备正常动作和不正确动作状态之间确立过渡状态。文献[11]通过讨论断路器的动作结果将继电保护系统分为六种工作状态, 其中设立了含有隐藏故障的过渡状态, 并且确定了过渡到误动状态的概率。文献[12]将硬件有缺陷导致保护不正确动作的状况分为三类: (1)当故障发生时, 设备本身的保护正确动作, 相邻其他设备的保护由于硬件缺陷误动; (2)当故障发生时, 该设备本身的保护由于硬件缺陷而拒动; (3)无故障时, 附近发生扰动导致保护误动。这种状况的划分适用于不同隐藏故障模式的讨论, 但由于涉及到相邻保护装置的状态, 元件的状态数过多会导致这种模型容易出现状态组合空间太多的问题, 模型的建立和求解都十分困难。

在微机继电保护中, 影响软件可靠性的因素有: 对客户需求分析定义不准确, 软件结构设计失误, 编码有误, 考虑情况不全面, 测试不规范, 文档缺乏完整性等<sup>[13]</sup>。在软件缺陷当中较为突出的是软件配置管理问题, 有部分继电保护不正确工作的事故是由于继电保护软件版本变更不当造成的。可见人为因素是研究软件运行状态的重要方面, 在杜绝软件缺陷的措施上, 应加强软件测试技术, 保证软件程序、文档、数据的一致性、完整性。

### 1.2 回路状态

继保系统的回路分为两部分, 一部分是拥有自检能力的通信回路; 另一部分则是缺少硬件自检, 也难以监测状态的交流回路, 直流回路以及工作电源回路等二次回路。在继电保护系统技术发展中, 通信回路对保护系统的正确动作越来越关键。文献[14]定义了通信网络失效模式, 并按失效程度划分为单重失效和多重失效, 利用路径选择模型, 文章分析了广域保护通信可靠性, 最后提出了保护信息传输路径自愈、重构的理念; 文献[15]则进一步对数字化保护的通信系统冗余状态进行了分析, 讨论了采用 PRP、HSR 协议的不同冗余网络的可靠性。

二次回路由许多继电器和连接设备的电缆组成, 具有点多、分散的特点。其工作状态的确是通过部分自检和人员巡检来完成的, 缺少智能诊断设备和方法。一般而言, 回路中因绝缘破坏导致的一点接地状态并不直接影响二次回路的正常运行, 但若不能迅速定位并消除故障, 发生多点接地故障, 就很有可能引起保护误动作。文献[16]结合实际事故介绍了二次回路多点接地的产生原因和危害, 文献[17]针对电子式电流互感器建立了完善的 FMEA 表格和故障树, 其中详细罗列了二次侧故障原因及后果, 可以依据故障原因与后果的不同对状态进行

合理划分。

### 1.3 继电保护系统功能状态

微机保护系统由二次回路、保护装置、收发讯机、操作箱继电器等环节组成;数字化继电保护系统由同步时钟源、传输介质、互感器、合并单元、交换机、保护单元、智能终端、断路器等环节组成<sup>[18]</sup>。继电保护系统是通过装置间相互配合来完成工作的,系统功能状态是对上述各环节状态的综合反映。文献[19]在考虑隐藏故障的前提下对元件之间的相互影响进行适当解耦,将不同元件导致的误动状态归为一类状态,得到更为实用的状态模型。此外,考虑到继电保护装置自检<sup>[20]</sup>、在线监视功能、冗余配置<sup>[21]</sup>、热备用<sup>[22]</sup>、保护闭锁<sup>[23]</sup>的影响,继保系统的功能存在多种可能状态。从系统可靠性建模来看,其组成会越来越复杂,状态数目会越来越多,研究更为完善的模型和智能分析工具,将会是解决这一问题的有效途径。

## 2 继电保护系统状态诊断方法

通过对继电保护系统运行状态的在线诊断,获得足够的状态信息,是实现继电保护系统在线状态评价的基础。目前由于一次开关与二次保护信息上传不及时,时标不一致,信息较少或缺失,上传数据量过大等问题,使得用于保护状态评价的基础数据仍然缺乏。

