

计及能量流与信息流的电力信息物理系统关键节点辨识

李希喆¹, 辛培哲², 江 璟²

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102200)

摘要: 随着信息通信技术在电力系统中的广泛应用, 传统电网由仅分析物理系统或信息空间本身向新型电力系统下电力信息物理系统 (cyber-physical power system, CPPS) 方向转变。文中基于复杂网络理论, 通过模拟连锁故障下能量流与信息流的交互作用, 提出了一种关键电力节点与信息节点的辨识方法。首先根据 CPPS 中能量流与信息流之间相互耦合关系, 结合电力网潮流与信息网时延变化相互之间发生的连锁故障的演变过程, 构建了 CPPS 一二次系统相互依存网络模型; 然后在此基础上建立电力网和信息网重点节点指标并辨识关键信息—物理重要节点; 最后, 利用算例仿真法对模型和方法的有效性进行检验, 判断该方法在实践中是否可行。

关键词: 电力信息物理系统; 能量流; 信息流; 连锁故障; 关键节点辨识

Key Node Identification of Power Cyber-physical System Considering Energy Flow and Information Flow

LI Xizhe¹, XIN Peizhe², JIANG Jing²

(1. College of Electrical and New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 2. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102200, China)

Abstract: With the wide application of information and communication technology in power systems, the traditional power grid is transformed from only analyzing the physical system or the information space itself to the cyber-physical power system (CPPS) under the new power system. Based on the complex network theory, this paper proposes an identification method of key power nodes and information nodes by simulating the interaction between energy flow and information flow under cascading failures. Firstly, according to the coupling relationship between energy flow and information flow in CPPS, combined with the evolution process of cascading failures between power flow and information network delay changes, the interdependent network model of CPPS primary and secondary systems is constructed. Then, on this basis, the key node indexes of power network and information network are established and the key cyber-physical important nodes are identified. Finally, the effectiveness of the model and method is tested by an example simulation method to determine whether the method is feasible in practice.

Key words: cyber physical power system; energy flow; information flow; passive fault; key node identification

0 引言

信息技术的广泛应用极大地拓展了智能电网中信息流与能量流的协同手段^[1], 实现了电力与能源设备之间的智能化、信息化互联^[2], 在这一背景下设计出了新的电力信息物理系统(CPPS)。信息系统和电网物理系统的相互关联有利于可观可控性的提升, 但也会导致增加不同的故障风险^[3], 尤其是信息系统。2015年, 乌克兰爆发了大范围的停电事故。事故原因检测结果显示, 一旦信息系统发生故障除了会对系统自身造成影响以往^[4], 还会对物理系统的稳定运行带来严重的威胁。由此可见, 针对基于输电线路的信

息物理耦合作用的识别方法和技术进行研究与探索, 对维持电力系统的稳定运行有着重要的意义和影响。根据建模角度不同, 可以将 CPPS 关键线路辨识的研究方法分为两大类: 还原论^[5]和复杂网络理论^[6-8]。还原论, 即通过构建时域的物理模型来描述电力系统一二次系统之间的动态耦合关系。具体如下, 考虑了一次侧能量流的时域连续性^[9], 连续动态的电力系统数学模型由微分代数方程构建而成。面向在时域上无法连续获取的信息流时, 可通过有穷自动机来构建与之相关的数学模型。文[10]中一些学者在研究中构建了一种能够对 CPPS 进行抽象化处理的融合模型, 用于

描述能量的转换过程,并在此基础上构建出能量流与信息流深度融合的计算模型。文[11]中的一些专家在研究中首次提出了基于混合系统的 CPPS 建模技术,参照潮流的连续状态和信息离散状态对关键参数进行求解,并根据自身的理解和认知提出一些适用于模型优化和控制的策略与方案。文[12]中的一些学者在集合论方法的基础上构建出复杂的 CPPS 模型,用于描述各个子系统相互之间表现出来的交互特性。文[13]中的学者通过对电力网状态方程的借鉴,来实现 CPPS 建模的转化,从而建立基于发电机转子和相角这两个关键参数的动态方程,可一定程度上反映出系统处于干扰状态下的频率和电压变化规律。综上所述,以上提及的基于状态方程的建模方法能够深度呈现电力系统与信息系统之间产生的特殊的暂态特性,构建了 CPPS 耦合互联的数学模型,但也存在一些问题:一方面,还原论忽略了电力系统网间拓扑结构^[12],仅能辅助分析 CPPS 的交互机理,但缺乏对改善电力信息-物理相依网络脆弱性的后续指导;另一方面,由于状态方程的非线性和复杂性导致模型求解难度大,整个模型的计算周期较长。

