

# 信息元件可靠性对配电网馈线系统的影响

刘 放, 蔡 晔, 陈 洋, 刘东奇

(长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:**随着信息物理系统(CPS)的深度融合,需考虑信息与物理系统的耦合关系,建立配电网信息物理系统融合构架。首先,根据 IEC 61850 标准构建配电站 CPS 模型,分析信息层与物理层的交互关系;考虑信息元件的延时、误动与拒动等非正常运行情况,枚举、分类及定义由信息元件触发的不同类型的物理层故障传播场景。其次,通过计算故障清除过程中不同物理层故障传播场景的概率,量化评估配电网信息元件对物理层的耦合作用。最后,以某地区 10 kV 配电网馈线系统为例进行故障场景计算分析,计算结果表明:信息元件故障会扩大物理层故障范围,其中以交换机通信链路故障的影响最为显著。

**关键词:**配电网馈线系统;信息物理系统;可靠性;故障传播

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.02.009 中图分类号:TM761 文章编号:1673-9140(2022)02-0072-07

## Influence of cyber components reliability for the feeder system in distribution networks

LIU Fang, CAI Ye, CHEN Yang, LIU Dongqi

(School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** An integration framework of the distribution network cyber-physical system (CPS) is established in this paper. Firstly, the CPS model of the distribution substation is constructed according to the IEC 61850 standard and the interaction between the information layer and the physical layer is analyzed. Secondly, different types of physical layer fault propagation scenarios triggered by information elements are enumerated, classified and defined under the consideration of the abnormal operation conditions such as the delay, malfunction and refusal of cyber elements. By calculating the probability of different physical layer fault propagation scenarios during the fault clearing process, the coupling effect of distribution network information elements on the physical layer is quantitatively evaluated. A 10 kV distribution network feeder system in a certain area is taken as an example to carry out the calculation and analysis of the fault scenario. The failure of cyber elements expand the scope of physical layer failures, among which the communication link failure of the switch has the most significant influence.

**Key words:** distribution network feeder system; cyber-physical system; reliability; fault propagation

随着智能电网建设的不断推进,先进的智能电子设备与信息技术引入电力系统中,传统电力系统

逐渐发展成为深度融合的信息物理系统(cyber-physical system, CPS)<sup>[1-4]</sup>。信息层与物理层的深

度融合加强了物理层节点与信息层节点的耦合关系,在提升电网的可控性和可观性的同时,也给电力系统的可靠性带来潜在的负面影响;信息层的潜在故障将会影响相应的物理层元件,进而影响整个电力信息物理系统的可靠运行<sup>[5-6]</sup>。

电力 CPS 中的信息层与物理层相互作用,当对电力 CPS 可靠性进行分析评估时,需考虑信息系统与物理系统的耦合关系。现有研究大多数将信息系统和物理系统单独进行分析<sup>[7-8]</sup>,少有研究从信息物理融合的角度展开研究。文献[9]考虑了电网 CPS 中信息系统的监视与控制功能并建立功能失效模型,提出表征 2 种功能对电网 CPS 可靠性影响的评估方式;文献[10]研究了通信系统失效时对配电网供电恢复的影响,并提出基于多代理技术的配电网 CPS 可靠性评估方法;文献[11]在实时通信的基础上建立了电力系统与信息系统交互时域仿真模型,从而分析信息异常对电网运行可靠性的影响;文献[12]提出考虑应用层设备应用软件和用层电网管理服务系统软件失效的融合系统可靠性的评估方法;文献[13]基于直流潮流模型建立了物理层与信息层的交互作用模型,分析了不同路由策略下的连锁故障传播情况。以上研究针对不同信息层故障探究了信息层对电力 CPS 可靠性的影响,但缺乏信息层故障对电力 CPS 可靠性影响的统一描述。因此,需要充分考虑信息层对电力 CPS 可靠性的影响。