为了及时发现高风险状态,对继电保护的隐藏故障进行诊断是期望采取的主要技术手段。A. G. Phadke 最早在文章中提出了对继电保护隐藏故障进行监视和控制的设想<sup>[24]</sup>,通过将继保设备的输入同时导入到隐藏故障监视系统中,利用逻辑模块将继保系统和监视系统的运行结果进行比对,以判断继保系统是否含有隐藏故障,对继保监视系统的设计起了指导性作用。文中还提出两点意见:(1)使用数字化保护设备将会令隐藏故障监视变得相对容易实现;(2)并没有必要对每一个继保设备进行监视,只需要监视风险度较大、危害后果较为严重的母线或线路上的继保设备。弗吉尼亚理工大学的多位学者对隐藏故障的监控方法有较为深入的研究,文献[25]详细介绍了隐藏故障监视系统的结构,由三个主要功能模块组成:隐藏故障监视模块,隐藏故障控制模块和误动作追踪数据库。当监视模块监测到继保系统有不正常状态,会启动控制模块的两种保护机制:(1)隔离可疑装置;(2)改变跳闸逻辑,形成两到三个同类继电功能单元同时投票的跳闸机制。文献[26]介绍了相类似的继电器投票的备用跳闸机制,但其采用的监视模块不仅仅覆盖重要度高、脆

弱度高的设备,而是覆盖了子站内所有继电器,在增加成本的前提下,大大提高了这种监控系统的可靠性。美国电力科学研究院,华盛顿大学,亚利桑那州立大学,爱荷华州立大学以及弗吉尼亚理工大学利用多 Agent 技术共同研发出电力基础设施战略防护系统(SPID)<sup>[27-28]</sup>,具有监视保护装置隐藏故障,评价电力系统脆弱性,防止灾难性故障的能力。该系统在原有监控与数据采集(SCADA)的基础上,通过获取远端故障录波器(DFR)的数据,加强了诊断隐藏故障的可靠性。

近年来,基于继电保护信息系统的保护状态诊断发展得较快。文献[29]将继电保护系统工作特性分类为静态特性与动态特性。前者指的是保护装置在未满足启动条件时的工作特性,可用于检测继电保护系统测量回路、连接电缆、前置处理电路、采样值保持等环节的隐藏故障;后者则指测量信号满足了保护启动条件,适用于检测整定值与动作原理的正确性。文章采用 WAMS 的测量信息对继电保护的静态特性进行监视。文献[30]则采用故障录波系统对继电保护系统动态特性进行监测。从继保系统自愈性的角度出发,增加自检校验环节将是数字化变电站保护系统的一大趋势。在线整定系统的提出让定值配合问题有了解决途径。在线整定一般采用以下步骤<sup>[31]</sup>:(1)建立定值空间;(2)实时匹配拓扑信息;(3)实时整定。其缺陷也是显而易见的,拓扑发生变化时为故障高发时期,而实时整定未完成期间,系统只能使用传统离线整定值,因此,需要提升实时整定速率,完善在线整定策略。

IEC61850 规约在数字化变电站的应用正逐步完善,IEDS 可以为诊断隐藏故障提供精确的实时数据,但仅限于互感器和继电器环节的诊断,缺少诊断断路器跳闸环节的能力<sup>[32]</sup>。文献[33]在线分析了断路器健康状态,通过触头电磨损量,分、合闸线圈,操动机构等权重系数的求取,得到高压断路器的总体潜在故障率。针对可靠性较低电子式互感器,文献[34]利用小波理论提取、比较信号突变时刻,以判断互感器是否处于异常状态。

总结以上在线诊断方法,就目前的技术水平来看较为实用的做法是利用测量冗余对继电保护交流回路进行诊断,利用故障录波和保护装置内部信息进行保护系统故障反映能力诊断。

## 3 继电保护系统状态分析及应用

### 3.1 基于继电保护设备状态统计分析的继电保护风险评价

随着马尔科夫状态模型、故障树模型的普遍应

用,许多学者建立了继电保护系统风险评价体系,定义保护系统误动率、拒动率、正确动作率、故障频率、可用度、失负荷风险等等指标来反映继电保护系统的可靠水平。用于分析的基础数据包括各个模块及其构成系统的测试、运行、停运、检修状态的原始记录,其来源主要有两种途径:一是收集客观的历史统计数据;二是从主观先验概率角度出发,以历史统计数据为基本参考值,结合当前的运行环境和方式,给出当前数据可能取值的范围。由于研究问题的角度不同,很多时候需要解决历史数据不全的缺陷<sup>[35]</sup>。仿真方面,神经网络方法同样面临着学习样本不足的困境,而蒙特卡罗方法则突出较强优势。

