

基于信息物理接口矩阵的 IEC61850 变电站 自动化系统可靠性分析

李 勇¹, 陈 雨¹, 蔡 晔², 曹一家¹, 文 明³

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 长沙理工大学 湖南省清洁能源与智能电网协同创新中心, 湖南 长沙 410014;

3. 国网湖南电力公司经济技术研究院, 湖南 长沙 410004)

摘要:随着电力系统通信控制网络和物理设备网络交互的加深,基于信息物理融合发展的变电站自动化系统的综合可靠性问题亟待研究。以 IEC61850 实际变电站自动化系统为例,基于变电站主接线建立其信息物理融合框架,在该框架下将信息层保护元件对物理层主要设备的影响进行分类,提出用信息物理接口矩阵表征故障传播类别的概率。考虑信息层的影响,建立变电站自动化系统可靠性分析方法,以实际变电站为算例进行了可靠性计算分析,验证了所提方法的正确性。结合算例进一步分析可靠性指标,结果表明信息层故障将明显增大系统的故障损失,而对系统连锁故障风险的影响相对较小。针对信息传输延时进行灵敏度分析,结果表明负荷点期望缺供电力的变化幅度随过程总线传输延迟率的增加而显著提升。

关键词:信息物理系统;IEC61850;变电站自动化系统;蒙特卡罗方法;信息物理接口矩阵;可靠性分析

中图分类号:TM 761

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.01.013

0 引言

随着智能电网建设的不断推进,控制、通信与信息技术在电力系统中的应用范围不断扩大,传统电力系统将逐渐发展为深度融合的复杂信息物理系统^[1-4]。传统的物理层设备元件的可靠性分析方法将发生改变,信息层故障将显著影响物理设备,信息层的潜在故障将会在通信的数据交换过程中影响相应的物理层元件^[5-6]。IEC61850 标准建立了变电站自动化系统信息层的统一通信规约,增加了不同厂商通信设备之间的互操作性以及兼容性^[7-8]。在该标准下,变电站自动化系统的信息物理融合趋势较为显著。因此,研究适用于信息物理融合趋势的变电站自动化系统的可靠性分析方法,对未来电力信息物理系统的连锁故障建模以及安全分析有着重要的意义。

在对信息物理融合系统进行可靠性分析评估时,不能片面地简单考虑一个系统,须考虑信息系统和物理系统之间的耦合关系。而现有与电力系统可靠性相关的研究大多将一次系统和信息层分开进行分析^[9-13],从信息物理融合系统的视角进行建模分

析的研究为数不多。文献[14]研究了考虑元件修复率的全数字保护变电站可靠性模型,探讨了元件的平均故障时间以及平均首次故障时间在是否考虑修复率条件下的差异性。文献[15]将信息系统对电力一次系统的影响形式分为直接作用和间接作用,提出断路器和变压器的可靠性计算方法。文献[16]从复杂网络视角出发,基于直流潮流模型建立了电力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情况。文献[17]考虑了应用层设备应用软件和系统管理服务平台软件失效时信息物理融合系统的安全风险评估。但上述研究只针对特定的信息层故障,而电力信息物理系统信息层的故障范围广泛,统一描述信息层对物理层故障影响的研究鲜有报道。

本文尝试构建信息物理接口矩阵描述这一故障,并在该基础上进行整个系统的可靠性研究。以 IEC61850 变电站自动化系统为具体实例,建立其信息物理融合框架,计算具体接口矩阵元素值,并利用蒙特卡罗方法进行可靠性仿真。分析结果表明,信息物理接口矩阵能较好地表征信息层故障对物理设备的影响,为未来电力信息物理融合系统的安全可靠性分析提供了一种新的思路。

1 变电站自动化系统信息物理融合分析

1.1 基于 IEC61850 标准的变电站系统信息物理融合框架

随着信息技术的发展及智能电网的建设,变电站自动化系统已经具备信息物理融合系统的架构,实际变电站自动化系统的简化模型如图 1 所示,

收稿日期:2018-07-26;修回日期:2018-11-16

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(51607011);湖南省重点研发计划项目(2018GK2031);湖南省教育厅优秀青年项目(17B006);长沙市杰出青年创新项目(KQ1707003)

Project supported by the Young Fund of the National Natural Science Foundation of China(51607011), the Key Research and Development Program of Hunan Province(2018GK2031), the Young Fund of Scientific Research Foundation of Hunan Education Department(17B006) and the Excellent Innovation Youth Program of Changsha(KQ1707003)

IEC61850 标准在主要物理层的基础上建立信息通信的统一规约,在该规约下主要考虑的物理层元件为两侧电压输电线、母线、断路器以及主变压器。

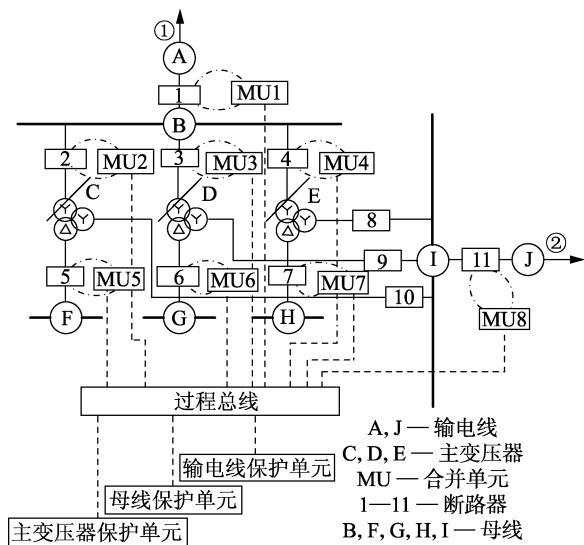


图1 变电站自动化系统的简化模型

Fig.1 Simplified model of substation automation system

信息层分为站控层、间隔层以及过程层。过程总线作为通信总线在过程层和间隔层之间起发送、接收数字信号的作用,建立起保护单元、合并单元与断路器之间的通信桥梁^[18]。

