

DOI: 10.7667/PSPC151557

一二次系统融合的电网风险评估实用化计算方法及数据建模研究

黄良¹, 高正浩¹, 曹洪¹, 邓琨², 刘典安², 王星华³

(1. 贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵州 贵阳 550000; 2. 深圳市康拓普信息技术有限公司, 广东 深圳 518034; 3. 广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006)

摘要: 二次系统在电网安全运行中的地位日益重要, 如何合理评价二次系统对一次系统的影响是全面的电网安全风险评估的难点。以保护系统为研究范例, 提出了综合考虑保护功能分解及其与变电站二次元件的拓扑关系模型。依据物理组件与保护功能之间的拓扑关系, 给出了由各组件故障概率构成的不同功能配置的保护系统故障概率计算模型。依据保护的失效以及误动和拒动行为对一次系统运行的不同影响, 构造了一二次系统融合的风险评估体系及评估流程。基于 IEC 61970 CIM 标准进行一二次元件信息模型、计算交互模型和事件后果模型的数据建模, 并阐述了其风险计算流程中的信息来源及关键步骤。

关键词: 风险评估; 二次系统; 功能分解; 拓扑关系; IEC 61970 CIM

Research on calculation model for electric power system risk assessment with consideration of both primary and secondary system

HUANG Liang¹, GAO Zhenghao¹, CAO Hong¹, DENG Kun², LIU Dian'an², WANG Xinghua³

(1. Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Corporation, Guiyang 550000, China;
2. Shenzhen Comtop Information Technology Co., Ltd., Shenzhen 518034, China;
3. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Secondary system has become increasingly important in the safe operation of power systems. How to assess the impact of the secondary system is a difficult problem for power system security and risk assessment. According to the protection relay configuration in substation, the topology model is proposed with the consideration of both function decomposition and associated relationships of secondary devices. Considering topological relationship between secondary devices and protection functions, a protection system failure probability computing model is derived, which is composed of failure probability of each secondary device. Based on different effects on primary system operation of the protection relay failures, mistake action and rejecting action, risk assessment and evaluation processes which integrated primary system and secondary system is constructed. Finally, the model of primary and secondary system based on IEC 61970 CIM is established, including primary and secondary components models, the computational interaction model and the event consequence model. The risk calculation process is described in detail, especially the data sources and key steps.

Key words: risk assessment; secondary system; function decomposition; topology relationship; IEC 61970 CIM

0 引言

电力系统运行风险评估大多考虑的是一次系统的运行风险^[1-4], 在设备的启动与检修^[4-5]及电力市场购售电优化中^[6], 也已经形成较为完善的理论和

应用体系^[7]。但在现有的风险评估体系中, 对于二次系统、特别是保护装置如何影响一次系统的运行风险并未提供可行、实用的评估方法^[2,7]。

目前, 二次系统安全评估大多关注的是设备级可靠性, 主要包括基于可靠性框图^[8-9]、事件树^[10]、故障树^[11-12]及马尔科夫模型^[13-14]等理论的评估算法。其中, 文献[15]提出了基于功能分解的二次系

基金项目: 南方电网公司 2014 年科技项目 (GZ2014-2-0049)

统风险评估, 从功能失效的角度, 分析了二次系统各逻辑功能之间的关系及可靠性计算模型, 具有重要的理论意义。但研究中大多没有关注变电站内二次元件相互间的关联关系, 难以评估二次元件异常的影响范围, 大多是单独定义二次系统本身的价值指标, 没有对二次系统如何影响一次系统的运行展开进一步研究, 因此在实际电网运行中难以应用。

对于电网的运行管理人员来说, 最为关注的是电网正常运行中可能由于一二次告警事件产生的失负荷风险, 因此必须考虑一二次系统的融合风险, 而其中的难点即为二次系统事件所造成的一次系统风险。由于二次系统包含的范围极广, 而且很多二次系统不直接作用于一次系统, 对电网运行风险的影响难以评估。因此, 本文从实用化角度出发, 以保护装置为研究对象, 将二次回路拓扑连接关系融合进风险计算流程和模型中, 并对保护失效和动作行为对一次系统的影响展开分析和研究, 建立了考虑二次系统可靠性和动作行为正确性的一二次系统融合的电力系统运行风险实用评估模型和流程。