目前应用较为广泛的仍是基于历史统计数据的风险评价方法。文献[36]提出的模型能够同时兼顾设备历史运行参数和设备健康状态对设备故障率的影响。文献[37]从先验概率角度出发,分三个步骤对故障率进行分析:(1)反映电网的网架结构,开关装置与电气元件之间的连接关系;(2)分析当前失效参数、运行参数;(3)分析相关场景的历史保护失效数据,确定一次系统分析的阶数和规模。国外学者在建立继电保护系统可靠性模型时,主要是沿用一次设备可靠性分析思想。文献[38-39]介绍了线路距离保护之间的影响,详细区分了隐藏故障模式,将隐藏故障风险区域的概念从每个单元延伸至以长度来度量的输电线路,使结果更为直观。文章的不足之处在于:数据处理时,将由隐藏故障引起的断路器误动率假设为常数,由于线路保护系统的差异,隐藏故障的发生概率实际上是一个变量。文献[40]说明了通过传统的抽样方法获取置信度较高

的仿真结果,需要生成大量样本、很长的计算时间。采用重要性抽样方法很好地让小概率故障事件在样本中出现的更为频繁。文章除了考虑线路保护因隐藏故障而错误动作之外,还考虑了低压时误切母线或者发电机的情况,并通过直流潮流算法弥补牛拉法在三次迭代后不收敛的情况,最后利用抽样获得的误动率评估出线路的薄弱环节。

通过对比表1中的模型可以发现,因建模角度不同,指标涵盖的方面不同,仍缺少完整的状态评估模型研究;其次,丰富历史数据来源对于状态评估模型的建立起着重要作用,历史数据不全使得许多情况下需要借助假设,这反映出了缺乏信息接口标准的现状。

继电保护状态诊断信息对于完整的状态评价至关重要,诊断过程即可以视为基础数据的获取过程。状态评价不仅能得到量化的失效率,还希望得到距“失效边缘”的距离,这样可使其评价结论更为准确。

### 3.2 基于保护设备状态评价的安全措施

当通过隐藏故障诊断等措施对继电保护装置状态进行评价,发现可能造成拒动或误动后果的保护装置后,可采取出口隔离或功能重组操作,特别是在采用基于 IEC61850 具有数据共享功能的智能变电站和具有广域保护配置的情况下,保护功能的重构成为了可能<sup>[41]</sup>。利用数字化变电站信息共享的优势,文献[42]提出了提高数字化变电站保护系统可靠性的两种方案即 SBPU(Shared Back-up Protection Unit)(用于解决保护单元失效)和 SB(Software Back-up)(用于解决互感器失效)两种方案。其中采用共享后备单元的方式实现了任意保护

表1 模型比较

Table 1 Model comparison

文献	诊断方法	评估方法	采用指标	指标说明	数据来源
[17]	无	半马尔科夫过程	预防性检修频率	考虑多停运模式	信息管理系统统计
[18]	无	马尔科夫模型	正确动作率、拒动率、 误动率	考虑装置自检、在线监视、 配置冗余、保护误动的影响	文献假设、历史 统计数据
[23]	从动态门向马尔科夫 链转化的方法	动态故障树、 马尔科夫模型	积累失效概率、保护可用度、 部件概率重要度	考虑硬件、软件各个模块拒动 和误动模式	历史统计数据
[42]	无	状态空间模型	经济损失量	考虑双重化保护	历史统计数据
[43]	无	马尔科夫模型	综合误动率	考虑人为失误	文献假设
[44]	无	马尔科夫模型	系统完好度	考虑设备可靠性、功能可靠性	厂商试验参数、 经验统计
[45]	无	GO法	系统成功概率	考虑至N-3失效模式	文献假设
[46]	利用概率方法进行 隐患辨识	事件树模型	误动暴发概率	考虑设备隐藏故障	历史统计数据