本文建立配电网 CPS 融合框架,以配电网馈线系统为实例,分析故障清除过程中信息层元件可靠性对物理层故障清除的影响,基于信息层元件工作状态概率量化评估信息层对物理层的耦合作用。

## 1 配电信息物理融合系统分析

### 1.1 配电网信息物理融合系统结构

现代配电网是典型的信息物理融合系统。根据所连接的信息设备及其功能的差异,可将配电网 CPS 分为 3 层:配电网主干层、接入层、终端层<sup>[14]</sup>。在此基础上构建配电网 CPS 架构,如图 1 所示。主干层包含配电主站系统、数据采集与监控(supervisory control and data acquisition, SCADA)服务器、管理信息系统(management information system, MIS)服务器等,并采用光纤同步数字体系(synchronous digital hierarchy, SDH)光通信技术连接配电主站及各个配电子站。接入层采用以太网无源光网络(ethernet passive optical network, EPON)技术连接配电子站及配电终端,实现配电终端与配电子站的实时通信,EPON 由光线路终端(OPTICAL LINE TERMINAL, OLT)、光网络单元(optical network unit, ONU)等元件构成。终端层包含配电网馈线、线路断路器、分段开关等电力元件,以及馈线智能远动终端(feeder remote terminal unit,

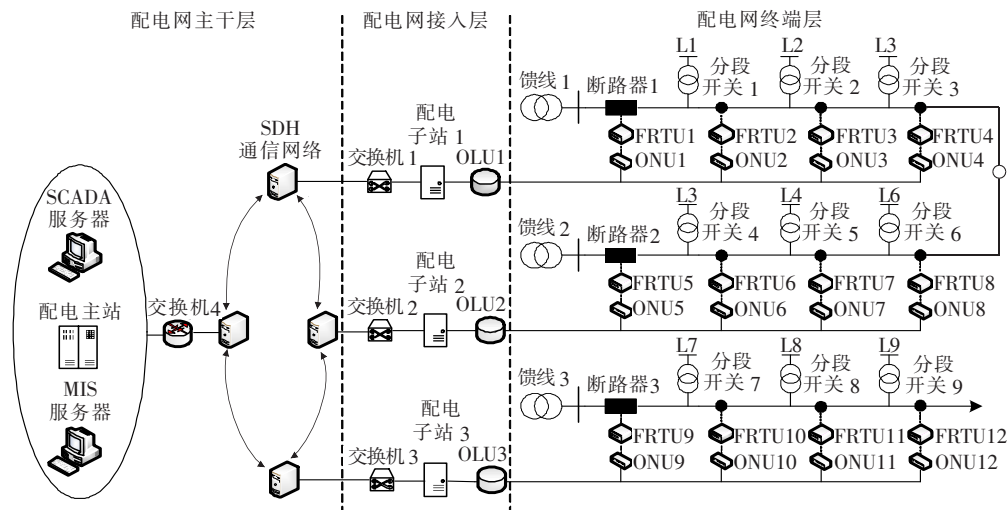


图 1 配电网 CPS 架构

Figure 1 Framework of cyber-physical system in distribution

FRTU)等智能配电终端。

配电子站是配电自动化系统的关键环节和信息枢纽,连接配电网的主干层和终端层,与配电主站和FRTU实时通信,实现所管辖区域的配电网的故障诊断、隔离及恢复处理。本文以配电子站馈线系统

为研究对象,探讨信息层元件对物理层的影响。为了更加详细地分析配电子站的信息系统结构,根据IEC 61850标准所提出的建模方法构建配电子站的信息物理系统模型,如图2所示,将配电子站分成子站层、终端层和过程层<sup>[15]</sup>。