复杂网络理论凭借其可以将复杂的电力系统简化的特点,为研究电力系统间拓扑结构提供了新的研究手段。与基于还原论的建模方法不同^[14-16],复杂网络理论将信息网和电力网两张网络耦合形成一个相互依存的复杂网络模型,进而分析 CPPS 网间拓扑结构的脆弱性^[17]。根据复杂网络对 CPPS 建模思路的不同,基于复杂网络理论对关键线路辨识方法可以分为“单一类分析”和“多重类分析”两类。就“单一类分析”方法而言,其大部分研究是基于相互依存网络下 CPPS 的拓扑结构^[18],从拓扑角度对相互依存网络

网间拓扑的相似性进行分析,以研究信息-物理耦合方式和结构特点对系统脆弱性的影响。但是,这种单纯的拓扑结构分析忽略了 CPPS 的电气物理特性,没有充分描述电力系统中能量流流动状态,由于难以直接指导系统的实际运行与控制。一些学者在建立交互模型的基础上添加了潮流计算和稳定分析两项内容,用于探究电力系统运行状态下的脆弱性,来评估系统的整体运行情况但总体而言,“单一类分析”方法未能考虑 CPPS 一次系统电力网和二次系统信息网之间的交互影响特性。针对上述问题,文[18]提出一种“多重类分析”辨识关键线路的方法,构建了电力系统的供能作用^[19]和信息系统主要的监测与控制功能的耦合模型,以信息流量模型以表征故障过程中信息网的运行状态。无论是其计算效率还是计算精度都较其他方法具有明显优势,但仍存在以下问题:①目前,仅基于信息流量模型表征信息网运行状态,并不能充分描述信息流在 CPPS 的通信系统的物理特性^[20]。而事实上,时延是作为信息网络的运行参数,随着信息在通信系统中传输,时延对 CPPS 影响不可忽略,所以二次侧的信息网络模型还需将时延等因素纳入考虑范畴;②该方法是通过考虑电力网与信息网之间的供能、监测和控制作用来表征电力信息物理系统的耦合关系,因而主要描述的是二次系统对一次系统的影响,而无法反映一二次系统的交互过程^[21]。因此仅能辨识一次侧的关键输电线路,而无法辨识二次侧的关键通信线路^[22]。而事实上,信息系统一般采用离散事件描述,若将时间语义赋予通信系统对信息流进行建模,使信息流的建模方法类比于电网络理论^[23]中的基尔霍夫定律,则可以有效描述整个 CPPS 的动态交互过程。

文中基于复杂网络理论,提出了一种关键电力节点与信息节点的辨识方法。首先根据 CPPS 中能量流与信息流之间相互耦合关系,结合电力网潮流与信息网时延变化相互之间发生的连锁故障的演变过程,构建了 CPPS 一二次系统相互依存网络模型,然后在此基础上建立电力网和信息网重点节点指标并辨识关键信息—物理重要节点。与传统 CPPS 关键线路辨识相比,一方面,可以充分刻画电力网潮流变化与信息网时延和信息流量传输损耗之间的相互影响,弥补了对 CPPS 二次侧评价指标不足;另一方面,通过对能量流^[23]与信息流交互过程的动态描述,实现了对 CPPS 一二次侧关键节点的辨识。最后,利用算例仿真法对模型和方法的有效性进行检验,判断该方法在实践中是否可行。