装置失效的后备, 以此为基础构建了“站域后备”保护。这种方式的优点在于无须添加硬件设备, 仅通过软件功能的调用和信号传递方向的改变即可实现对失效保护装置的功能替换。

#### 4 结论与展望

信息与通信技术的快速发展, 为继电保护技术带来了质的飞跃。继电保护从原理到硬件结构均日趋成熟, 满足了电力系统发展的需要。然而, 多年来的运行经验表明, 继电保护系统在运行过程中仍存在不少问题, 保护误动、拒动现象时有发生, 大面积停电风险依然存在。因此全面审视继电保护系统的状态及其风险, 深化运行理论及技术, 对于提高继电保护系统安全性具有重要的意义。

已有研究对继电保护装置的状态划分、风险评估给予了较多关注, 但限于缺乏继电保护运行状态评价规范, 缺少长期、连续的运行统计数据支撑, 对继电保护状态评价的客观性不高, 风险分析可信度不够。

此外, 虽然继电保护装置均注重了自身硬件自检, 但缺少对电流电压等外部回路的故障监视手段, 所以因为回路异常导致的保护系统不正确动作仍是保护系统的主要缺陷。

为此, 一方面应在完善继电保护信息系统基础上研究反映继电保护状态的信息支撑体系, 另一方面应加强继电保护整体系统的隐藏故障监视手段, 为完整建立继电保护系统状态评价手段提供条件, 才能在线客观反映继电保护系统的状态。

建议未来重点开展以下研究:

(1) 建立反映继电保护状态的指标集。指标的构建可以从两个方面着手: 1) 不仅考虑是否动作, 还应考虑保护离动作边界的远近; 2) 不仅评估故障元件的继电保护是否正确动作, 还应考虑非故障元件的继电保护系统的评价。基于全面性、准确性和可操作性的原则, 提出能够反映继保系统运行状态和总体特性状态特征量及其指标体系, 满足在线状态评价的要求。

(2) 研究在线诊断技术。在线诊断能及时更新设备或系统的状态信息, 为计算指标提供实时数据, 是十分必要的环节。针对大量已经投运的变电站, 由于其二次回路多用电缆连接, 对故障易发点应加装监测传感器; 针对即将投运的数字化变电站, 应开发包含二次故障监测模块的高级分析软件。

(3) 提出信息接口标准。由于设备制造厂家的技术壁垒与运行数据不规范, 导致许多设备无法实现信息的共享, 而基础数据不全的直接后果是破坏

了状态评价的全面性。应从成熟的通信技术入手, 结合 IEC61970 等相关国际标准, 提出普遍适用的继电保护状态信息接口标准。

(4) 通过状态评价提出高效、经济的运行维护方案, 例如: 延长继电保护系统的巡检周期、降低二次系统巡检人力物力的消耗。

随着通信及传感器技术的不断发展、新型保护原理的不断提出, 信息量来源也会随之增多, 继保系统状态评价将更加适用于对设备性能、系统功能优劣的评判。从而对提升继保设备制造技术, 优化继电保护原理, 完善继电保护运行技术提供新的技术支撑。