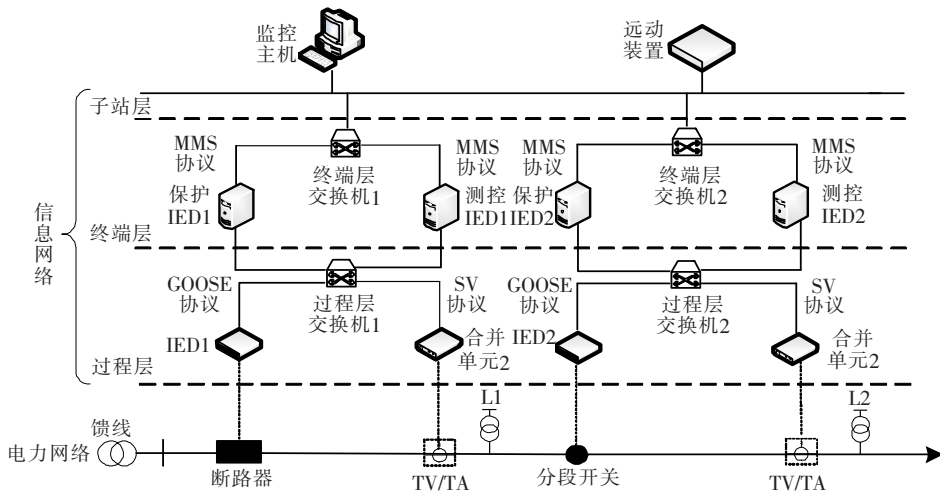


图2 配电子站CPS模型

Figure 2 Cyber-physical system model of slave distribution station

配电子站CPS信息层元件主要为交换机通信链路、合并单元以及线路保护智能电子设备(intelligent electronic device, IED)等。交换机通信链路在信息层间接收、发送数字信号,在通讯过程中占据核心地位。子站层与终端层通过制造报文规范(manufacturing message specification, MMS)协议交换数据(如保护定值等),在终端层内通过面向通用对象的变电站事件(generic object oriented substation event, GOOSE)协议交换数据(如闭锁控制信息等);终端层和过程层之间通过采样值(SV)协议传输合并单元中电压互感器(TV)和电流互感器(TA)的实时采样数据,同时通过GOOSE协议传输控制数据(如跳闸信号)。

配电子站物理层元件主要包括馈线、具有短路电流分断能力的断路器、分段开关与联络开关等,开关设备作为信息层与物理层连接的元件,起控制配电终端的作用,是信息层与物理层的耦合点。在配电子站CPS中,信息设备通常配置不间断电源,短时间内物理故障导致的供电中断不影响信息系统的运行。然而,信息系统的故障会对物理层造成影响,按照影响性质的不同可分为直接和间接影响。直接影响是指信息元件或功能故障直接导致对应的物理

元件故障,如配电网中的分布式电源信息中断时相当于电源退出运行。间接影响是指信息系统故障不会直接导致物理系统元件失效,但会影响物理系统的运行和控制,如配电网故障恢复控制过程中信息系统发生故障会影响故障的恢复,导致故障范围扩大。

## 1.2 故障清除过程中的信息物理融合关系

当前,中性点不接地与经消弧线圈接地的小电流接地方式是中低压等级配电网中性点的主要接地方式,单相接地是配电网最常见的故障。当小电流接地方式下的配电网发生单相接地故障时,故障相对地电压降低,非故障两相的相电压升高,但线电压却依然对称,因而不影响对用户的连续供电,但长期运行可能会引发安全事故。因此,当发生单相接地故障时,必须及时找到故障线路予以切除。此外,在一些城市中也采用中性点经小电阻接地方式,当小电阻接地方式下的配电网发生单相接地故障时,可以快速找到故障线路并及时切除。因此,在小电流接地方式的配电网中,信息元件的可靠性会对物理层的间接影响更为显著。

在小电流接地方式下的配电网中,当物理层发生单相接地故障时,电压互感器或电流互感器检测

到故障信息后将其发送给合并单元,合并单元将模拟信号转化为数字信号,通过交换机通信链路发送到配电子站。配电子站汇总故障信息后通过 SDH 通信网络发送给配电主站,主站确定故障区域后启动故障定位、故障隔离,产生跳闸信号发送到相应断路器,从而限制物理层故障的传播范围。本文将限制故障传播的过程定义为故障清除。