为实现电网风险量化评估的在线运行, 本文基于 IEC 61970 CIM 标准, 进一步定义了风险评估系统与一次、二次监控系统及智能报警系统之间数据交互模型, 提供了调度自动化系统一区和三区之间的信息流接口。

1 基于功能及组件分解的二次系统可靠性模型

以保护为例, 装置的各组成部分对不同原理的保护功能影响不同, 需要根据功能和二次元件之间的关联关系出发, 建立装置的失效概率信息模型。

1.1 基本思路

保护装置及系统配置模型包含两个不同层次的分解: 1) 根据保护系统及相关二次元件之间的拓扑连接关系进行分解, 用于表征二次元件异常事件所影响的保护。2) 根据成套保护装置进行功能分解, 将事件的状态评价与保护的功能完整性结合起来。

1.2 保护物理连接关系及功能分解

继电保护装置大致由信息获取与预处理、信息的分析综合与逻辑判断以及执行输出三部分组成。

以纵联保护为例, 纵联保护需采集线路两侧的电流感测的方向阻抗及方向电流信息, 因此其功能分解的可靠性逻辑连接框图如图 1 所示。

从结构上来看, 保护装置的功能实现需要配置直流电源, 接入 CT、PT 及通道通信, 并向跳闸出口装置输出跳闸信号, 因此其可靠性逻辑框图为全部功能模块的串联。

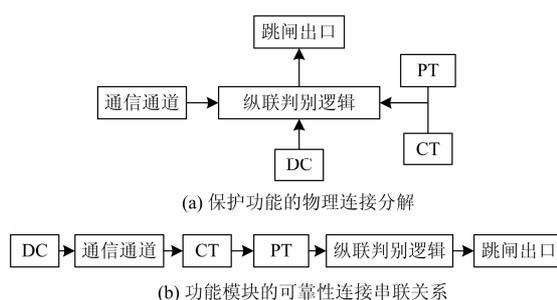


图 1 纵联保护功能分解和可靠性逻辑图

Fig. 1 Decomposition of pilot protection function and logic relationship of reliability

1.3 保护装置的逻辑功能分解

目前超高压电网普遍采用成套微机保护装置, 在一套装置中集成多种保护原理功能, 因此单套保护装置的可靠性框图可分解为串-并联型, 如图 2 所示。

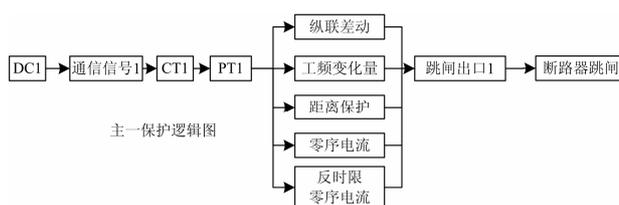


图 2 线路保护装置的逻辑功能构成

Fig. 2 Logic function structure of line protection device

以线路保护为例, 出于系统安稳控制的要求, 220 kV 以上线路故障要求瞬时切除, 因此从满足速断功能要求的角度出发。

a) 纵联保护: 全线速断, 按照 100% 功能完整性考虑;

b) 距离、工频变化量: 按照 70% 保护范围考虑;

c) 零序: 受方式影响较大, 按 15% 考虑。

则整套装置的功能完整实现概率, 可以视为各种功能完整性的并联组合, 即

$$R_k = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - w_{fi} R_{fi}) \quad (1)$$

式中: R_{fi} 为成套保护配置的某原理逻辑功能(纵联、距离等)的有效概率; w_{fi} 为该逻辑功能对保护功能完整性的权重系数, 按保护范围设定。基于概率论基本原理, $1 - w_{fi} R_{fi}$ 代表了该功能的失效概率, R_k 则为该装置整体的可靠性。

1.4 保护配置分解及故障概率计算模型

根据目前国内保护配置规程, 220 kV 以上线路采用双套主保护配置, 分别接入不同的独立直流电源(DC)、电流互感器(CT)、电压互感器(PT)回路, 采用不同的保护原理, 从不同的跳闸出口回路控制