断路器作为物理层与信息层之间的连接元件,起控制终端的作用,是物理层和信息层之间的具体耦合点。IEC61850 标准下的信息层元件主要为过程总线、合并单元以及物理元件保护单元。保护单元分为输电线路保护单元、变压器保护单元以及母线保护单元。

1.2 变电站信息物理融合关系

变电站自动化系统的典型信息物理融合情况为:一个物理元件将被合并单元监测,受相应断路器和保护单元控制,并最终通过过程总线进行信息的相互传递。

当物理元件发生故障时,电压互感器或电流互感器监测到故障信息,将模拟信号送往合并单元,合并单元对信息进行数字化处理后将其送往相应物理元件的保护单元,保护单元通过保护算法产生跳闸信号,最后由过程总线将信号送往断路器进行相应动作,从而将故障范围限定在本物理元件。定义上述限定故障的过程为故障清除。

记单个信息层元件的正常工作状态为0,非正常工作状态为1,在故障清除过程中,当上述与物理元件相融合的信息层元件变为非正常工作状态时,可能使得相关断路器和保护设备不动作,进而无法及时切除故障,使得物理层的故障范围扩大。对应的信息层元件的各状态用0-1表示成序列,如图2所示,每个序列产生相应的故障物理元件,即物理层

的故障范围,称系统中1个确定的故障物理元件的集合为1个物理故障场景(以下简称为场景)。

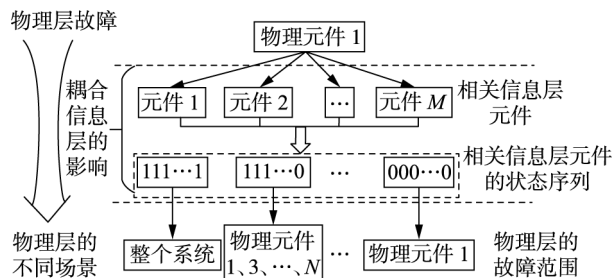


图2 信息层元件故障及对应的场景

Fig.2 Faults and corresponding scenarios of cyber components

变电站的故障清除过程体现了信息层对物理层的耦合影响,1个或多个信息层元件的状态序列对应着某一具体场景的发生,本文以概率的形式表征这种交互机理。

2 耦合关系量化方法

2.1 故障传播类型

对变电站自动化系统的初始故障清除过程做如下假设:

a. 变电站系统中的元件使用独立统计数据,发生在不同位置的故障事件是独立分析的,因发生的概率比较小,不考虑同时在不同位置发生故障的可能性;

b. 如果过程总线上的信息延迟超过阈值,则主保护的断路器将不能跳闸。

故障清除过程可能因信息元件故障导致最终出现不同的传播范围,本文将故障传播范围分为以下的类别。

a. 终止传播:信息层元件未发生故障,或者信息层故障的发生使系统处理故障的及时性受到轻微影响,但整体对故障的清除无影响,则故障终止在初始物理设备。

b. 邻近传播:某个信息层元件故障进而导致故障扩散到发生点的邻域,但其他信息层元件正常工作将故障限定在该局部范围内。

c. 全局传播:信息层的通信核心受到损害,整个变电站系统的通信瘫痪,使得故障拓展到整个变电站,过程总线在通信过程中扮演该核心角色。

2.2 信息物理接口矩阵

物理层的故障范围对应着相应独立信息元件概率的乘积,信息层各状态序列的出现概率可依据条件概率公式计算得到,其矩阵形式则为本文所提信息物理接口矩阵,它是信息元件对故障传播的概率表征,囊括了信息物理系统中信息层延时、中断、错位以及元件故障等驱动事件,以期表征现有电力设备与信息系统的交互机制,其具体表达式为:

$$C_{\text{CPM}} = \begin{bmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & \cdots & p_{1,n} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & \cdots & p_{2,n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{m,1} & p_{m,2} & \cdots & p_{m,n} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $p_{i,j}$ 为在第 i 个物理元件的故障清除过程中造成具体故障场景 j 发生的概率; m 为物理元件数; n 为故障场景数。每一个场景对应相关信息元件的 0-1 序列, 也对应不同的物理故障范围, 如图 1 中与接口矩阵相对应的元件为 33 个, 则其 1 个状态序列为“10000000001100000000111000000000”。具体场景见第 3 节中的故障清除分析。接口矩阵中每行元素的和为 1。

3 变电站接口矩阵与元件级可靠性分析

3.1 信息层独立元件可靠性数据

将信息层元件的可靠性建模成二状态模型, 与物理元件设备正常工作与非正常工作相似, 设定信息元件状态为二进制数值 0 和 1, 其中 0 表示元件处于正常工作状态, 1 表示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), 其过程变化如图 3 所示。图中, λ 为单个元件的故障速率, μ 为单个元件的修复速率, 具体数据由表 1 给定。