1 电力信息物理系统一二次系统相互依存网络模型构建

基于复杂网络理论,这里将在遵循以下原则的基础上构建基于 CPPS 的等效模型,详情可参考图 1。

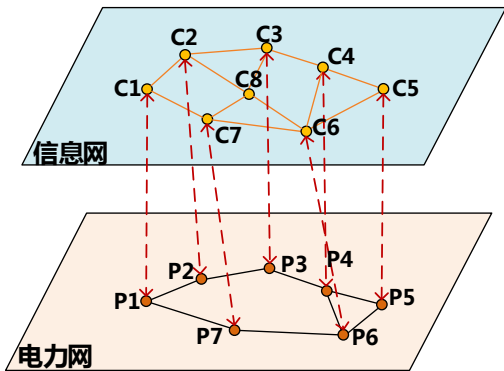


图 1 典型电力信息物理系统结构

Fig. 1 Typical power cyber-physical system structure

1)在确定电力网以后,对其中的母线进行抽象化处理,作为具体的电力节点。将抽象化处理以后的连接电力网节点的设备 and 调度中心等当成对应的信息节点。此时,不考虑系统内部各设备之间存在的连接

关系。

2)在确定电网以后,对其中的输电线路进行抽象化处理,即获得电力网的边。在确定信息站点以后,将其中的通信线路进行抽象处理,即获得信息网的边。此时,不考虑不同线路各自的特点和性质。

3)在确定电力网和信息网以后,沿着相同的方向对各线路进行合并处理,这样就能隐藏重复边和自环。此时,不考虑设备和线路在容量上的差异。

1.1 基于相互依存网络的电力信息物理系统拓扑模型

1.1.1 一次系统电力网拓扑模型

根据复杂网路理论,将电力系统中的节点和线路等效为连通图 G_p , 即 $G_p=(V_p, E_p)$ 。其中, $V_p=\{1,2,\dots,N\}$ 表示电力网的电力节点集,包括发电、变电和负荷等不同功能属性的节点; $E_p=\{1,2,\dots,N\}$ 为电力网的边合集,表示电力系统中的线路。同时以邻接矩阵 A_p 表示不同节点之间的拓扑关系,见式(1)

$$A_p = \{a_{ij}\} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (1)$$

式(1)中: A_p 描述的是 a_{ij} 等矩阵元素;假设 i 与 j 之间建立了稳定的连接关系,那么元素 $a_{ij}=1$;假设 i 与 j 之间并未形成稳定的连接关系,那么 $a_{ij}=0$ 。

1.1.2 二次系统信息网拓扑模型

依据抽象简化原则,对 CPPS 中信息网的拓扑结构进行建模,将信息网中的信息节点对应母线编号的作为节点编号。在此,根据信息流传输过程中节点职能的不同,将节点划分为源节点、中继节点和目的节点。源节点代表控制中心,中继节点为信息流传输途中的信息节点,而目的节点则是关注的信息节点,即

配置 PMU 和发电机控制设备的节点。信息节点 CPPS 中信息网的主干层、接入层和终端层与网络中的其他组成部分逐一对应，详情可见图 2。以主干层为例，负责采集电网的运行数据和设备信息；以接入层为例，负责配电终端与配电子站相互之间的通信连接；以终端层为例，主要由储能设备和电源等组成。

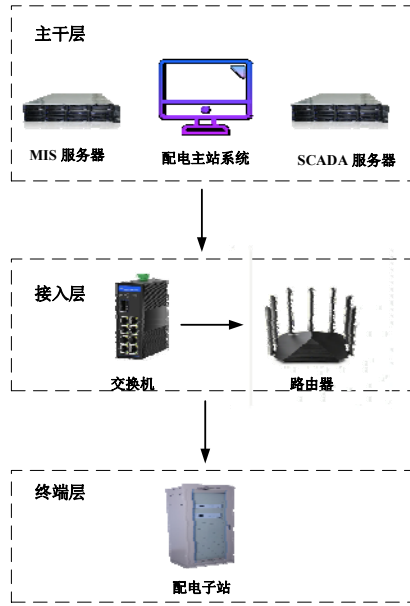


图 2 电力信息物理系统中信息网层次结构

Fig. 2 Hierarchical structure of information network in power cyber-physical system

同理，信息系统可以用节点和支路表示为连通图 G_c ，即 $G_c=(V_c, E_c)$ 。其中 $V_c=\{1,2,\dots,N\}$ 为信息网的信息节点集， $E_c=\{1,2,\dots,N\}$ 为信息网的边合集。同时以邻接矩阵 A_c 表示不同节点的拓扑关系，见式(2)

$$A_c = \{b_{ij}\} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (2)$$

式(2)中： b_i 指的是 A_c 邻接矩阵的关键元素；假设节点 i 与节点 j 之间建立了稳定的连接关系，则元素 $b_{ij}=1$ ；若不存在连接关系，则 $b_{ij}=0$ 。