#### 参考文献

- [1] West system coordinating council final report[R]. 10 August 1996 Event, 1996.
- [2] 唐葆生. 伦敦南部地区大停电及其教训[J]. 电网技术, 2003, 27(11): 1-5, 12.  
TANG Bao-sheng. Blackout in south of London and its lessons[J]. Power System Technology, 2003, 27(11): 1-5, 12.
- [3] 邹江峰, 章显亮. 巴西“2009·11·10”和“2011·2·4”大停电事故及启示[J]. 中国电力, 2011, 44(11): 19-22.  
ZOU Jiang-feng, ZHANG Xian-liang. Brazil “2009·11·10” and “2011·2·4” blackouts and inspiration[J]. Electric Power, 2011, 44(11): 19-22.
- [4] 沈晓凡, 舒治淮, 刘宇, 等. 2009年国家电网公司继电保护装置运行统计与分析[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 189-193.  
SHEN Xiao-fan, SHU Zhi-huai, LIU Yu, et al. Statistics and analysis on operation situation of protective relaying of State Grid Corporation of China in 2009[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 189-193.
- [5] 王野雷. 继电保护系统的可靠性概率指标估计及分析方法[J]. 继电器, 1993, 21(3): 50-57.  
WANG Ye-lei. Relay protection system reliability index probability estimates and analysis methods[J]. Relay, 1993, 21(3): 50-57.
- [6] 沈智健, 熊小伏, 周家启, 等. 继电保护系统失效概率算法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(23): 5-8, 97.  
SHEN Zhi-jian, XIONG Xiao-fu, ZHOU Jia-qi, et al. An algorithm for relay protection system failure probability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(23): 5-8, 97.
- [7] 刘海涛, 程林, 孙元章, 等. 基于实时运行条件的元件停运因素分析与停运率建模[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 6-11, 44.

- LIU Hai-tao, CHENG Lin, SUN Yuan-zhang, et al. Outage factors analysis and outage rate model of components based on operating conditions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7): 6-11, 44.
- [8] 熊小伏, 陈飞, 周家启, 等. 计及不同保护配置方案的继电保护系统可靠性[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(14): 21-24.
- XIONG Xiao-fu, CHEN Fei, ZHOU Jia-qi, et al. Reliability of protection relay systems with different configurations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(14): 21-24.
- [9] 王树春. 双重化继电保护系统可靠性分析的数学模型[J]. 继电器, 2005, 33(18): 6-10, 14.
- WANG Shu-chun. Markov model for reliability analysis of dual-redundant relays[J]. Relay, 2005, 33(18): 6-10, 14.
- [10] 陈少华, 马碧燕, 雷宇. 综合定量计算继电保护系统可靠性[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(15): 111-115.
- CHEN Shao-hua, MA Bi-yan, LEI Yu. Integrative and quantitative calculation of reliability for relay protection system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(15): 111-115.
- [11] SHAHIDEHPOUR M, ALLAN R, ANDERSON P. Effect of protection systems on bulk power reliability evaluation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(1): 198-205.
- [12] 吴文传, 吕颖, 张伯明. 继电保护隐患的运行风险在线评估[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7): 78-83.
- WU Wen-chuan, Lü Ying, ZHANG Bo-ming. On-line operating risk assessment of hidden failures in protection system[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 78-83.
- [13] 所旭, 张萍. 微机继电保护软件可靠性探讨[J]. 继电器, 2004, 32(12): 43-46.
- SUO Xu, ZHANG Ping. To investigate the reliability of relay protection software[J]. Relay, 2004, 32(12): 43-46.
- [14] 熊小伏, 吴玲燕, 陈星田. 满足广域保护通信可靠性和延时要求的路由选择方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(3): 44-48.
- XIONG Xiao-fu, WU Ling-yan, CHEN Xing-tian. Routing selection for wide-area protection based on communication reliability and time-delay requirement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(3): 44-48.
- [15] 熊小萍, 谭建成, 林湘宁. 基于动态故障树的变电站通信系统可靠性分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34): 135-141, 20.
- XIONG Xiao-ping, TAN Jian-cheng, LIN Xiang-ning. Reliability analysis of communication systems in substation based on dynamic fault tree[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(34): 135-141, 20.
- [16] 张志军, 孟庆波. 交流二次回路多点接地的解决方案[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(23): 125-129.
- ZHANG Zhi-jun, MENG Qing-bo. Many-place earthing solution of the AC secondary circuit[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(23): 125-129.
- [17] 王鹏, 张贵新, 朱小梅, 等. 基于故障模式与后果分析及故障树法的电子式电流互感器可靠性分析[J]. 电网技术, 2006, 30(23): 15-20.
- WANG Peng, ZHANG Gui-xin, ZHU Xiao-mei, et al. Analysis on reliability of electronic current transformer based on failure modes, effects analysis and fault tree analysis[J]. Power System Technology, 2006, 30(23): 15-20.
- [18] 王超, 王慧芳, 张弛, 等. 数字化变电站继电保护系统的可靠性建模研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 8-13.
- WANG Chao, WANG Hui-fang, ZHANG Chi, et al. Study of reliability modeling for relay protection system in digital substations[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 8-13.
- [19] JIANG Kai, SINGH C. New models and concepts for power system reliability evaluation including protection system failures[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2011, 26(4): 1845-1855.
- [20] 汪隆君, 王钢, 李博. 基于半马尔可夫过程的继电保护可靠性建模[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(18): 6-10.
- WANG Long-jun, WANG Gang, LI Bo. Reliability modeling of a protection system based on the semi-Markov process[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(18): 6-10.
- [21] 张雪松, 王超, 程晓东. 基于马尔可夫状态空间法的超高压电网继电保护系统可靠性分析模型[J]. 电网技术, 2008, 32(13): 94-99.
- ZHANG Xue-song, WANG Chao, CHENG Xiao-dong. Reliability analysis model for protective relaying system of UHV power network based on Markov state-space method[J]. Power System Technology, 2008, 32(13): 94-99.
- [22] 童晓阳, 王晓茹, 汤俊. 电网广域后备保护代理的结构和工作机制研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 91-98.
- TONG Xiao-yang, WANG Xiao-ru, TANG Jun. Study on the structure and working mechanisms of wide-area