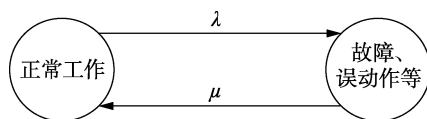


图 3 信息层元件状态图

Fig.3 States of cyber component

表 1 信息层独立元件的可靠性数据

Table 1 Reliability data for individual cyber components

元件	平均故障 间隔时间/a	λ/a^{-1}	平均修复 时间/h	μ/a^{-1}
合并单元	150	0.006 67	7.999 98	1 095.002
断路器	100	0.01	7.999 98	1 095.002
保护单元	50	0.02	7.999 98	1 095.002
过程总线	100	0.01	7.999 98	1 095.002

则信息层中单个元件处于正常工作状态的发生概率 p 和处于非正常工作状态的发生概率 p' 分别为:

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

$$p' = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (3)$$

由于受高压环境下的电磁干扰, 信息通信将产生一定的延迟, GOOSE 数据包可能由于这一延迟而被丢弃^[19], 采用概率 η 衡量过程总线的延迟传递过程, 其处于正常工作状态的发生概率 p 和处于非正常工作状态的发生概率 p' 分别为:

$$p = \frac{\mu}{\lambda + \mu} (1 - \eta) \quad (4)$$

$$p' = 1 - p \quad (5)$$

其中, $\eta = 0.3\%$ 。

计算各信息元件独立的处于正常工作状态的发生概率和处于非正常工作状态的发生概率, 结果如表 2 所示。由表 2 可见, 过程总线处于正常工作状态的发生概率因式 (4) 较其他元件低。

表 2 单个独立信息元件处于正常工作状态
与非正常工作状态的概率

Table 2 Probability of individual cyber component
in normal and abnormal operation states

元件	p	p'
保护单元	0.999 981 735	0.000 018 265
合并单元	0.999 993 912	0.000 006 088
断路器	0.999 990 868	0.000 009 132
过程总线	0.996 990 895	0.003 009 105

针对输电线、母线和主变压器这 3 种主要的物理设备, 本文以图 1 为例给出不同耦合关系情景下的具体分析。

3.2 输电线故障清除接口矩阵

与输电线相关联的元件有相关的断路器、输电线保护智能电子装置 IED (Intelligent Electronic Device) 以及过程总线, 以输电线 A 为例, 与其相关的信息层元件为断路器 1、合并单元 1、输电线保护单元以及过程总线。在输电线 A 的故障清除过程中, 存在以下 3 种场景:

a. 所有信息元件正常工作, 则故障信息能被及时传递, 断路器能及时切除故障, 故障范围得以限制在输电线 A;

b. 过程总线处于非正常工作状态, 则所有故障信息不能被及时接收、发送, 变电站中的所有断路器不能正常工作, 所以故障将波及整个变电站系统;

c. 断路器 1、合并单元 1 和输电线保护单元中的 1 个或多个元件处于非正常工作状态, 则断路器 1 不会正常动作, 故障波及母线 B, 但断路器 2—4 正常动作将故障范围限定在输电线 A 和母线 B。

输电线 A 的接口矩阵计算结果见表 3。对输电线 J 的分析与 A 类似, 接口矩阵计算结果见附录中表 A1。

表 3 输电线 A 接口矩阵的计算结果

Table 3 Calculative results of interface matrix
for transmission line A

场景	故障范围	发生概率
a	输电线 A	0.996 957 511
b	整个系统	0.000 033 384
c	输电线 A、母线 B	0.003 009 105

3.3 母线故障清除接口矩阵

与图 1 所示变电站中的母线 B 相关的元件有合

并单元 1—4、相应的断路器以及母线保护单元和过程总线。其故障清除过程中可能出现的场景分析如下。

a. 所有信息元件正常工作,则故障能及时地被相应的断路器切除,故障范围限定在母线 B。

b. 过程总线处于非正常工作状态,则故障范围为整个变电站系统。

c. 如果某个断路器和对应合并单元中的 1 个元件出现故障或者均出现故障,则故障被局部传播至 2 个物理设备。如断路器 1 和合并单元 1 中的 1 个元件处于非正常工作状态或者均处于非正常工作状态,其余元件正常工作,则断路器 1 不会动作,断路器 2—4 正常动作,则故障范围为输电线 A 和母线 B。

d. 若上述场景 c 出现在某 2 个断路器和对应的合并单元上,则故障局部传播至 3 个物理设备。如合并单元 1 和断路器 1 中的 1 个元件处于非正常工作状态或两者均处于非正常工作状态,以及合并单元 3 和断路器 3 中的 1 个元件处于非正常工作状态或均处于非正常工作状态,其余元件正常工作,则断路器 1 和 3 不能正常动作,断路器 2 和 4 正常动作,故障范围为输电线 A、母线 B 和主变压器 D。

e. 若上述场景 c 出现在某 3 个断路器和对应的合并单元上,则故障局部传播至 4 个物理设备。如合并单元 1 和断路器 1 中的 1 个元件处于非正常工作状态或均处于非正常工作状态,合并单元 2 和断路器 2 中的 1 个元件处于非正常工作状态或均处于非正常工作状态,以及合并单元 3 和断路器 3 中的 1 个元件处于非正常工作状态或均处于非正常工作状态,其余元件正常工作,则断路器 1—3 不能正常动作,断路器 4 正常动作,故障范围为输电线 A、母线 B、主变压器 C 和主变压器 D。

f. 若上述场景 c 出现在全部 4 个断路器和对应合并单元上,或者母线保护单元发生故障,则故障局部传播至对应的 5 个元件。

母线 B 的接口矩阵计算结果见表 4。母线 I、F、G 和 H 的接口矩阵的计算结果分别见附录中表 A2—A5。

3.4 主变压器故障清除接口矩阵

与主变压器 C 相关的元件为断路器 3 和 4、合并单元 3 和 4、变压器保护 IED 以及过程总线。在主变压器 C 的故障清除过程中可能出现的故障范围如下:场景 a,故障范围限定在主变压器 C;场景 b,故障范围为整个变电站系统;场景 c,故障范围为母线 B 和主变压器 C,或者主变压器 C 和母线 F,或者主变压器 C 和母线 I;场景 d,故障范围为母线 B、主变压器 C 和母线 F,或者母线 B、主变压器 C 和母线 I,或者主变压器 C、母线 I 和母线 F;场景 e,故障范围为母线 B、主变压器 C、母线 F 和母线 I。

