

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201306

## 基于广域信息的继电保护实时评价研究

叶远波<sup>1</sup>, 刘宏君<sup>2</sup>, 张兆云<sup>3</sup>, 谢民<sup>1</sup>, 赵子根<sup>2</sup>

(1. 安徽省电力公司调度控制中心, 安徽 合肥 230022; 2. 长园深瑞继保自动化有限公司, 广东 深圳 518057;  
3. 东莞理工学院, 广东 东莞 523808)

**摘要:** 继电保护运行状态监测和状态检修是提高继电保护运行可靠性的重要手段。提出了一种基于广域信息的继电保护实时评价方法, 并进行了实时评价系统的研制。实时评价系统通过获取电网调度系统、保信主站和故障录波器主站的信息, 对每次继电保护的動作行为进行全局性实时评价、状态评估并生成相应报告, 大幅减少了事故分析的时间, 增加了事故分析的广度, 提高了事故分析的质量。实时评价系统全面分析与故障线路相邻的所有未動作线路的保护信息, 从这些设备的录波信息和中间节点信息中分析其動作行为, 发现其隐患, 保障电网更安全的运行。该系统已在国网安徽省电力公司调度中心试运行, 运行结果表明该方案具有良好的可行性, 有效提高了运维人员的维护效率。

**关键词:** 继电保护; 实时评价; 广域信息

### Research on real-time evaluation of relay protection based on wide area information

YE Yuanbo<sup>1</sup>, LIU Hongjun<sup>2</sup>, ZHANG Zhaoyun<sup>3</sup>, XIE Min<sup>1</sup>, ZHAO Zigen<sup>2</sup>

(1. Dispatching and Control Center, Anhui Electric Power Company, Hefei 230022, China; 2. CYG SUNRI CO., LTD., Shenzhen 518057, China; 3. Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China)

**Abstract:** The operational status monitoring and condition maintenance of relay protection is important for improving the reliability of relay protection operation. A real-time evaluation method of relay protection based on wide area information is proposed, and a real-time evaluation system is developed. The real-time evaluation system obtains information from the grid dispatching system, the master station of relay protection and the master station of the fault recorder to evaluate the operation of relay protection in real time and generate a corresponding report. The system greatly reduces the time of fault analysis and improves its quality. The system comprehensively analyzes the protection information of all the inactive lines adjacent to the fault line, analyzes their behavior from the recording information and intermediate node information of these devices, determines hidden dangers, and ensures the safe operation of the power grid. The system has been put into operation in the dispatching center of the State Grid Anhui Electric Power Company. The operational results show that the scheme has good feasibility and effectively improves the maintenance efficiency of operation and maintenance personnel.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 521200190081).

**Key words:** relay protection; real-time evaluation; wide area information

## 0 引言

随着经济的不断发展, 我国电网建设规模不断扩大, 保护设备数量也迅速增加, 截至 2019 年, 国家电网公司拥有智能变电站 5 000 多座, 智能电网调度控制系统约 200 多套, 微机继电保护装置 110 万多套, 其中 220 kV 及以上系统保护设备数量接近

20 万台, 年增大率达到 5%。随着电网规模的扩大, 一次设备的故障次数也有所增加, 2018 年共发生 220 kV 及以上电压等级故障 2 360 次<sup>[1]</sup>。面对不断增多的保护装置和故障次数, 继电保护管理者不得不面对两个问题, 一是要管理好现有的保护装置, 确保及时发现继电保护装置的隐患, 特别是如何减少周期性维护的次数, 加大状态检修的力度<sup>[2-4]</sup>。第二个问题就是在电网故障的时候如何快速地获取整个电网的故障报告, 特别是没有动作的保护装置是

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(521200190081)

否运行正常, 以往的分析都局限于动作线路的分析, 基本不涉及到不相关间隔的保护装置运行分析。

继电保护装置状态监测是实现继电保护状态检修的基础, 目前针对继电保护的状态监测多以智能变电站为主<sup>[5-9]</sup>。根据状态监测信息, 实现继电保护装置状态评价是实现继电保护状态检修的关键<sup>[10-11]</sup>。目前对于继电保护状态的评价研究, 较多集中于评价方法, 文献[12]提出了一种基于专家调研和 G1 法的保护评价方法, 文献[13]提出了采用组合赋权法的保护设备状态模糊综合评估, 文献[14]提出了基于诱导有序加权证据推理方法的不完全信息下继电保护系统健康状态评价, 文献[15]提出了模糊综合评价方法, 此外基于 KPI 的继电保护运行评价指标体系<sup>[16]</sup>, 贝叶斯理论的保护设备状态评价<sup>[17]</sup>, 基于模糊支持向量机的保护状态评价等新的方法也在不断涌现<sup>[18]</sup>。但是这些方法大多依赖于保护装置自身上传状态数据。若现有的大量在用设备采用该方法支持状态检修<sup>[19]</sup>, 则需要升级改造这些设备, 将状态数据上送给相应主站。