1.1.3 电力信息物理系统一二次耦合的相互依存网

络模型

针对信息网与电力网之间的各种关系作出处理，包含相依关系和拓扑相依关系两个方面，经过抽象处理后获得各节点间的连接状态，并用 A_{p-c} 来描述基于 CPPS 的邻接矩阵。而电力网邻接矩阵、信息网邻接矩阵和信息-物理邻接矩阵组成 CPPS 的拓扑数学模型，由拓扑邻接矩阵 A 表示

$$A = \begin{bmatrix} A_p & A_{p-c} \\ A_{p-c}^T & A_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)中： A_p 指的是电力网和信息网之间建立的邻接矩阵； A_c 指的是基于二次系统的电力网和信息网之间建立的邻接矩阵； A_{p-c} 指的是基于一次系统与二次系统深度融合下的电力网和信息网之间建立的邻接矩阵；其中 A_{p-c} 的转置矩阵为 A_{p-c}^T 。

其中由 A_{p-c} 是一次系统电力网与二次系统信息网相依的信息-物理邻接矩阵之间的连接关系为

$$A_{p-c} = \{c_{ij}\} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1m} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)中： A_{p-c} 描述的是基于一次系统的 $n \times m$ 维矩阵， n 描述的是 A_p 的节点数， m 代表的是 A_c 的节点数。只要 $n=m$ ，就说明 A_{p-c} 为方阵。当式(4)中点 i 与节点 j 之间有连接关系时元素 $c_{ij}=1$ ；否则 c_{ij} 则为 0。

电力网拓扑模型的度数中心性 $C_{P_{over}.D}$ 为

$$C_{P_{over}.D} = \frac{\sum_{i=1}^n a_{i1}}{n-1} \quad (5)$$

式(5)中， $n-1$ 表示节点 i 与其他节点都相连的边的数量。

电力网拓扑模型的介数中心性 $C_{P_{over}.B}$ 为

$$C_{P_{over}.B} = \sum_{s \neq i \neq t} \frac{n_{st}^i}{g_{st}} \quad (6)$$

式(6)中： n_{st}^i 表示经过节点 i ，且为最短路径的路径数量； g_{st} 表示连接 s 和 t 的最短路径的数量。

信息网拓扑模型的度数中心性 $C_{cycle.D}$ 为

$$C_{cycle.D} = \frac{\sum_{i=1}^n b_{i1}}{n-1} \quad (7)$$

信息网拓扑模型的介数中心性 $C_{cycle.B}$ 为

$$C_{cycle.B} = \sum_{s \neq i \neq t} \frac{n_{st}^i}{g_{st}} \quad (8)$$

1.2 电力信息物理系统二次系统权重模型的构建与分析

现阶段开展的研究重点在于把 CPPS 建模当成是一个具有无权无向特性的模型。但是，现实中的信息网节点和电力网节点往往都呈现出显著的异质性特征。我们在研究电力网的运行状态问题时，应该深入了解影响系统运行的潮流约束条件，信息网的运行则是需要考虑系统中的时延和信息流量传输损耗等约束条件，因此，需要在所构建的 CPPS 拓扑模型的基础上，构建边权重邻接矩阵 W ，以反映 CPPS 的物理特性，其可表示为

$$W = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & \cdots & W_{1j} & \cdots & W_{1n} \\ W_{21} & W_{22} & \cdots & W_{2j} & \cdots & W_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{i1} & W_{i2} & \cdots & W_{ij} & \cdots & W_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{n1} & W_{n2} & \cdots & W_{in} & \cdots & W_{nn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(9)中： W_{ij} 表示网络中的边权重值，若 W_{ij} 在网络中不存在此边或网络中的对角线元素的值均为 0。

1.2.1 基于潮流分布特性的一次系统权重模型

对于传统电力网的加权模型构建与分析来讲，需要提出一些假设条件，即潮流只流动在母线间，不考虑潮流的其他流动几率。而电力网的运行需要考虑系统中的潮流约束等条件，通过改进，以反映各“发电—负荷”节点对线路的真实利用情况，将新的电气介数作为电力网线路的权重，则线路 L 上的权重 $W_{LP,ij}$