表 4 母线 B 接口矩阵的计算结果

Table 4 Calculative results of interface matrix for bus B

场景	故障范围	发生概率
a	母线 B	0.996 911 991
b	整个系统	0.003 009 105
c	输电线 A、母线 B	0.000 015 173
	母线 B、主变压器 C	0.000 015 173
	母线 B、主变压器 D	0.000 015 173
	母线 B、主变压器 E	0.000 015 173
d	输电线 A、母线 B、主变压器 C	$1.385\ 643\ 96^{-10}$
	输电线 A、母线 B、主变压器 D	$1.385\ 643\ 96^{-10}$
	输电线 A、母线 B、主变压器 E	$1.385\ 643\ 96^{-10}$
	母线 B、主变压器 C、主变压器 D	$1.385\ 643\ 96^{-10}$
	母线 B、主变压器 C、主变压器 E	$1.385\ 643\ 96^{-10}$
	母线 B、主变压器 D、主变压器 E	$1.385\ 643\ 96^{-10}$
e	输电线 A、母线 B、主变压器 C、主变压器 D	$3.514\ 923\ 26^{-15}$
	输电线 A、母线 B、主变压器 C、主变压器 E	$3.514\ 923\ 26^{-15}$
	输电线 A、母线 B、主变压器 D、主变压器 E	$3.514\ 923\ 26^{-15}$
	母线 B、主变压器 C、主变压器 D、主变压器 E	$3.514\ 923\ 26^{-15}$
f	输电线 A、母线 B、主变压器 C、主变压器 D、主变压器 E	$1.821\ 059\ 29^{-5}$

主变压器 C 的具体分析情况与母线故障清除的分析思路相同,主变压器 C 的接口矩阵计算结果见表 5。主变压器 D、E 的接口矩阵计算结果分别见附录中表 A6、表 A7。

表 5 主变压器 C 接口矩阵的计算结果

Table 5 Calculative results of interface matrix for main transformer C

场景	故障范围	发生概率
a	主变压器 C	0.996 927 164
b	整个系统	0.003 009 105
c	母线 B、主变压器 C	$1.517\ 340\ 70^{-5}$
	主变压器 C、母线 F	$1.517\ 340\ 70^{-5}$
	主变压器 C、母线 I	$1.517\ 340\ 70^{-5}$
d	母线 B、主变压器 C、母线 F	$2.309\ 419\ 25^{-10}$
	母线 B、主变压器 C、母线 I	$2.309\ 419\ 25^{-10}$
	主变压器 C、母线 I、母线 F	$2.309\ 419\ 25^{-10}$
e	母线 B、主变压器 C、母线 F、母线 I	$1.821\ 003\ 87^{-5}$

由表 3—5 中的结果可知,针对某具体物理元件,接口矩阵的维度与该物理元件关联信息层元件的数量呈指数关系,关联信息层元件的增加势必会造成接口矩阵元素计算量的急剧增加,母线 B 处甚至出现了 17 种连锁故障类型。

一般而言,在故障局部传播过程中,故障的发生概率随着故障范围内物理元件数量的增加而急剧减小。如在主变压器的故障清除过程中,故障传播至 2 个元件的概率为 $1.517\ 340\ 70^{-5}$,而传播至 3 个元件的概率计算结果为 $2.309\ 419\ 25^{-10}$,差异十分显著。需要注意的是,故障局部传播到全部局部元件时却不符合这一规律,这是因为过程总线的故障增

加了这一故障传播的概率。

4 可靠性分析

4.1 可靠性指标

负荷削减概率 PLC (Probability of Load Curtailments) 的计算公式为:

$$U_k = \frac{\sum_{i=1}^{N_k} T_{dnik}}{\sum_{i=1}^{N_s} (T_{upik} + T_{dnik})} \quad (6)$$

其中, N_s 为仿真次数; T_{dnik} 为负荷 k 处于第 i 次削减负荷状态的持续时间; T_{upik} 为负荷 k 处于第 i 次正常状态的持续时间。

期望缺供电力 EDNS (Expected Demand Not Supplied) 的计算公式为:

$$EDNS_k = \sum_{i=1}^{N_k} P_{ik} L_k \quad (7)$$

其中, $EDNS_k$ 为负荷 k 的期望缺供电力, 单位为 $MW \cdot h$; P_{ik} 为负荷 k 在考察期间时段 i 的故障概率; L_k 为负荷 k 在考察期间的平均负荷, 单位为 MW ; N_k 为考察期间的时段数。