继电保护设备状态检修除了可以依赖于保护装置自身数据之外, 也可以跨装置进行研究, 其中同源数据比较是一种常用的方式<sup>[20-21]</sup>。文献[22]提出了基于保信系统的继电保护在线监测评价管理系统的应用研究, 文献[23]提出了基于故障录波主站的实时在线保护评价方法。

在电力系统事故分析方面, 系统输出的事故分析报告是最重要的分析手段, 目前主要是继电保护装置和故障录波器输出的事故报告<sup>[24]</sup>, 该报告仅仅展示本设备采集到的数据。一次故障涉及到的保护装置众多, 事故分析人员需要拿多套装置的数据手动进行分析, 确定保护动作的正确性。在这种情况下没有动作的保护装置是否运行正常基本是不被分析的, 从而导致事故分析耗时费力且不全面。

事实上, 每次事故发生之后, 没有跳闸保护装置的录波是电网运行中非常有用的数据, 既可以用来分析当次事故的动作行为是否正确, 又可以根据相应的录波找出保护装置运行中存在的隐患, 为保护装置的状态检修提供数据支撑。基于此, 本文提出了基于广域信息的继电保护评价系统, 实现基于已有保信系统、调度系统和故障录波器系统数据的继电保护设备在线监测、动作评价、状态评估, 同时实现继电保护装置的远程预警、专业特维工作、行为诊断, 将大量现场工作转化为系统自动完成。本方法既可以高效全面地完成电网的继电保护动作分析, 又可以在事故发生前及时提出状态评估和预警, 从而及时有效地针对性消除缺陷, 确保继电保

护设备在全生命周期内安全运行, 降低检修成本; 避免因人员专业巡视和维护技术水平的不同而出现的偏差, 降低现场运维人员核对的工作量及出错率, 有力保障电网的安全可靠运行。

## 1 实时评价系统架构

继电保护实时评价系统安装于各级调度中心, 该系统分别获取电网调度系统(EMS)、保信主站系统、录波器主站系统的信息, 实时监视电网继电保护运行情况和每一次保护动作情况, 并发现继电保护装置运行的隐患。图 1 是评价系统在电网中的位置。

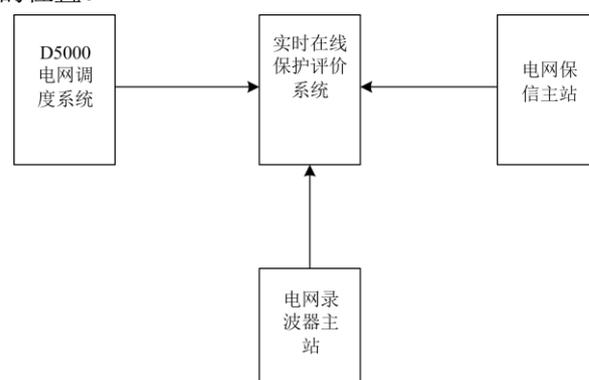


图 1 实时评价系统在电网中的位置

Fig. 1 Location of real time evaluation system in power grid

如图 2 所示, 实时评价系统由五部分组成, 分别是分析模块, EMS 通信模块, 录波器主站通信模块, 保信主站通信模块, 信息发布模块。其中分析模块是整个评价系统的核心, 又包括拓扑图生成子模块、可靠性分析子模块、故障识别子模块和反措优化子模块。

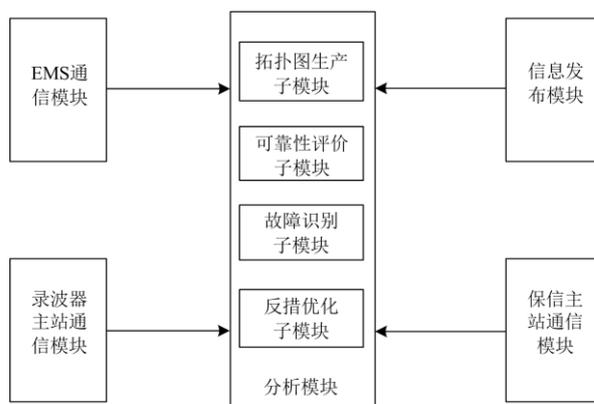


图 2 实时评价系统组成

Fig. 2 Composition of real time evaluation system

1) EMS 通信模块: 主要从电网调度系统(D5000 系统)获取当前电网的拓扑结构, 供分析模块使用;