断路器的动作。

因此,结合一次元件的保护配置,可得考虑配置冗余的功能配置及逻辑关系分解如图3所示。

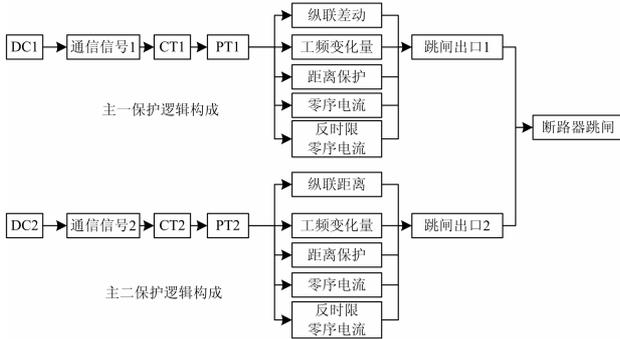


图3 典型双套线路主保护功能分解和可靠性框图

Fig. 3 Function decomposition of double sets of line protection relays and the connection diagram of reliability

从可靠性框图功能分解的逻辑连接上来看,保护内部模块可靠性框图采用串联逻辑关系连接,不同保护原理功能为并联逻辑连接。而两套保护之间采用完全独立的并联逻辑连接,因此,可以得到某套保护的功能整体失效率计算公式为

$$P_k = 1 - (1 - \prod_{j=1}^m P_{k,fj}) \prod_{i=1}^n (1 - P_{ki}) \quad (2)$$

式中: P_k 为第 k 套保护的失效率; P_{ki} 表示的是与保护逻辑功能所串联的各二次设备失效率(指 CT、PT、DC 等环节); $P_{k,fj}$ 表示的是分解后的保护逻辑功能失效率。则 220 kV 线路典型配置(双套主保护)的整体失效率为

$$P = P_1 \times P_2 \quad (3)$$

式中, P_1 和 P_2 分别为主一、主二保护的失效率。

2 考虑保护可靠性的风险评估计算模型

由于二次系统的事件往往没有直接作用于用户,因此如何评价二次系统事件的后果一直难以有普遍认同的标准。从电网所提供的服务角度出发,对用户的持续可靠供电是直接体现电网运行水平的指标,因此本文在评价二次系统对一次系统的影响时,是以二次系统事件所导致的一次系统事件后果作为风险评估的后果值,并利用现有的一次系统风险评估体系完成风险的实用化量化评估。以保护系统为例,本文基于文献[4]中的失负荷比例作为后果值评价标准,并以保护系统的影响来阐述计算模型。

2.1 保护运行对一次系统风险的影响分析

保护对电力系统运行风险的影响,主要来自于保护动作行为的正确性,此外,按照保护运行管理的行业要求,不允许一次元件无保护运行,因此为

了考虑保护功能失效所带来的风险,在计算中计及的保护运行状态及相关概率包括:

- a) 双套保护全停,电网一次元件退出运行概率;
- b) 因保护误动造成一次元件无故障切除的概率;
- c) 一次元件故障,保护拒动造成相邻一次元件无故障退出的概率。