4.2 仿真步骤

本文在传统的基于蒙特卡罗算法的变电站可靠性分析的基础上, 考虑信息物理接口矩阵, 提出可靠性仿真步骤如下。

a. 初始化所有元件。

b. 仿真产生物理层元件的状态: 对于每个物理层元件, 产生随机数来进行状态转换, 其中, 在对处于当前仿真 t 时刻状态的每个物理元件的持续时间进行采样时, 给定的分布为指数分布, 即状态持续时间的采样值为:

$$T_i = -\frac{1}{\sigma_i} \ln u_i \quad (8)$$

其中, u_i 为第 i 个物理元件在区间 $[0, 1]$ 内服从均匀随机分布的值。由 t 时刻状态计算每个物理元件 i 在 $t+1$ 时刻状态是否发生变化的概率, 如果物理元件 i 在 t 时刻为正常工作状态, 则由式 (8) 计算物理元件 i 在 $t+1$ 时刻由正常工作状态转变为非正常工作状态的概率, 此时 σ_i 为物理元件 i 的故障概率; 如果物理元件 i 在 t 时刻为非正常工作状态, 则由式 (8) 计算物理元件 i 在 $t+1$ 时刻由非正常工作状态转变为正常工作状态的概率, 此时 σ_i 为物理元件 i 转变为正常工作状态的修复率。遍历所有物理元件在 $t+1$ 时刻的状态发生概率 $\{T_i\}$, 则可以找到一个状态发生变化概率最小的元件 j , 即 $\min \{T_i\}$ 对应的元件 j 。物理元件 j 的状态在 $t+1$ 时刻将发生改变。更新并且记录全系统中所有元件的状态以及仿真总

时间。

c. 根据信息物理接口矩阵判断是否发生连锁故障, 若发生故障, 则循环判断直至故障不再传播或扩散到整个系统。判断是否发生连锁故障的方法如下: 依据计算所得的信息物理接口矩阵 C_{CPM} 判断元件 j 的状态, 在区间 $[0, 1]$ 内产生随机数 ω , 如果 ω 满足式 (9) 所示条件, 则表明物理元件 j 的第 s 个场景发生。

$$\sum_{y=1}^{s-1} p_{j,y} < \omega < \sum_{y=1}^s p_{j,y} \quad (9)$$

d. 计算并更新可靠性指标。

e. 重复步骤 b—d 直至方差系数小于允许值。方差系数的计算式为:

$$\beta = \frac{\sqrt{V(F)/N_s}}{E(F)} \quad (10)$$

其中, β 为方差系数; $V(F)$ 为测试函数的方差; $E(F)$ 为函数的期望值; N_s 为仿真年数。

5 算例分析

以图 1 所示的变电站为算例, 旨在验证考虑接口矩阵的可靠性分析方法的正确性, 尚不考虑元件的计划维修停运, 将变电站元件建模为三状态模型^[20]。变电站为 220 kV/121 kV/38.5 kV 降压变电站, 负荷点 ① 和负荷点 ② 的年均负荷为 100 MW。系统的主设备可靠性数据如表 6 所示^[21]。系统基于 IEC61850 标准融入信息层, 融入规则与图 1 相同。根据第 3 节建立整个变电站主要物理元件的信息物理接口矩阵, 将其按场景序列排列, 整理得到整个系统的信息物理接口矩阵 C_{CPM} (10 行 76 列), 如表 7 所示。

表 6 主设备的可靠性数据

元件	主动失效率/(次·a ⁻¹)	平均修复时间/h
母线	0.002	13.0
变压器	0.025	43.1
输电线	0.020	10.0

表 7 系统的信息物理接口矩阵

元件	场景 1	场景 2	...	场景 35
A	0.996 957 511	0.000 033 384	...	0
B	0	0	...	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
J	0	0	...	0.003 009 105

考虑负荷点 ① 和负荷点 ② 以及整个系统的可靠性。是否考虑信息层影响的负荷削减概率见表 8 (表中 Δ_{PLC} 为负荷削减概率提升幅度)。由表 8 可知, 当考虑信息层影响时, 基于信息物理接口矩阵计算所得的负荷削减概率略有提升, 提升幅度在负荷

点①处达到了 4.43%; 所得结果验证了本文所提方法的正确性,也验证了信息层对系统可靠性的影响,但考虑信息层影响对负荷削减概率的提升幅度较传统方法不明显,特别是对整个变电站系统而言。这是因为信息层元件的可靠性较高,发生连锁故障的风险处于偏低状态。

表 8 负荷削减概率比较

Table 8 Comparison of PLC

负荷点	负荷削减概率		$\Delta_{PLC}/\%$
	不考虑信息层影响	考虑信息层影响	
①	$3.784\ 666\ 67^{-5}$	$3.952\ 333\ 33^{-5}$	4.43
②	$3.813\ 000\ 00^{-5}$	$3.924\ 000\ 00^{-5}$	2.91
整个系统	$7.597\ 666\ 67^{-5}$	$7.734\ 333\ 33^{-5}$	1.80

考虑和不考虑信息层影响时的期望缺供电力见表 9(表中 Δ_{EDNS} 为期望缺供电力提升幅度)。表 9 所示结果表明信息层元件对期望缺供电力值有显著的影响。当考虑信息层影响时,负荷点①处的期望缺供电力较传统方法提高了 11.93%; 整个变电站系统的期望缺供电力较传统方法提高了 7.41%。

表 9 期望缺供电力比较

Table 9 Comparison of EDNS

负荷点	期望缺供电力/(kW·h ⁻¹)		$\Delta_{EDNS}/\%$
	不考虑信息层影响	考虑信息层影响	
①	3.785	4.236	11.93
②	3.813	4.208	10.36
整个系统	7.598	8.160	7.41