2) 录波器主站通信模块：主要是和录波器主站进行通信，发送读取录波指令、录波和录波配置文件等；若相应的录波信息并未上传到录波器主站，还要求录波器主站主动去读取相应变电站录波器的扰动录波并转发给实时评价主站。

3) 保信主站通信模块：该模块主要和保信主站进行通信，发送读取保信数据指令并读取相应数据(遥信、遥测、录波、保护事件等)；读取保信通道配置文件等。同录波主站类似，若实时评价系统所需要的信息保信主站不存在，则要求保信主站主动去读取保护装置的相应信息并转发给实时评价主站。

4) 信息发布模块：主要通过 web 和短信，微信等推送信息到相关人员。

5) 分析模块：该模块是实时评价系统的核心，具体细分为四大模块。

(1) 拓扑图生成模块：根据各通信模块得到的数据生成当前电网的运行图以及电网保护装置图。

(2) 可靠性评价模块，采用多维度信息的人工智能算法，对继电器故障的中间状态过程的逻辑动作行为进行动态分析，并重点对装置软件逻辑元件、二次逻辑接点和定值配合情况进行动态校核和评价，提出对保护动作的精准化评价。

(3) 智能诊断与电网故障识别模块，综合电网运行、保护运行等数据，利用变化趋势、突变监测、数据源比对等智能技术，进行电网故障预警、电网故障快速定位和辅助决策、隐性故障识别、观测保护设备内部信息、智能变电站回路信息、运行定值等。建立隐性故障识别模型，关联电网故障数据，以大电网和设备视角识别隐性故障。

(4) 反措优化模块，通过分析一次故障和保护动作分析，提出保护设备定向优化建议，降低电网运行风险，通过挖掘一次设备配置、保护设备配置、保护动作等大量数据，分析保护配置合理性、双重化效果和后备保护作用，提出保护配置、整定、策略的定向优化方案。

## 2 实时评价系统原理

实时评价系统工作任务主要包括电网架构定时刷新、保护运行状态监测和保护动作行为评价 3 个部分。

### 2.1 电网架构定时刷新

电网拓扑结构<sup>[25]</sup>是实现继电保护实时评价的基础，系统通过与电网其他系统的通信定时刷新电网拓扑结构，定时周期可以是 1 天或者 1 周。

如图 2 所示，拓扑图更新模块从电网能量管理

系统的 CIM/E 模块获取电网最新的拓扑架构，保信主站通信模块读取最新的保信通道文件，分析模块中的拓扑图生成模块，根据前述信息生成电网保护装置运行架构。

电网架构分为 3 个层次，用 3 个表描述电网架构，从小到大依次如下。

1) 电网保护装置表。该表主要描述保护装置与保护间隔的对应关系，主要字段包括：保护装置编号，保护线路编号，对侧保护装置编号。保护装置的编号用  $P_i$  表示。

2) 电网间隔设备表。电网间隔设备表用来描述线路、变压器等间隔的保护基本信息，该表在字段设计上兼顾变压器和线路。根据现场实际运行情况，线路考虑 T 接的可能，变压器考虑 3 侧，所有保护都考虑双重化，间隔设备表主要字段包括：间隔编号，间隔第一侧母线(M 侧)编号，间隔第二侧母线(N 侧)编号，间隔第三侧母线(T 侧)编号，M 侧保护 1 编号，M 侧保护 2 编号，N 侧保护 1 编号，N 侧保护 2 编号，T 侧保护 1 编号，T 侧保护 2 编号。第  $i$  条线路记作  $L_i$ 。其中对于线路间隔来说，M 侧就是线路本侧，N 侧就是线路对侧，T 侧是可选项；对于变压器间隔来说，分别表示变压器的各侧母线编号。电网间隔的编号用  $L_i$  表示。

3) 电网变电站表，主要描述电网当前变电站的所有间隔，便于故障时检索同变电站设备，读取同变电站通电压等级所有设备的录波和动作信息进行分析。该表主要字段包括：电压等级编号，所属变电站编号，母线上间隔 1 编号，母线上间隔 2 编号……。母线的编号用  $B_i$  表示。

电网保护装置表、电网间隔设备表和电网变电站表等 3 张表可以完整描述电网中继电保护装置的关联关系。

除了保护拓扑结构的表格之外，为了后续评价的需要，装置还需要生成一个装置同源通道信息表，主要是根据保信通道文件以及录波器通道配置文件分析出所有的同源通道，例如保护装置和录波器的通道对应通道，同一条母线的保护电压等等。