2.2 保护运行对一次系统风险影响的计算模型

2.2.1 保护停运的系统风险

定义保护全部失效概率为 $P_{2,1}$,并定义某套保护失效概率为 $P_{2,1,i}$,计算表达式如式(1)所示,则保护全部失效概率则为式(3)所示。

由于不同电压等级线路保护配置方案不同,而保护失效概率的计算模型与其有关,根据式(2)即可得到不同保护配置时的整个保护系统失效概率。

综上,得到保护停运的系统风险计算公式为

$$R_{2,1} = P_{2,1} \times LE_1 \quad (4)$$

其中: $R_{2,1}$ 为保护停运的系统风险计算结果, LE_1 为由于一次元件失效造成失负荷的后果值,根据元件退出后的电网实时潮流计算获得。

2.2.2 保护误动的系统风险

(1) 概率计算模型

根据不同电压等级的保护配置模式,可以得到由于保护误动导致一侧设备停运的概率 $P_{2,2}$ 为

$$P_{2,2} = 1 - (1 - P_{2,2,1}) \times (1 - P_{2,2,2}) \quad (5)$$

其中, $P_{2,2,i}$ 为一次设备配置的某套保护的误动率,取自历史误动率,可以按照保护型号区分家族误动率。

(2) 风险计算模型

需要注意的是,误动的概念是指保护范围外元件故障或正常运行时,本元件由于保护误动而停运,因此具体风险计算时需考虑一次设备的相邻元件。为简单起见,模型中一般仅考虑相邻一级元件故障(含一次设备所连母线及母线连接元件),则第 k 个相邻元件故障的风险 $R_{2,2,k}$ 的计算公式为

$$R_{2,2,k} = P_{1,k} \times P_{2,2} \times LE_{2,2,k} \quad (6)$$

式中: $P_{1,k}$ 为第 k 个元件的故障概率; $P_{2,2}$ 为本元件的误动概率; $LE_{2,2,k}$ 为元件 k 与本元件同时停运时计算得到的后果值。则总的误动风险为

$$R_{2,2} = \sum_{k=1}^n R_{2,2,k} \quad (7)$$

式中, n 为所有连接元件个数。

2.3 保护拒动的系统风险

(1) 概率计算模型

一次设备故障, 配置的保护拒动, 会由相邻元件保护切除故障。则由于保护拒动导致的一次设备及其相邻元件停运概率 $P_{2,3}$ 的计算表达式为

$$P_{2,3} = P_{2,3,1} \times P_{2,3,2} \quad (8)$$

式中, $P_{2,3,i}$ 为一次设备配置的某套保护的拒动率, 取自历史拒动率, 可根据保护家族设置。

(2) 风险计算模型

需要注意的是, 拒动的概念是指本元件故障, 由于两套保护同时拒动而停运, 因此具体风险计算时需要考虑一次设备的相邻元件, 则保护拒动的风险 $R_{2,3,k}$ 的计算公式为

$$R_{2,3,k} = P_1 \times P_{2,3} \times LE_{2,3} \quad (9)$$

式中: P_1 为一次设备的故障概率; $P_{2,3}$ 为配置的两套保护的拒动概率; $LE_{2,3}$ 为一次设备及相邻元件同时停运时计算得到的后果值。

3 电网一二次系统运行风险量化评估流程

目前, 电网风险评估需考虑正常运行时的基准风险及基于事件的实时风险。其中, 基准风险评估模型和算法主要依据各电力公司的规程规定, 如文献[2]中的要求。而基于事件的实时风险需提取实时事件及告警信息, 主要包括目前的 EMS、一次设备状态监测系统及智能告警系统, 通过告警信息获取系统一二次系统状态的变化及相应的状态评价参数, 从而进行设备的状态评价。

基于上述计算模型, 结合电网当前各实时系统中获得的告警信息, 可以得到电网一二次系统运行风险量化评估流程如图 4 所示。

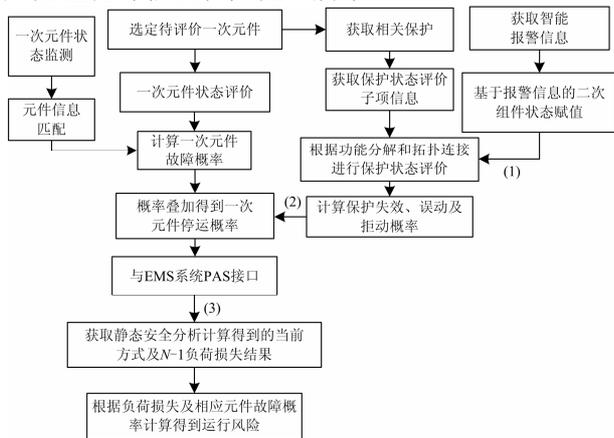


图 4 考虑保护的电力系统风险计算总流程

Fig. 4 Total process of power system risk calculation considering the protection

计算流程中, 其核心在于 3 个步骤。

(1) 从智能报警系统获取报警的二次元件报警信息后, 需要根据功能和拓扑分解模型, 解析获得

受影响的保护, 再对保护进行相应的状态评价。

(2) 根据状态评价得到的保护失效、误动和拒动概率后, 需根据动作行为的不同, 得到受影响的一次元件, 包括所保护元件的相邻元件。

(3) 调用 PAS 系统中的静态安全分析, 得到电网一次元件停运后的切负荷量, 从而评估由于一次元件故障或保护事件造成的事件后果。

4 基于 IEC 61970 的一二次系统数据建模

为了统一与 EMS 系统、智能告警系统以及状态监测系统接口, 基于 IEC 61970 CIM 规范, 建立一二次设备信息模型、设备状态评价信息模型以及事件后果计算过程中与 PAS 应用之间的数据交互模型。