- backup protection agents for power networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 91-98.
- [23] 戴志辉, 王增平, 焦彦军. 基于动态故障树与蒙特卡罗仿真的保护系统动态可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(19): 105-113.
- DAI Zhi-hui, WANG Zeng-ping, JIAO Yan-jun. Dynamic reliability assessment of protection system based on dynamic fault tree and Monte Carlo simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(19): 105-113.
- [24] PHADKE A G, THORP J S. Expose hidden failures to prevent cascading outages[J]. IEEE Computer Application in Power, 1996, 9(3): 20-23.
- [25] QIU Q. Risk assesment of power system catastrophic failure and hidden failure monitoring and control system[D]. Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic and State University, 2003.
- [26] HUNT R K. Hidden failure in protective relays: supervision and control[D]. Blacksburg, Virginia: Virginal Polytechnic Institute and State University, 1998.
- [27] LIU C C, JUNG J, HEYDT G T, et al. The s strategic power infrastructure defense (SPID) system: a conceptual design[J]. IEEE Control Syst Mag, 2000, 20(4): 40-52.
- [28] LIU C C. Strategic power infrastructure defense (SPID): a wide area protection and control system[C] // IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002, Asia Pacific, 2002: 500-502.
- [29] 熊小伏, 刘晓放. 基于 WAMS 的继电保护静态特性监视及其隐藏故障诊断[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 11-15, 19.
- XIONG Xiao-fu, LIU Xiao-fang. A static voltage stability evaluation method based on confidence intervals[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 11-15, 19.
- [30] 孙鑫, 熊小伏, 杨洋. 基于故障录波信息的输电线路继电保护内部故障在线检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 6-10.
- SUN Xin, XIONG Xiao-fu, YANG Yang. Online detection for transmission lines relay protection's inner failures based on fault information[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 6-10.
- [31] 刘敬华. 基于网络的继电保护在线整定计算系统[J]. 电网技术, 2008, 32(增刊 1): 68-70.
- LIU Jing-hua. Protective relaying on-line coordination and calculation system based on network[J]. Power System Technology, 2008, 32(S1): 68-70.
- [32] APOSTOLOV A. Disturbance recording in IEC 61850 substation automation systems[C] // Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2005/2006 IEEE PES, 21-24 May 2006, Dallas, TX, 2006: 921-926.
- [33] 郭磊, 郭创新, 曹一家, 等. 考虑断路器在线状态的电网风险评估方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(16): 20-24, 30.
- GUO Lei, GUO Chuang-xin, CAO Yi-jia, et al. Power transmission risk assessment considering breaker online status[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(16): 20-24, 30.
- [34] 熊小伏, 何宁, 于军, 等. 基于小波变换的数字化变电站电子式互感器突变性故障诊断方法[J]. 电网技术, 2010, 34(7): 181-185.
- XIONG Xiao-fu, HE Ning, YU Jun, et al. Diagnosis of abrupt-changing fault of electronic instrument transformer in digital substation based on wavelet transform[J]. Power System Technology, 2010, 34(7): 181-185.
- [35] 宁辽逸, 吴文传, 张伯明, 等. 运行风险评估中缺乏历史统计数据时的元件停运模型[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(25): 26-31.
- NING Liao-yi, WU Wen-chuan, ZHANG Bo-ming, et al. Component outage modeling method for operation risk assessment with limited power components' failure data[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(25): 26-31.
- [36] 王慧芳, 杨荷娟, 何奔腾, 等. 输变电设备状态故障率模型改进分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(16): 27-31, 43.
- WANG Hui-fang, YANG He-juan, HE Ben-teng, et al. Improvement of state failure rate model for power transmission and transforming equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(16): 27-31, 43.
- [37] 戴志辉, 王增平, 焦彦军, 等. 阶段式保护原理性失效风险的概率评估方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 175-182.
- DAI Zhi-hui, WANG Zeng-ping, JIAO Yan-jun, et al. Probabilistic assessment method for failure risk of stepped protection philosophy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 175-182.
- [38] YANG Fang, SAKIS M A P. Effects of protection system hidden failures on bulk power system reliability[C] // 38th North American Power Symposium, USA: NAPS, 2006: 517-523.
- [39] YANG Fang, SAKIS MELIOPOULOS A P, COKKINIDES G J, et al. Bulk power system reliability assessment considering protection system hidden failures[C] // 2007 IREP Symposium on Bulk Power System Dynamics and Control-VII. Revitalizing