为了进一步探求信息元件对系统可靠性的具体影响,本文选取了全局元件过程总线和保护单元,对比分析本文所提方法计算其正常工作状态概率变化下的可靠性指标较传统方法的变化比例 Δ_{EDNS1} , 结果如图 4 所示。由图 4 可看出,随着元件正常工作状态概率的下降,负荷点①的 Δ_{EDNS1} 都提升,在高正常工作状态概率[0.997, 1]区间内, Δ_{EDNS1} 对过程总线和保护单元的正常工作状态概率的敏感度都较高; 在较低的正常工作状态概率区间内, Δ_{EDNS1} 随着过程总线的正常工作状态概率的降低而大幅度提升,当正常工作状态概率为 0.991 时,本文所提方法计算所得期望缺供电力较传统方法提高值高达 35%; 但是 Δ_{EDNS1} 随保护单元的正常工作状态概率改变而变

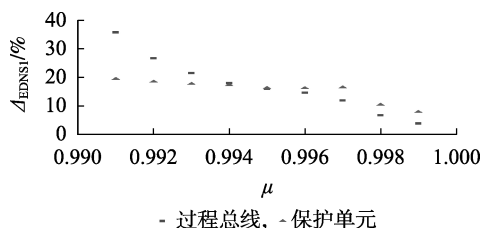
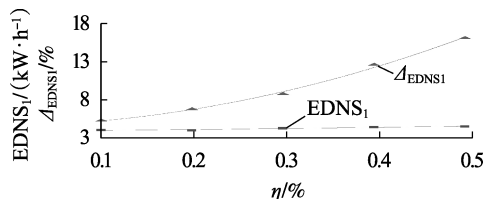


图 4 过程总线和保护单元的正常工作状态概率对可靠性指标的影响

Fig.4 Influence of normal operation state probability of process bus and protection unit on reliability index

化的程度不大。由此可见,变电站的可靠工作依赖于信息元件的高可靠性。而作为通信核心的过程总线对保证系统的安全至关重要,其发生故障是变电站连锁故障的一个重要缘由。

特别地,对信息网络的传输性能进行灵敏度分析,主要分析过程总线的收发数据包延迟率的灵敏度。图 5 展示了 0.1%~0.5% 区间内不同延迟率下期望缺供电力及其变化幅度的变化情况。结果表明期望缺供电力随着延迟率 η 的提升呈线性提升,但其增长幅度不大,期望缺供电力的变化率较为明显。延迟率的提升主要是减小了过程总线的正常工作状态概率,这与图 4 所示的结果相一致。

图 5 不同 η 下的期望缺供电力及其变化幅度Fig.5 $EDNS_1$ and Δ_{EDNS_1} under different values of η

6 结论

本文旨在针对未来电力信息物理系统,探讨以信息物理接口矩阵为基础的可靠性分析方法。以 IEC61850 变电站自动化系统为例,构建了信息物理融合系统的框架,分析了在输电线、母线以及变压器的故障清除过程中的潜在连锁故障类型以及接口矩阵值,考虑信息层的影响分析变电站系统的可靠性指标,所得主要结论如下。

a. 相较于物理设备,信息层元件本身具有较高的可靠性,因此其诱发连锁故障的可能性较小,对变电站停电概率的影响不大,但对停电负荷值的影响显著,有必要研究考虑信息层影响的可靠性分析方法。

b. 在整个信息层元件中,作为通信核心的过程总线的可靠性对系统整体可靠性的作用显著;信息传输的时延概率虽然较低,但仍是造成电力信息物理融合变电站的可靠性指标相较于传统变电站的可靠性指标变化的一个主因。

虽然本文是以 IEC61850 变电站的具体实例进行了可靠性分析,但所构建的信息物理接口矩阵能表征信息层对物理层的耦合影响,为系统的可靠性分析提供了简化模型,是对电力信息物理系统安全可靠性的有益尝试。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 马钊,周孝信,尚宇炜,等. 未来配电系统形态及发展趋势[J]. 中国电机工程学报,2015,35(6):1289-1298.