4.1 一二次系统元件信息模型

电网的一次系统元件信息可直接采用 EMS 系统提供的 CIM 模型, 将保护作为一次系统的扩展信息进行建模。以线路信息模型为例, 线路保护信息作为扩展属性进行封装。同时, 一二次系统元件相互间拓扑关联关系通过 ID 号进行关联, 如图 5 所示。

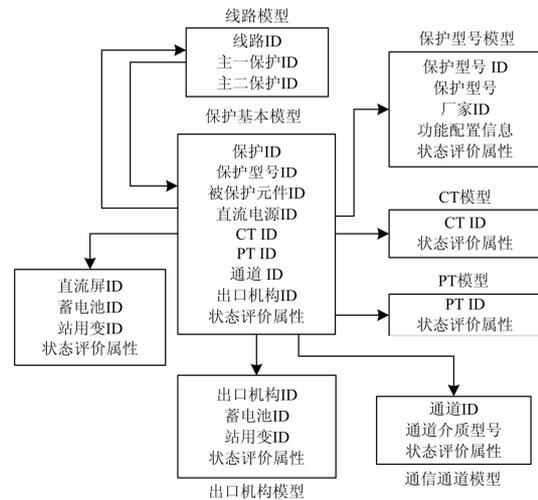


图 5 二次系统信息模型的拓扑关联图

Fig. 5 Topological relation graph of the secondary system information model

具体模型示例如下:

(1) 线路信息模型及其保护扩展属性

```
<cim:ACLLineSegment rdf:ID="ACL-01">
```

```
...
<cimEX:Replays rdf:resource="#RE-01"/>
```

```
<cimEX:Replays rdf:resource="#RE-02"/>
```

```
</cim:ACLLineSegment>
```

其中, #RE-01 表示线路所配置保护的编号。

(2) 保护信息模型

```

<cim:ACLLineRelay rdf:ID="RE-01">
  <cim:Naming.name>RE-01</cim:Naming.name>
  <cim:relaymodel rdf:resource="#RM-01"/>
  <cim:ACLLine rdf:resource="#ACL-01"/>
  <cim:DC rdf:resource="#DC-01"/>
  <cim:BrkCtrl rdf:resource="#BrkCtrl-02"/>
  <cim:CT rdf:resource="#CT-01"/>
  <cim:PT rdf:resource="#PT-01"/>
  <cim:ComC rdf:resource="#COMC-01"/>
</cim:ACLLineRelay >

```

其中，标签 relaymodel 表示保护型号编号，ACLLine 描述对应线路的编号，DC 描述保护所接直流系统编号，CT、PT 及 ComC 分别对应于保护所接的变电站二次系统中 CT、PT 及通道编号。

风险计算系统可通过智能告警系统获得告警信号对应的二次系统对应组件，从而得到告警信息所影响的所有保护，再根据告警信息的内容进行保护状态评价。

4.2 事件后果计算的数据交互模型

目前，为计算以事件损失负荷比例为基础的后果值^[2]，在完成电网一、二次系统状态评价得到相应元件退出或故障的概率后，还需将停运元件封装为事件后果计算请求模型，进行损失负荷计算。

(1) 计算请求模型：向 PAS 子系统提交的计算请求模型需要适应批量的 $N-1$ 计算及特定的 $N-k$ 运行方式计算，其模型定义如下：

```

<cim:Event rdf:ID="EV-1">
  <cim:Naming.name> EV-1</cim:Naming.name>
  <cim:FaultDevices rdf:resource="#Device-01"/>
  <cim:FaultDevices rdf:resource="#Device-02"/>
  <cim:FaultDevices rdf:resource="#Device-03"/>
  <cimEX:Type.value>1</cimEX:Type.value >
</cim:Relay >