- Operational Reliability, Charleston, SC, USA, 2007: 1-8.
- [40] BAE K, THORP J S. A stochastic study of hidden failures in power system protection[J]. Decision Support Systems, 1999, 24(3): 259-268.
- [41] 熊小伏, 陈星田, 夏莹, 等. 面向智能电网的继电保护系统重构[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 33-36.  
XIONG Xiao-fu, CHEN Xing-tian, XIA Ying, et al. Study on reconstruction of relay protection system for smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17): 33-36.
- [42] 丁茂生, 王钢, 贺文. 基于可靠性经济分析的继电保护最优检修间隔时间[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(25): 44-48.  
DING Mao-sheng, WANG Gang, HE wen. The optimum routine maintenance interval of protection based on reliability economic analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(25): 44-48.
- [43] 张晶晶, 丁明, 李生虎. 人为失误对保护系统可靠性的影响[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 1-5.  
ZHANG Jing-jing, DING Ming, LI Sheng-hu. Impact analysis of human error on protection system reliability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 1-5.
- [44] 孙福寿, 汪雄海. 一种分析继电保护系统可靠性的算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(16): 32-35, 76.  
SUN Fu-shou, WANG Xiong-hai. A new method for reliability analysis of protection in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(16): 32-35, 76.
- [45] 王超, 高鹏, 徐政, 等. GO 法在继电保护可靠性评估中的初步应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(24): 52-56, 85.  
WANG Chao, GAO Peng, XU Zheng, et al. Application of GO methodology in reliability assessment of protective relays[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(24): 52-56, 85.
- [46] 王慧芳, 王一, 何奔腾. 基于一次设备与保护协同检修的最佳消缺期限研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(13): 46-52.  
WANG Hui-fang, WANG Yi, HE Ben-teng. Research on optimum defect remove period based on joint maintenance analysis of primary equipments with protective relays[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(13): 46-52.
- [47] 余锐, 熊小伏, 于军. 数字化变电站继电保护可靠性措施研究[J]. 四川电力技术, 2009, 32(2): 33-36.  
YU Rui, XIONG Xiao-fu, YU Jun. Research on reliability measures of digital substation relaying protection system[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2009, 32(2): 33-36.

收稿日期: 2013-11-11; 修回日期: 2013-12-27

作者简介:

熊小伏(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统保护与监控研究; E-mail: cqxxxf@vip.sina.com

陈星田(1971-), 男, 博士研究生, 从事电力系统保护与控制研究;

郑昌圣(1990-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统保护研究。