在故障清除过程中,当与故障线路相关联的信息元件或功能失效时,断路器可能不会及时动作,无法及时隔离故障,进而扩大物理层的故障范围。配电网馈线系统的故障清除过程反映了信息层对物理层的耦合作用。本文考虑信息层元件的可靠性,分析馈线系统的故障清除过程,以概率的形式表征此种耦合作用。

## 2 故障清除过程中信息物理融合关系量化方法

### 2.1 故障传播类型

为简化分析计算,对配电网馈线系统故障清除过程进行假设:①配电网中的所有元件使用独立统计数据,同种元件、对称结构之间的可靠性参数完全相同;②对不同位置的物理层故障进行独立分析,由于故障发生的概率较小,不考虑在不同位置同时发生故障的情形。

在故障清除过程中,当物理元件发生故障时,由于各信息层元件工作状态的不同,最终在物理层可能会出现不同的故障传播范围,如图 3 所示。

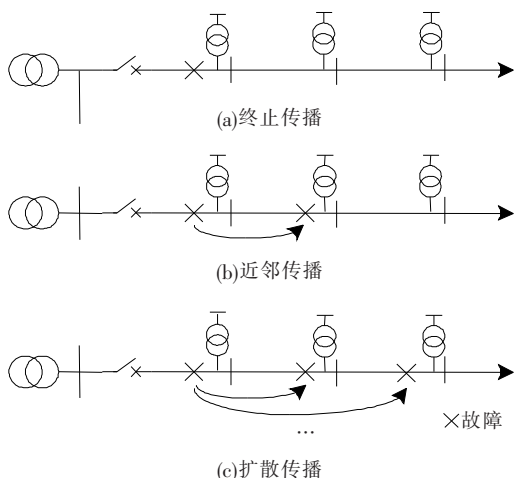


图 3 故障传播范围

Figure 3 Fault propagation range

本文将故障传播范围定义为 3 类:

1) 终止传播,即信息层元件正常工作,故障被及时清除,限制在初始故障位置(图 3(a));

2) 近邻传播,即与故障元件关联的某个信息元件处于非正常工作状态,导致故障传播至其邻域,其他信息元件正常工作将故障限制在该局部范围内(图 3(b));

3) 扩散传播,即信息层的交换机通信链路发生故障,配电网通讯系统瘫痪,采集的故障信息无法及时传递,故障元件未被切断,导致故障逐渐扩散到整个系统(图 3(c))。

### 2.2 信息层对故障传播影响的量化

由故障传播类型可知,信息层元件的工作状态影响故障清除过程中的故障传播范围。由此,对于任意物理元件,计算与其相关联的信息元件的工作状态概率,即可得到物理层不同故障传播场景的概率,以此表征信息层元件对物理层故障的影响。

将信息层元件工作可靠性建模为二状态模型,即设定为 0 和 1,其中 0 表示信息层元件处于正常工作状态,1 表示信息层元件处于非正常工作状态(故障、通信延时阻塞以及误动作等)。信息层元件工作状态过程变化如图 4 所示,其中  $\lambda$  表示单个信息元件的故障速率, $\mu$  表示单个信息元件的修复速率。

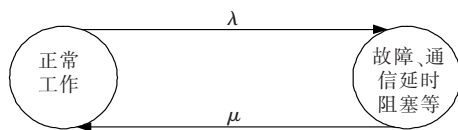


图 4 信息层元件状态

Figure 4 States of cyber layer component

根据图 4 可知,信息层独立元件正常、非正常工作的概率分别为

$$p = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (1)$$

$$p' = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (2)$$

考虑到电磁干扰的影响,信息层的通信将会产生延迟,如果交换机通信链路上的信息延迟超过阈值,GOOSE 数据包将被丢弃,断路器最终不会动作。定义  $\eta$  为交换机的通信延迟概率,则交换机通信链路正常、非正常工作的概率分别为

$$p = \frac{\mu}{\lambda + \mu} (1 - \eta) \quad (3)$$

$$p' = 1 - p \quad (4)$$

本文采用故障清除的可靠性算法流程如图5所示,具体计算流程如下:

- 1)由信息层元件可靠性数据,根据式(1)~(4)计算信息层元件工作状态的概率;
- 2)触发物理层初始故障;
- 3)整合与物理层故障元件相关联的信息层元件;
- 4)由信息层元件工作状态确定物理层故障传播类型,并枚举故障传播场景;
- 5)计算故障场景下相关信息元件工作状态的概率乘积,表征各故障场景的概率。

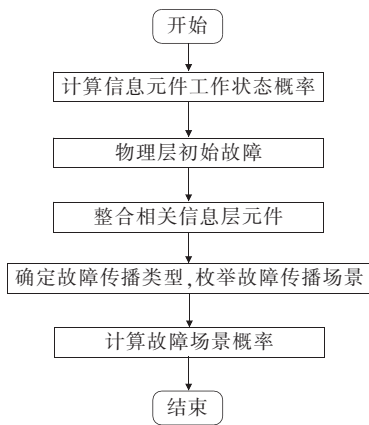


图5 算法流程

Figure 5 Algorithm flowchart

### 3 算例分析

本文以某地区 10 kV 配电网馈线系统作为实际算例,量化分析信息层元件可靠性对物理层故障清除过程的影响。馈线系统结构如图6所示。

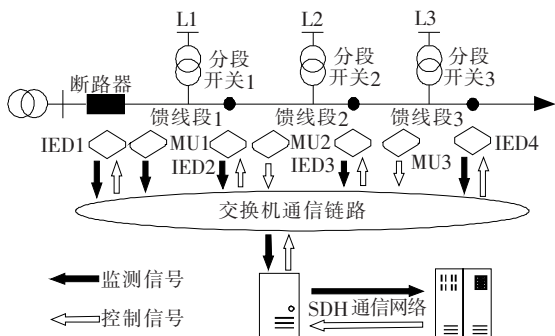


图6 配电网馈线系统

Figure 6 Feeder system of distribution network

信息层元件可靠性数据如表1所示;根据表1中的信息层元件可靠性数据,取  $\eta = 0.3\%$ ,由式(1)~(4)计算得到各信息层元件正常、非正常工作概率,如表2所示。考虑通信延迟,交换机通信链路的正常工作概率较其他信息层元件低。

表1 信息层元件可靠性数据

元件	平均故障间隔时间/a	$\lambda/a^{-1}$	平均修复时间/h	$\mu/h^{-1}$
合并单元	150	0.006 67	6.999 98	1 251.432
断路器/分段开关	120	0.008 33	6.999 98	1 251.432
线路保护 IED	50	0.020 00	6.999 98	1 251.432
交换机通信链路	100	0.010 00	6.999 98	1 251.432

表2 单个信息层元件正常、非正常工作概率

Table 2 Probability of normal and abnormal operation of a single cyber layer element

元件	$p$	$p'$
合并单元	0.999 994 671	0.000 005 329
断路器/分段开关	0.999 993 344	0.000 006 656
线路保护 IED	0.999 984 018	0.000 015 982
交换机通信链路	0.996 992 033	0.003 007 967

#### 3.1 馈线段1故障清除量化分析

与图6中馈线段1相关联的元件有分段开关1、合并单元1、线路保护 IED 及交换机通信链路。在馈线段1的故障清除过程中,存在3个故障场景:

1)相关信息元件均处于正常工作状态,故障信息传递给配电子站,配电子站经汇总后发送到配电主站,配电主站下发控制命令,分段开关1动作切断馈线段1,使得故障被限制在馈线段1;

2)交换机通信链路处于非正常工作状态,故障信息不能及时传递,馈线系统中所有断路器与分段开关均不能正常动作,故障传播到整个馈线系统;