```

其中：FaultDevices 描述事件中所包含的停运元件 ID，可能有多个元件；Type 描述计算类型，用以区分是在此停运方式基础上进行批量 $N-1$ 计算还是针对停运方式进行的独立计算；EV-1 则为事件 ID。

(2) 事件后果模型：PAS 针对计算请求模型完成计算后，封装为事件后果模型输出。由于涉及到批量 $N-1$ 计算，因此单个计算请求可能产生多个事件后果的计算结果。模型定义如下：

```

<cim:Result rdf:ID="Rst-1">
  <cim:Naming.name> Rst-1</cim:Naming.name>
  <cim: Event rdf:resource="#EV-1"/>
  <cim: N_1_Device rdf:resource="#Device-01"/>

```

```

<cimEX:Cut.value>70</cimEX:Cut.value >
</cim: Result>

```

其中，Event 描述事件后果的基础计算方式，对应前面停运模型编号，N_1_Device 描述在基本方式基础上轮停的元件，Cut 则为事件造成的切负荷量。

5 算例说明

电网一次系统风险评估已比较成熟，因此算例主要给出如何考虑保护运行对一次系统影响的风险。以某电网保护运行的年度数据统计为例，基础参数设置如表 1 所示。

表 1 电网保护运行年度统计数据

动作次数	误动次数/ 误动率	拒动次数/ 拒动率	异常停运率
20 032	4/0.02%	1/0.005%	0.000 1%

其中，异常停运率是按保护停运小时数计算。根据静态安全分析计算结果，对电网中某线路保护进行风险评估时，计算该线路停运的负荷损失对应后果记分值为 10.4，拒动后的相邻保护跳闸后大面积停电造成负荷损失对应后果记分值为 809.7，经状态评价后线路故障概率按 0.37% 设置，相邻元件为 5 个，相邻元件故障加本线误动的后果平均值为 20.4。

根据图 4 流程，基准风险计算^[2]结果如表 2 所示。

若运行过程中出现保护异常退出信号，则由此造成的实时风险变化如表 3 所示。

从计算结果可以看到，总体来说，电网的运行风险来自于一次元件的故障退出，但是保护的動作特性对此有一定的影响。实际上，考虑到目前国内大部分电网都要求满足 $N-1$ 校验，即使保护误动后，其负荷损失也较低，而保护拒动造成的后果非常严重，但是双重化配置后，保护拒动风险基本降为 0，而一旦一套保护停运，拒动风险将大幅度升高。

表 2 基准风险计算结果表

计算公式及结果	说明
$0.37\% \times 10.4 = 0.038 5$	本线故障风险
$5 \times 0.37\% \times [1 - (1 - 0.02\%)^2] \times 20.4 = 0.000 151$	5 个相邻元件故障后，本线双套保护任一套误动总风险
$0.37\% \times 0.005\% \times 0.005\% \times 809.7$ 约为 0	本线故障后保护拒动风险
$0.000 1\% \times 0.000 1\% \times 10.4$ 约为 0	双套保护停运后线路被迫停运的风险
0.038 65	总风险

表3 实时风险计算表

Table 3 Real-time risk calculation table

计算公式及结果	说明
$0.37\% \times 10.4 = 0.0385$	本线故障风险
$5 \times 0.37\% \times 0.02\% \times 20.4 = 0.000075$	保护误动的风险
$0.37\% \times 0.005\% \times 1 \times 809.7 = 0.00015$	本线故障后保护拒动风险
$0.0001\% \times 1 \times 21.4 = 0.00002$	双套保护停运风险
0.03875	总风险

6 总结

二次系统运行对一次系统运行风险的影响一直难以评估,本文在现有一次系统风险评估应用体系的基础上,着重分析了二次系统中保护系统运行状态及动作行为对一次系统的影响,基于功能分解及二次组件的拓扑联系的风险评估模型,提出了不同功能配置和保护配置的保护系统整体失效、误动和拒动概率的实用化计算模型,从而构造了考虑保护的一二次系统运行的风险评估体系和评估流程,并在此基础上,完成了基于 IEC 61970 CIM 标准的设备信息模型及数据交互模型设计。