- MA Zhao, ZHOU Xiaoxin, SHANG Yuwei, et al. Form and development trend of future distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1289-1298.
- [2] 郭庆来, 辛蜀骏, 孙宏斌, 等. 电力系统信息物理融合建模与综合安全评估: 驱动力与研究构想[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1481-1489.
- GUO Qinglai, XIN Shujun, SUN Hongbin, et al. Power system cyber-physical modeling and security assessment: motivation and challenges[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1481-1489.
- [3] 李培恺, 曹勇, 辛焕海, 等. 配电网信息物理系统协同控制架构探讨[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(12): 2-7, 15.
- LI Peikai, CAO Yong, XIN Huanhai, et al. Discussion on cooperative control architecture of cyber-physical distribution network system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12): 2-7, 15.
- [4] 张籍, 杜治, 谢瀚阳, 等. 基于不确定随机系统的新一代智能变电站可靠性分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(9): 210-217.
- ZHANG Ji, DU Zhi, XIE Hanyang, et al. NGSS reliability analysis based on uncertain stochastic system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(9): 210-217.
- [5] KANABAR M G, SIDHU T S. Performance of IEC 61850-9-2 process bus and corrective measure for digital relaying[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 725-735.
- [6] 任雁铭, 操丰梅. IEC61850 新动向和新应用[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(2): 1-6.
- REN Yanming, CAO Fengmei. New development and new application of IEC61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(2): 1-6.
- [7] IEC. Communication networks and systems in substations: IEC61850[S]. [S.l.]: IEC, 2003.
- [8] CHENG X Y, LEE W J, PAN X H. Modernizing substation automation systems: adopting IEC standard 61850 for modeling and communication[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2017, 23(1): 42-49.
- [9] SINGH C, SPRINTSON A. Reliability assurance of cyber-physical power systems[C]//IEEE PES General Meeting. Providence, RI, USA: IEEE, 2010: 1-6.
- [10] 蒋卓臻, 刘俊勇, 向月. 配电网信息物理系统可靠性评估关键技术探讨[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(12): 30-42.
- JIANG Zhuozhen, LIU Junyong, XIANG Yue. Key technologies for reliability assessment of distribution network cyber physical system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12): 30-42.
- [11] 郝雨辰, 吴在军, 窦晓波, 等. 基于 IEC61850 的多代理系统在微电网运行控制中的应用[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6): 139-146.
- HAO Yuchen, WU Zaijun, DOU Xiaobo, et al. Application of IEC61850-based multi-agent system in microgrid operation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 139-146.
- [12] 陈晨, 刘俊勇, 刘友波, 等. 一种考虑变电站内部的电力系统可靠性分析[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(2): 103-109.
- CHEN Chen, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. Power system reliability analysis considering substation interior[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2): 103-109.
- [13] 高磊, 宋亮亮, 杨毅, 等. 基于多参量模型的智能变电站二次设备状态评估方法及应用[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(10): 210-215.
- GAO Lei, SONG Liangliang, YANG Yi, et al. Secondary equipment condition evaluation based on multi-parameter model for smart substations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10): 210-215.
- [14] JIANG K, SINGH C. Reliability modeling of all-digital protection systems including impact of repair[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2): 579-587.
- [15] 俞斌, 郭创新, 王越, 等. 考虑信息系统作用的电力系统可靠性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 7-13.
- YU Bin, GUO Chuangxin, WANG Yue, et al. Research on the reliability of the power system considering impacts of the information system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(7): 7-13.
- [16] 曹一家, 张宇栋, 包哲静. 电力系统和通信网络交互影响下的连锁故障分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 7-11.
- CAO Yijia, ZHANG Yudong, BAO Zhejing. Analysis of cascading failures under interactions between power grid and communication network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 7-11.
- [17] 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. Intelligent substation security risk assessment of cyber physical power systems incorporating software failures[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1500-1508.
- [18] KANABAR M G, SIDHU T S. Reliability and availability analysis of IEC61850 based substation communication architectures[C]//2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Calgary, AB, Canada: IEEE, 2009: 1-8.
- [19] CHEN J, THORP J S, DOBSON I. Cascading dynamics and mitigation assessment in power system disturbances via a hidden failure model[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2005, 27(4): 318-326.
- [20] 李文沅. 电力系统风险评估: 模型、方法和应用[M]. 周国启, 卢继平, 胡小正, 等, 译. 北京: 科学出版社, 2006: 11-24.
- [21] BILLINTON R, KUMAR S, CHOWDHURY N, et al. A reliability test system for educational purposes-basic data[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 4(3): 1238-1244.

作者简介:



李勇

李勇(1982—),男,河南信阳人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电网信息物理系统、电力系统优化与控制、电能质量分析与控制(E-mail: yongli@hnu.edu.cn);

陈雨(1993—),男,湖南长沙人,硕士研究生,主要研究方向为电网信息物理系统连锁故障建模及其安全可靠分析(E-mail: yuchenyu@hnu.edu.cn);

蔡晔(1988—),女,湖南益阳人,讲师,博士,主要研究方向为电网信息物理系统、电力系统分析与控制(E-mail: Caiye@csust.edu.cn);

曹一家(1969—),男,湖南益阳人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为复杂系统理论、智能电网、电力系统优化与控制(E-mail: yjcao@hnu.cn);

文 明(1981—),男,湖北荆州人,高级工程师,博士,研究方向为电网规划、新能源优化运行、电力市场预测(E-mail: firelight_81107@126.com)。

(下转第98页 continued on page 98)

统安全稳定评估与控制、智能技术在电力系统中的应用等；

马世英(1969—),男,山东安丘人,教授级高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统仿真分析、源网协调控制技术；

唐晓骏(1979—),男,河南南阳人,教授级高级工程师,硕士,研究方向为电力系统分析、稳定和控制等；

谢 岩(1990—),男,山西运城人,工程师,硕士,研究方向为电力系统分析、运行与控制；

李少岩(1989—),男,河北保定人,讲师,博士,主要研究方向为电力系统安全防御和系统恢复(E-mail: shaoyan.li@ncepu.edu.cn)。

Restoration subsystem division based on integer linear programming and comprehensive evaluation of dividing schemes

ZHOU Guangqi¹, GU Xueping¹, MA Shiyang², TANG Xiaojun², XIE Yan², LI Shaoyan¹

(1. School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. State Key Laboratory of Power Grid Safety and Energy Conservation, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: If there are several black-start units in the system after blackout, a reasonable subsystem division scheme will help sub-systems be restored in parallel and shorten the restoration time. An integer linear programming model for subsystem division is established, which takes the minimize number of tie lines between sub-systems as its objective. The “cut” constraint is constructed and the high-efficiency solver CPLEX is adopted to solve the model several times for obtaining abundant schemes. The evaluation index set of subsystem division schemes is set up, and the variation coefficient method is used to comprehensively evaluate and sort the schemes. The concept of swing node is introduced to pre-process the model for reducing the size of decision space. The subsystem division results of New England 10-machine 39-bus system and IEEE 118-bus power system verify the effectiveness of the proposed model and method.