3)分段开关1、合并单元1和线路保护 IED 中的一个或者多个元件处于非正常工作状态,分段开关1不能正常动作,其他信息元件均正常工作,分段开关2断开,故障被限制在馈线段1、2。

分别计算不同故障场景下各信息层独立元件工作状态的概率,整合计算得到馈线段1故障场景概率,如表3所示。

表 3 馈线段 1 故障场景概率

Table 3 Fault scenario probability of feeder segment 1

场景	故障范围	发生概率
1	馈线段 1	0.996 964 151
2	整个系统	0.003 007 967
3	馈线段 1、2	0.000 027 882

### 3.2 馈线段 2 故障清除量化分析

与图 6 馈线段 2 相关联的元件有分段开关 1 和 2、合并单元 2 和 3、线路保护 IED 及交换机通信链路。在馈线段 2 故障清除过程中,存在 4 个故障场景:

1) 相关信息元件正常工作,馈线段 2 及时被分段开关 1、2 切断,故障被限制在馈线段 2;

2) 交换机通信链路处于非正常工作状态,故障信息不能及时发送传递,馈线系统中所有断路器与分段开关均不能正常动作,故障传播到整个馈线系统;

3) 分段开关 1 或 2 与其对应的合并单元中的一个元件或均出现故障,导致分段开关 1 或 2 不能切断馈线段 2,则故障传播至临近馈线段;如分段开关 2 与其对应合并单元中的一个元件处于非正常工作状态或均处于非正常工作状态,故障传播至馈线段 3,其余元件均正常工作,则故障范围为馈线段 2、3;

4) 场景 3 出现在 2 个分段开关和对应合并单元上,或者线路保护 IED 出现故障,则分段开关 1、2 不能正常动作,其他元件均正常工作,故障范围为馈线段 1、2、3。

分别计算以上不同故障场景下各信息层独立元件的工作状态的概率,整合计算得到馈线段 2 故障场景概率,如表 4 所示。

馈线系统中剩余馈线段的故障清除过程与以上分析思路相同,可根据相关信息元件状态的概率计

表 4 馈线段 2 故障场景概率

Table 4 Fault scenario probability of feeder segment 2

场景	故障范围	发生概率
1	馈线段 2	0.996 941 202
2	整个系统	0.003 007 967
3	馈线段 1、2	0.000 013 143
	馈线段 2、3	0.000 013 143
4	馈线段 1、2、3	0.000 024 545

算出对应故障场景的概率。一般情况下,信息层元件可靠性较高,在故障局部传播过程中,不同故障范围的发生概率随着故障范围内物理元件数量的增加而减小。如在馈线段 2 的故障清除过程中,故障被限制在馈线段 2 的概率为 0.996 941 202,而传播至一个临近元件的概率计算结果为 0.000 013 143,差异十分显著。然而故障传播到全部临近元件时却不符这一规律,这是由于交换机通信链路的非正常工作增加了这一故障场景的概率。

## 4 结语

本文构建了配电网信息物理融合系统框架,分析了信息层元件可靠性对配电网物理层故障清除过程的影响,基于信息层元件工作状态的概率得到不同物理层故障传播场景的概率,量化分析了信息层对物理层的耦合作用,以 10 kV 配电网馈线系统为实例进行分析计算,得出结论如下:

1) 相较物理元件,信息元件的可靠性较高,引起连锁故障的可能性较小,故障发生的概率也会随着故障范围内物理元件数量的增多而减小;

2) 在信息层元件中,交换机通信链路在配电网通讯系统中扮演核心角色,其可靠性对配电网馈线系统影响最为显著。

### 参考文献:

- [1] XIN S J, GUO Q L, SUN H B, et al. Cyber-physical modeling and cyber-contingency assessment of hierarchical control systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 6(5): 2375-2385.
- [2] 杨坚, 杜亮, 喻谦, 等. 电力物联网接入层网络流量的建模与分析[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(4): 60-66.  
YANG Jian, DU Liang, YU Qian, et al. Modelling and analysis of access layer network traffic of power internet of things[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(4): 60-66.
- [3] 丁茂生, 孙维佳, 蔡星浦, 等. 电力系统极端事件的风险评估与防范[J]. 中国电力, 2020, 53(1): 32-39+65.  
DING Maosheng, SUN Weijia, CAI Xingpu, et al. Risk assessment and prevention of extreme events in power systems[J]. Electric Power, 2020, 53(1): 32-39+65.