### 2.2 保护运行状态监视

评价系统可以从电网其他系统获取电网运行信息，对电网继电保护运行状态进行实时监视，监视周期一般为 1 天一次，在数据量较少的时候可以缩短监视周期。电网实时状态监测类似于前期的继电保护及相关回路动态监控及故障诊断<sup>[18]</sup>，但是该系统的优势是适用于已经建成的变电站。

保护运行状态监视的主要内容包括：

1) 通过保信主站或者时间管理主站，获取保护

装置当前时间;若时间相差过大(如超过 10 ms),则给出告警信号;时间准确是实现保护装置跨间隔分析的关键,因而各装置时钟监测和时间管理也是本系统的重要组成部分。

2) 通过保信主站,依次召唤所有保护及对侧的交流流量,根据同源通道信息表进行同通道幅值(包括电压和电流)比较,若差异过大(如误差超过 10%且大于 0.1 倍额定值)则给出告警。

3) 通过保信主站,依次召唤所有同母线线路的保护装置交流流量,根据同源通道信息表进行同通道幅值(主要是电压)比较,若差异过大(如误差超过 10%且大于 0.1 倍额定值)则给出告警。

### 2.3 保护动作行为评价

保护动作行为评价是本系统的核心。系统时刻监视保护运行情况,如发现有保护动作则收集保护动作数据,并对保护的动作为行为进行评价。一次保护动作后,评价系统通过对电网保护装置表、电网间隔设备表和电网母线表的检索定位出本次事故所有的关联设备,然后有针对性地从电网其他系统获取本次保护动作的相关数据,最终完成事故分析。具体评价流程如图 3 所示。

如图 3 所示,具体步骤如下:

1) 假设保护装置  $P1$  动作,记录下保护动作时间。

2) 通过电网保护装置表,查询到当前保护所属间隔  $Li$ (包括线路和变压器等),并记录下本线路相关的所有保护  $P1$ (自身),  $P2, \dots, Pm$ 。

3) 在获取间隔编号  $Li$  之后,查询电网间隔设备表,获取该间隔关联的变电站  $Sm, Sn$  和  $St$ 。

4) 获取相关的 3 个变电站后,查询电网变电站设备表,获取 3 个变电站(若无第三侧,则是两个变电站)当前电压等级所有间隔,分别记作  $L1, L2, \dots, Ln$ 。

5) 获取关联间隔编号之后,再次查询电网间隔设备表,依次查询所有间隔的保护装置,去掉步骤 2 中已经记录的本间隔保护装置,记作  $RP1, RP2, \dots, RPk$ 。至此本次保护动作所有的保护装置已经全部被获取。

6) 通过录波器主站,召唤  $Sm, Sn$  和  $St$  在  $t$  前后 20 s 内的所有录波;若每个站召唤到 1 个录波,则正常进行下一步分析;若没有召唤到录波,扩大时间段召唤并给出告警信号;若召唤到 2 个及以上录波,则对录波进行分析,通过母线电压判断出可能的波形,给出告警信号。对于给出告警的录波可以提醒运行人员干预,允许手动指定录波。

7) 通过保信主站,召唤本线路所有保护装置  $P1, P2, \dots, Pm$ ; 相关线路  $RP1, RP2, \dots, RPk$  在  $t$  前后 20 s 内的所有录波以及动作事件。若每个保护装

置召唤到 1 个录波,进行下一步工作;若没有召唤则提示保信主站主动从保护装置再召唤一次;若还是未能召唤到或者召唤到 2 个及以上录波,给出告警信号,后续处理方法和录波器主站类似,也允许运行人员手动指定或者输入信息。