Key words: power system restoration; restoration subsystem division; integer linear programming; swing node; electric power systems

(上接第 90 页 continued from page 90)

Reliability analysis of IEC61850 substation automation system based on cyber-physical interface matrix

LI Yong¹, CHEN Yu¹, CAI Ye², CAO Yijia¹, WEN Ming³

(1. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Hunan Province Collaborative Innovation Center of Clean Energy and Smart Grid, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410014, China;

3. Economic Research Institute of State Grid Hunan Electric Power Company, Changsha 410004, China)

Abstract: With the deepening interaction between communication control network and physical device network in power system, the comprehensive reliability of the cyber-physical-based substation automation system needs to be studied urgently. The actual IEC61850 substation automation system is taken as an example, whose cyber-physical integrated framework is established based on the main wiring of substation. The influences of the cyber protection components on the main physical equipment are classified, and the cyber-physical interface matrix is proposed to represent the probabilities of fault propagation categories. The reliability analysis method of substation automation system is put forward considering the influence of cyber layer. And the reliability of an actual substation is calculated to verify the correctness of the proposed method. The reliability indexes are further analyzed with an example, and results show that the fault in cyber layer will obviously increase the power loss of the whole system, while it has relatively smaller influence on the risk of cascading fault. Finally, the sensitivity analysis of information transmission delay is implemented, which shows that the changing magnitude of expected demand not supplied increases significantly with the increase of the transmission delay rate of process bus.

Key words: cyber-physical system; IEC61850; substation automation system; Monte Carlo method; cyber-physical interface matrix; reliability analysis

附 录

表 A1 输电线 J 接口矩阵的计算结果

Table A1 Calculative results of interface matrix for transmission line J

场景	故障范围	发生概率
a	输电线 J	0.996957511
b	整个系统	0.000033384
c	输电线 J 和母线 I	0.003009105

表 A2 母线 I 接口矩阵的计算结果

Table A2 Calculative results of interface matrix for bus I

场景	故障范围	发生概率
a	母线 I	0.996911991
b	整个系统	0.003009105
c	母线 I、输电线 J	0.000015173
	母线 I、主变压器 C	0.000015173
	母线 I、主变压器 D	0.000015173
	母线 I、主变压器 E	0.000015173
d	母线 I、输电线 J、主变压器 C	1.38564396^{-10}
	母线 I、输电线 J、主变压器 D	1.38564396^{-10}
	母线 I、输电线 J、主变压器 E	1.38564396^{-10}
	母线 I、主变压器 C、主变压器 D	1.38564396^{-10}
	母线 I、主变压器 C、主变压器 E	1.38564396^{-10}
	母线 I、主变压器 D、主变压器 E	1.38564396^{-10}
e	母线 I、输电线 J、主变压器 C、主变压器 D	3.51492326^{-15}
	母线 I、输电线 J、主变压器 C、主变压器 E	3.51492326^{-15}
	母线 I、输电线 J、主变压器 D、主变压器 E	3.51492326^{-15}
	母线 I、主变压器 C、主变压器 D、主变压器 E	3.51492326^{-15}
f	输电线 A、母线 B、主变压器 C、主变压器 D、主变压器 E	1.82105929^{-5}

表 A3 母线 F 接口矩阵的计算结果

Table A3 Calculative results of interface matrix for bus F

场景	故障范围	发生概率
a	母线 F	0.996957511
b	整个系统	0.000033384
c	母线 F、主变压器 C	0.003009105

表 A4 母线 G 接口矩阵的计算结果

Table A4 Calculative results of interface matrix for bus G

场景	故障范围	发生概率
a	母线 G	0.996957511
b	整个系统	0.000033384
c	母线 G 和主变压器 D	0.003009105

表 A5 母线 H 接口矩阵的计算结果

Table A5 Calculative results of interface matrix for bus H

场景	故障范围	发生概率
a	母线 H	0.996957511
b	整个系统	0.000033384
c	母线 H 和主变压器 E	0.003009105

表 A6 主变压器 D 接口矩阵的计算结果

Table A6 Calculative results of interface matrix for main transformer D

场景	故障范围	发生概率
a	主变压器 D	0.996927164
b	整个系统	0.003009105
c	母线 B、主变压器 D	1.51734070^{-5}
	主变压器 D、母线 G	1.51734070^{-5}
	主变压器 D、母线 I	1.51734070^{-5}
d	母线 B、主变压器 D、母线 G	2.30941925^{-10}
	母线 B、主变压器 D、母线 I	2.30941925^{-10}
	主变压器 D、母线 I、母线 G	2.30941925^{-10}
e	母线 B、主变压器 D、母线 F、母线 I	1.82100387^{-5}

表 A7 主变压器 E 接口矩阵的计算结果

Table A7 Calculative results of interface matrix for main transformer E

场景	故障范围	发生概率
a	主变压器 E	0.996927164
b	整个系统	0.003009105
c	母线 B、主变压器 E	1.51734070^{-5}
	主变压器 E、母线 H	1.51734070^{-5}
	主变压器 E、母线 I	1.51734070^{-5}
d	母线 B、主变压器 E、母线 F	2.30941925^{-10}
	母线 B、主变压器 E、母线 I	2.30941925^{-10}
	主变压器 E、母线 I、母线 H	2.30941925^{-10}
e	母线 B、主变压器 E、母线 H、母线 I	1.82100387^{-5}