二次系统包含的内容非常广泛,本文从实用化实施的角度着重讨论了保护系统对电网运行风险的影响,但其研究思路和计算模型设计方法可以用于其他二次系统的影响分析中。

参考文献

- [1] 冯永青,吴文传,孙宏斌,等. 现代能量控制中心的运行风险评估研究初探[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 73-79.
FENG Yongqing, WU Wenchuan, SUN Hongbin, et al. A preliminary investigation on power system operation risk evaluation in the modern energy control system[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 73-79.
- [2] 郭创新,陆海波,俞斌,等. 电力二次系统安全风险评价研究综述[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 112-118.
GUO Chuangxin, LU Haibo, YU Bin, et al. A survey of research on security risk assessment of secondary system[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 112-118.
- [3] 何宇斌,文云峰,戴赛,等. 基于故障风险指标排序的安全约束最优潮流[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 52-59.
HE Yubin, WEN Yunfeng, DAI Sai, et al. Security-constrained optimal power flow based on risk ranking of contingencies[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 52-59.
- [4] 王海港,胡晓飞,曹凯丽,等. 电网新设备启动方案风险评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 66-71.
WANG Haigang, HU Xiaofei, CAO Kaili, et al. Risk assessment method of schemes for equipping new devices for service in electric power grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 66-71.
- [5] 霍明雷,刘艳,杨林. 计及风险损失的配电设备检修方式选择[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 100-106.
HUO Minglei, LIU Yan, YANG Lin. Maintenance mode selection of power distribution equipment considering the loss of risk[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 100-106.
- [6] 文旭,颜伟,王俊梅,等. 计及节能风险评估的随机规划购电模型[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 193-201.
WEN Xu, YAN Wei, WANG Junmei, et al. A stochastic programming power purchasing model considering energy-saving benefit risk assessment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 193-201.
- [7] 广东电网公司设备状态评价与风险评估技术导则[S]. 广州: 广东电网公司, 2010.
Technical guidelines for the SCTTE evaluation and risk assessment of the equipment of the Guangdong Grid Co[S]. Guangzhou: Guangdong Grid Co, 2010.
- [8] 蒋仁言,左明建. 可靠性模型与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 198-199.
- [9] ZIO E. Reliability engineering: old problems and new challenges[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2009, 94(2): 125-141.
- [10] NORDSTROM L. Assessment of information security levels in power communication systems using evidential reasoning[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(3): 1384-1391.
- [11] 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 relayings[J]. Power System Technology, 2006, 30(13): 14-19, 25.

- [12] 陈少华, 马碧燕, 雷宇, 等. 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 Shaohua, MA Biyan, LEI Yu, et al. Integrative and quantitative calculation of reliability for relay protection system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(15): 111-115.
- [13] 李明, 郭志红, 韩学山, 等. 计及输电元件实时运行态势的电网运行风险决策[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 88-93.
LI Ming, GUO Zhihong, HAN Xueshan, et al. Power grid risk-based decision-making considering real-time operation situation of transmission component[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 88-93.
- [14] 蒋康明, 曾瑛, 邓博仁, 等. 基于业务的电力通信网风险评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 101-106.
JIANG Kangming, ZENG Ying, DENG Boren, et al. Risk evaluation method of electric power communication network based on services[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 101-106.
- [15] 郭创新, 俞斌, 张金江, 等. 基于IEC61850的变电站自动化系统安全风险评估[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 685-694.
GUO Chuangxin, YU Bin, ZHANG Jinjiang, et al. Security risk assessment of the IEC61850-based substation automation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 685-694.

收稿日期: 2015-09-02; 修回日期: 2016-03-07

作者简介:

黄良(1981-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力设备生产管理及相关研究工作; E-mail: gaoyasuo@126.com

高正浩(1979-), 男, 本科, 高级工程师, 从事电网信息化及相关研究工作;

曹洪(1965-), 男, 本科, 高级工程师, 从事电网信息化及相关研究工作。

(编辑 魏小丽)