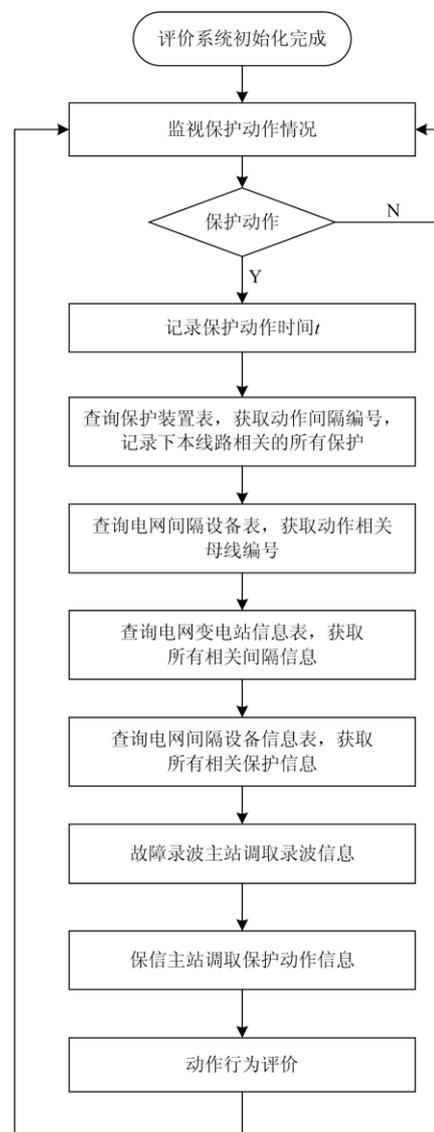


图 3 实时评价流程

Fig. 3 Real time evaluation process

8) 评价模块分析前述所有录波文件, 主要对装置软件逻辑元件、二次逻辑接点和定值配合情况进行动态校核和评价, 并形成书面的评价报告。

9) 智能诊断与电网故障识别模块, 针对前述录波找到所有的同源通道(根据同源通道信息表, 包括模拟量和数字量), 对数据进行比对; 对于非故障线路两侧所有的通道的电流进行差流计算, 判断是否有差流越限的隐患等; 对所有的开关量通道进行扫

描,判断是否有开关信号不稳定等,通过其他一系列手段识别大电网和设备的隐性故障并报警,报警信息通过发布模块提示相关人员。

10) 根据本次动作情况,优化模块提出优化建议,例如某某装置模拟量偏差过大并提示检修,通过发布模块提示相关人员。

在完成本次事故分析之后,将本次保护动作所涉及到的动作事件、动作录波都标记为已处理,评价系统继续监视是否有新的未处理的保护动作情况。

### 3 实时评价系统实现

#### 3.1 系统实现

实时评价系统基于 Linux 平台开发,采用 SQL Server 数据库,独立于其他系统单独设置工作站,通过以太网和其他系统进行通信。

实时评价系统根据功能分为展示界面、用户维护界面及后台处理界面三部分。

展示界面由实时数据展示、告警信息展示、输入与配置模块组成。

用户维护界面主要配置系统的相关参数,及部分无法识别的故障录波通道,评价规则类别管理、规则管理、预警规则管理。同时设置数据输入与配置模块用于输入系统无法自动采集的缺陷、出厂报告等数据以及部分数据的输入与修正。

后台处理部分是系统的核心,实时读取相关评价数据并进行状态评价,根据状态分值进行预警判断并发布相应的预警。

#### 3.2 现场运行案例

本文所提出的基于广域信息的继电保护实时评价系统,已经在国网安徽省电力公司调度中心进行运行、测试。现场运行数据表明,系统运行良好。

2020年3月28日9时34分,220 kV 某某 2725 线发生 C 相永久性接地故障,线路两侧保护装置选跳 C 相,经延时重合闸动作后重合于故障,最终两侧保护装置均三跳出口。评价系统按照既定程序自动对本次故障进行了分析并形成了分析报告,具体分析过程如下:

1) 本线路无第三侧,根据动作情况,查询到两侧变电站所属变电站 S1 和 S2。

2) 通过电网变电站表,获取了所有相关联的线路 2725、2726、2C11、2C12、2728、2V55、2V56、4C24、4C23; 其中 2725 是故障线路(本线路)。

3) 获取所有关联线路的保护装置编号。

4) 通过故障录波和保信主站获取了所有相关的录波。

5) 基于收集的信息对保护进行评价,依次对

2725(故障间隔)、2726、2C11、2C12、2728、2V55、2V56、4C24、4C23 共计 9 条线路进行分析,主要包括动作行为、保护元件灵敏性、外回路、采样回路、定值、压板等分析。

以本线路 2725 开关的分析为例进行阐述保护的动作为分析。2725 的具体分析如下:

1) 本线路双套保护共 4 台保护装置的时序分析。时序分析主要是综合保护装置动作事件、保护录波以及故障录波器录波,梳理出本次保护的动作为时序,表 1 是其中一台装置的动作时序分析示例。

2) 保护元件分析,主要是根据录波得到的电压电流测量值计算出保护元件测量值,然后对比测量值和定值,分析当前保护内部各元件的动作情况。具体来说:对于差动保护,计算出差动电流值;对于距离保护,计算出测量阻抗;对于零序保护,计算出零序电流。在计算出测量值侧基础上,和装置自身定值进行比较,判断出保护动作为是否正确。以上述保护装置的零序保护为例,如表 2 所示。