- [4] SRIVASTAVA A, MORRIS T, ERNSTER T, et al. Modeling cyber-physical vulnerability of the smart grid with incomplete information[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(1): 235-244.
- [5] 陈德成. 基于攻击图的电网信息物理融合系统风险定量评估[J]. 电测与仪表, 2020, 57(2): 62-68.  
CHEN Decheng. Quantitative risk assessment for cyber physical power system based on attack graph[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(2): 62-68.
- [6] HUANG Z, WANG C, STOJIMENOVIC M, et al. Characterization of cascading failures in interdependent cyber-physical systems[J]. IEEE Transactions on Computers, 2015, 64(8): 2158-2168.
- [7] 唐俊熙, 王梓耀, 张俊潇, 等. 基于文化蚁群算法的高可靠多电源配电网规划模型[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(7): 99-107.  
TANG Junxi, WANG Ziyao, ZHANG Junxiao, et al. High reliability multi-power distribution network planning model based on memetic ant colony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(7): 99-107.
- [8] SRIDHAR S, HAHN A, GOVINDARASU M. Cyber-physical system security for the electric power grid[J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(1): 210-224.
- [9] 郭嘉, 韩宇奇, 郭创新, 等. 考虑监视与控制功能的电网信息物理系统可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2123-2130.  
GUO Jia, HAN Yuqi, GUO Chuangxin, et al. Reliability evaluation of power grid information physical system considering monitoring and control function[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2123-2130.
- [10] 王梓博, 穆云飞, 王宇飞, 等. 考虑多代理供电恢复系统通信失效的配电网 CPS 风险评估[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(17): 51-58.  
WANG Zibo, MU Yunfei, WANG Yufei, et al. CPS risk assessment of distribution network considering communication failure of multi-agent power supply recovery system[J]. Automation of Electric Power System, 2016, 40(17): 51-58.
- [11] HOPKINSON K, WANG X, GIOVANINI R, et al. EPOCHS: a platform for agent-based electric power and communication simulation built from commercial off-the-shelf components[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 548-558.
- [12] 韩宇奇, 郭嘉, 郭创新, 等. 考虑软件失效的信息物理融合电力系统智能变电站安全风险评估[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1500-1508.  
HAN Yuqi, GUO Jia, GUO Chuangxin, et al. Security risk assessment of intelligent substation in power system based on information physical fusion considering software failure[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1500-1508.
- [13] 孙立强, 李鹏, 刘宣廷, 等. 考虑连锁故障的覆冰灾害下输电线路脆弱性分析模型[J]. 高压电器, 2022, 58(1): 155-161+169.  
SUN Liqiang, LI Peng, LIU Xuanting, et al. Analysis model of transmission line under ice coating disaster considering cascading fault[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(1): 155-161+169.
- [14] 胡迅, 彭道刚, 张浩, 等. 基于 IEC 61850 的智能馈线自动化通信技术研究[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(4): 108-114.  
HU Xun, PENG Daogang, ZHANG Hao, et al. Research on intelligent feeder automation communication technology based on IEC 61850[J]. Journal of Power Science and Technology, 2017, 32(4): 108-114.
- [15] 李桐, 王刚, 刘扬, 等. 配电网智能终端信息安全风险分析[J]. 智慧电力, 2020, 48(9): 118-122.  
LI Tong, WANG Gang, LIU Yang, et al. Information security risk analysis of intelligent terminal in distribution network[J]. Smart Power, 2020, 48(9): 118-122.