3) 外回路分析,分析外部所有的开关量变位信息。表 3 是外回路分析示例,分析结果表明在本次动作中变电站 2 侧线路 C 相位置信号存在异常。

发现该异常之后人工读取保护装置录波图,录波图如图 4 所示。录波图显示确实存在故障,此时发出预警信号。

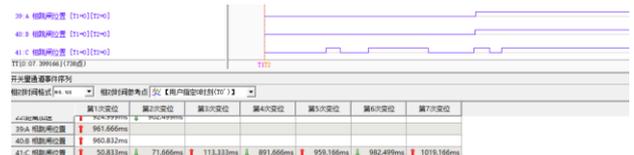


图 4 2725 线路保护装置录波图

Fig. 4 Line protection device waveform of 2725 line

4) 其他分析:对 2725 线路的采样回路以及定值分析未发现异常。

对于其余的 8 条线路进行相同的分析。所有的分析全自动完成,故障之后 20 min 内就可以获取全面完整的分析报告。该报告对指导事故处理以及供电恢复具有重要作用,该系统大大减轻了工作人员的劳动强度,提高了事故分析的质量。

#### 3.3 系统创新点

本系统最大的创新点就是将继电保护的评价拓展到了非故障间隔,通过每次动作时对相邻间隔继电保护设备的动作信息、扰动录波信息和中间节点信息的分析,评估其运行状态,发现其动作隐患,特别是对部分中间节点信息的分析,可以较早发现保护运行中的逻辑故障、异常开入、开关量抖动、



表 1 动作时序分析示例

Table 1 Example of action sequence analysis

变电站	动作时序					
姬某侧 保护 1	a.	0 ms	03/28/20,09:34:46.586000	启动	动作	
	b.	22.5 ms	03/28/20,09:34:46.608500	纵联零序方向	动作	
	c.	22.5 ms	03/28/20,09:34:46.608500	C 相跳闸	动作	
	d.	23.3 ms	03/28/20,09:34:46.609333	纵联距离动作	动作	
	e.	51.7 ms	03/28/20,09:34:46.637667	C 相跳闸位置	合位	
	f.	879.2 ms	03/28/20,09:34:47.465174	重合闸动作	动作	
	g.	899.2 ms	03/28/20,09:34:47.485174	C 相跳闸位置	分位	
	h.	1 003 ms	03/28/20,09:34:47.588508	距离加速	动作	
	i.	1 003 ms	03/28/20,09:34:47.588508	A 相跳闸	动作	
	j.	1 003 ms	03/28/20,09:34:47.588508	B 相跳闸	动作	
	k.	1 003 ms	03/28/20,09:34:47.588508	C 相跳闸	动作	
	l.	1 006 ms	03/28/20,09:34:47.591841	纵联距离动作	动作	
	m.	1 032 ms	03/28/20,09:34:47.617675	A 相跳闸位置	合位	
	n.	1 033 ms	03/28/20,09:34:47.618508	B 相跳闸位置	合位	
	o.	1 038 ms	03/28/20,09:34:47.623508	零序加速	动作	
	p.	1 043 ms	03/28/20,09:34:47.628508	C 相跳闸位置	合位	

表 2 保护元件分析示例

Table 2 Example of protection element analysis

变电站	零序元件	定值/A	测量值/A	理论动作行为	保护 1 实际动作行为	保护 2 实际动作行为	结论
变电站 1	零序过流 II 段	99	7.23	不启动	不启动	不启动	正确
	零序过流 III 段	0.6	7.23	启动	启动	启动	正确
变电站 2	零序过流 II 段	99	44.2	不启动	不启动	不启动	正确
	零序过流 III 段	0.75	44.2	启动	启动	启动	正确

表 3 外回路分析示例

Table 3 Example of external input analysis

变电站	开关量名称	变位/ms	结果
变电站 2 保护 1	投差动保护	0:1	压板正常
	投距离保护	0:1	
	投零序保护	0:1	
	A 相跳闸位置	962:1	压板正常
	B 相跳闸位置	960:1	
		52:1	
		72:0	
	C 相跳闸位置	114:1	C 相跳闸位置
		892:0	
		960:1	
	983:0		
	1 020:1		
重合闸动作	866:1	重合闸动作	
	1 000:1		

异常采样等信息。本系统建成之后, 系统的每一次保护动作都为相邻间隔的保护提供状态检修的数据, 提高了保护的可靠性。

同时本系统全自动化运行, 大幅提高了分析效率和分析的质量, 本系统的建设大幅提高了继电保护的可靠性。

## 4 结论

本文提出了一种基于广域信息的继电保护实时评价方法并进行了实时评价系统研发。通过该系统可以针对电网的继电保护动作情况进行实时全面的分析, 并进行保护动作实时评价; 同时还可以发现系统继电保护运行时的隐患, 为继电保护装置的状态检修提供数据支撑, 保障电网的安全。

利用广域信息实时自动地进行电网运行状态实时评价克服了之前全网继电保护分析需要进行人工分析且信息不全、工作量大、分析容易出现错误或者漏分析的难题, 增加了全网继电保护实时分析校验、保护动作评价、故障识别诊断以及优化功能, 大幅度减少了人力成本, 便于操作, 安全可靠, 保障了电网安全。该系统已在国网安徽省电力公司调度中心试运行, 运行结果表明该方案具有良好的可行性。

基于广域信息实时自动地进行电网运行状态实时评价系统已经研制成功,但是还有一系列技术难题需要去攻克,例如:基于广域信息的继电保护系统依赖于电网各个系统的正常运行,系统中时间系统、保信系统、故障录波系统存在异常的时候都会对本系统造成影响,怎么降低其他系统对本系统的影响;在进行拓扑结构生成的时候,如果录波器、保护装置录波命名不规范将增大通道识别的难度,如何更智能获取电网拓扑架构等。这些问题将是下一步研究的重点。

### 参考文献

- [1] 张烈, 吕鹏飞, 张瀚方, 等. 2018 年国家电网公司 220 kV 及以上交流保护装备及运行情况[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 217-222.
- ZHANG Lie, LÜ Pengfei, ZHANG Hanfang, et al. Analysis on protection relaying and its operation conditions of SGCC in 220 kV and above voltage AC system in 2018[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 217-222.
- [2] 田园. 继电保护状态评价及其隐性故障检测方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- TIAN Yuan. Evaluation of relay protection operation state and hidden failure detection[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2017.
- [3] 刘莎. 继电保护状态数据分析及其检修安排[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- LIU Sha. Research on state data mining and evaluation decision model of relay protection[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [4] 李祖明, 孙仲民, 顾乔根, 等. 基于继电保护装置态势感知及辅助决策的智能运维系统[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 142-150.
- LI Zuming, SUN Zhongmin, GU Qiaogen, et al. Smart operation and maintenance system based on situational awareness and assistant decision-making of relay protection devices[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 142-150.
- [5] 刘琨, 黄明辉, 李一泉, 等. 智能变电站继电保护在线运检方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(7): 58-65.
- LIU Kun, HUANG Minghui, LI Yiquan, et al. Research on online operation method for protective relay of smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(7): 58-65.
- [6] 吴迪, 汤小兵, 李鹏, 等. 基于深度神经网络的变电站继电保护装置状态监测技术[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 81-85.
- WU Di, TANG Xiaobing, LI Peng, et al. State monitoring technology of substation relay protection device based on deep neural network[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 81-85.
- [7] 吴闯. 智能变电站技术及其工程应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- WU Chuang. Research on the technology and engineering application of intelligent substation[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [8] 蔡骥然, 郑永康, 周振宇, 等. 智能变电站二次设备状态监测研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 148-154.
- CAI Jiran, ZHENG Yongkang, ZHOU Zhenyu, et al. A survey of research on secondary device condition monitoring in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 148-154.
- [9] 宋福海. 基于信息触发的智能变电站保护功能判定方法研究[J]. 电力工程技术, 2019, 38(6): 99-106.
- SONG Fuhai. Decision method of protection function of intelligent substation based on information triggering[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(6): 99-106.
- [10] 陈海涛, 张学敏, 戴伟康, 等. 基于 GA 优化 SVM 参数与云模型的继电保护装置状态评估方法[J]. 智慧电力, 2020, 48(7): 88-92, 117.
- CHEN Haitao, ZHANG Xuemin, DAI Weikang, et al. State assessment method of relay protection device based on GA optimization SVM parameters and cloud model[J]. Smart Power, 2020, 48(7): 88-92, 117.
- [11] 戴志辉, 刘媛, 邱小强, 等. 基于变权重模糊综合评判法的保护装置状态评价[J]. 电测与仪表, 2021, 58(4): 150-157.
- DAI Zhihui, LIU Yuan, QIU Xiaoqiang, et al. Condition evaluation approach of protective devices based on fuzzy comprehensive evaluation with variable weight[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(4): 150-157.
- [12] 杨国生, 李红志, 郭鹏, 等. 基于模糊综合评估的继电保护装置运行状态感知方法[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(4): 74-83.
- YANG Guosheng, LI Hongzhi, GUO Peng, et al. An operation status perception method for relay protection device based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(4): 74-83.
- [13] 孙辉, 张国庆, 高博, 等. 采用组合赋权法的智能变电站继电保护设备状态模糊综合评估[J]. 电测与仪表, 2020, 57(7): 23-28, 34.

- SUN Hui, ZHANG Guoqing, GAO Bo, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of relay protection equipment status in intelligent substations based on combination weighting method[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(7): 23-28.
- [14] 段嘉璐, 应黎明, 罗先成, 等. 基于诱导有序加权证据推理方法的不完全信息下继电保护系统健康状态评价[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(6): 106-112.
- DUAN Jiajun, YING Liming, LUO Xiancheng, et al. Health condition assessment for relay protection system based on the induced ordered weighted evidential reasoning method under incomplete information[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(6): 106-112.
- [15] 徐长宝, 王玉磊, 赵立进, 等. 基于信息趋势预测和组合赋权的智能变电站继电保护系统状态模糊综合评价[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(1): 162-168.
- XU Changbao, WANG Yulei, ZHAO Lijin, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of intelligent substation relay protection system state based on information trend prediction and combination weighting[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(1): 162-168.
- [16] 郑茂然, 余江, 陈宏山, 等. 基于 KPI 的继电保护运行评价指标体系构建[J]. *山东大学学报: 工学版*, 2017, 47(6): 13-19.
- ZHENG Maoran, YU Jiang, CHEN Hongshan, et al. Construction of index system for relay protection operation evaluation based on KPI[J]. *Journal of Shandong University: Engineering Science*, 2017, 47(6): 13-19.
- [17] 徐长宝, 应黎明, 罗先成, 等. 基于贝叶斯理论的继电保护设备状态评价权重更新方法[J]. *武汉大学学报: 工学版*, 2017, 50(5): 738-744.
- XU Changbao, YING Liming, LUO Xiancheng, et al. Method of weight updating for state evaluation of relay protection equipment based on Bayesian theory[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2017, 50(5): 738-744.
- [18] ZHAO Dongmei, LIANG Weichen, ZHANG Xu. Relay protection condition assessment based on variable weight fuzzy synthetic evaluation[C] // 2014 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech), July 24-26, 2014, Portland, OR, USA: 115-120.
- [19] GUO C, CAI Z, ZHANG Y, et al. Operation condition assessment method and its practical implementation for protection systems[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 51771-51781.
- [20] 张兆云, 叶远波, 栾庆武, 等. 继电保护及相关回路动态监控及故障诊断技术研究与应用[J]. *电网与清洁能源*, 2016, 32(9): 1-5, 49.
- ZHANG Zhaoyun, YE Yuanbo, LUAN Qingwu, et al. Research on the dynamic monitoring and fault diagnosis technology for relay protection and secondary circuits[J]. *Power System and Clean Energy*, 2016, 32(9): 1-5, 49.
- [21] 袁浩, 屈刚, 庄卫金, 等. 电网二次设备状态监测内容探讨[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(12): 100-106.
- YUAN Hao, QU Gang, ZHUANG Weijin, et al. Discussion on condition monitoring contents of secondary equipment in power grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(12): 100-106.
- [22] 张晓东. 基于保信系统的继电保护在线监测评价管理系统的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- ZHANG Xiaodong. Research and application on online relay protection monitoring and evaluation system based on fault information management system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [23] 但路浩, 廖晓春, 刘斌. 基于故障录波主站的实时在线保护评价方法[J]. *电子技术与软件工程*, 2018, 23: 204-205.
- DAN Luhao, LIAO Xiaochun, LIU Bin. Real time online protection evaluation method based on fault recording master station[J]. *Electronic Technology and Software Engineering*, 2018, 23: 204-205.
- [24] DAS S, ANANTHAN S N, SANTOSO S. Relay performance verification using fault event records[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2018, 3(3): 226-235. DOI: 10.1186/s41601-018-0094-0.
- [25] 刘杰荣, 张耀宇, 关家华, 等. 基于量测大数据和数学形态学的配电网故障检测及定位方法研究[J]. *智慧电力*, 2020, 48(1): 97-104.
- LIU Jierong, ZHANG Yaoyu, GUAN Jiahua, et al. Distribution network fault location and detection method based on measurement big data and mathematical morphology[J]. *Smart Power*, 2020, 48(1): 97-104.

收稿日期: 2020-10-29; 修回日期: 2021-04-30

作者简介:

叶远波(1973—), 男, 工学硕士, 高级工程师, 英国工程技术学会注册工程师(IET-ENG), 主要研究方向为电力系统继电保护。E-mail: yeyuanbo888@sohu.com

(编辑 周金梅)