可表示为

$$W_{LP,ij} = \sum_{i \in \text{Gen}, j \in \text{Load}} \lg \left(\frac{P_L}{P_{Lmax}} \right) \left| \sum_{i \in \text{Gen}, j \in \text{Load}} \sqrt{W_i W_j} \beta_{L-(i-j)} \right| \quad (10)$$

式(10)中：用 P_L 来描述电力线路 L 当前运行状态下的功率传输能量；用 P_{Lmax} 来描述电力线路 L 当前运行状态下的功率传输量峰值；用 W_i 来描述发电机目前运行状态下的节点 i 的实际出力大小；负荷节点 j 的实际负荷值大小为 W_j ；所有发电机的节点集合为 Gen ；所有负荷节点的集合为 Load 。

文中采用直流潮流模型来计算节点注入功率，在此基础上建立以下的直流潮流模型

$$P = B\theta \quad (11)$$

式(11)中： P 描述的是节点注入功率状态下的列向量； B 代表的是当前的节点导纳矩阵； θ 指的是正常节点电压范围内的相角列向量。基于 P 可计算出 θ ，则 P_L 为

$$P_L = b_{ij} \theta_{ij} \quad (12)$$

式(12)中： b_{ij} 指的是 i 与 j 间的导纳； θ_{ij} 指的是 i 与 j 间的电压相角差。在式(11)、(12)的基础上计算出不同线路的功率分量。

基于式(13)来计算出线路功率灵敏度的功率分量 $\beta_{L-(i-j)}$

$$\beta_{L-(i-j)} = \beta_{L-i} - \beta_{L-j} \quad (13)$$

式(13)中：线路 L 对 i 和 j 的功率灵敏度的计算结果是 β_{L-i} 与 β_{L-j} ；对应的单位功率为 $b_{L-(i-j)}$

$$\beta_{L-k} = \frac{\lambda_k u_{k,b}}{u_{i,N}} \left(\cos \varphi_{k,b} \cos \varphi_{i,N} + \sin \varphi_{k,b} \sin \varphi_{i,N} \right) \quad (14)$$

式(14)中： λ_k 为节点 k 注入电流的相关度； $u_{k,b}$ 和 $\varphi_{k,b}$ 为支路 k 首端电压模值和相角； $u_{i,N}$ 和 $\varphi_{i,N}$ 第 i 个节点电压模值和相角。

1.2.2 考虑数据传输特性的二次系统权重模型

在 SDH(synchronous digital hierarchy)光纤通信系统的信息网中，为降低成本，数据包在信息节点之间传输时需选择最短路径，特别是要负载数据传输量

较大的信息支路，这点应重点关注。为描述最短路径传输特性，需基于节点的介数来解释节点负荷的含义。此外，重新界定信息网边的权重关系，即 $W_{LC,ij}$ 为

$$W_{LC,ij} = B_{ci} \cdot B_{cj} \cdot T_C \quad (15)$$

式(15)中： B_{ci} 指的是 i 的介数； B_{cj} 描述的是 j 的介数； T_C 为信息节点时延。

SDH 光纤通信系统在运行状态下之所以会出现传输时延问题，原因包括两方面。一方面，光信号在光纤时传输时可能会出现传输时延；另一方面，信号在 SDH 设备运行时也会出现一定的传输时延。由于信息传输总延最短路径传输，为计算 SDH 内时延寻找通信网络传输最短路径 l 方法，采用 Dijkstra 算法计算信息网络时延。此外，2 Mbit/s 通道的时延 T_c 会受到设备和光缆传输时延的直观影响。计算式为：

$$T_c = T_{SDH} + \sum_{i=1}^N T_i + T_0 \quad (16)$$

式(16)中： T_c 指的是信息传输时出现的时延，以 s 来计量。信息流速 V (bps) 描述的是网络参数； T_{SDH} 指的是设备支路与群路之间产生的时延； N 代表的是设备数目； T_i 描述的是设备时延； T_0 代表的是光纤时延。

关于光波信号的传输时延 T_0 的表达式为

$$T_0 = l/v = l \times n/c \quad (17)$$

式(17)中： c 描述的是光速(3×10^5 km/s)； l 代表信号的传输距离 km； n 指的是选用的光纤折射率，1.47。

采用复用方式的继电保护通道连接示意图 3。

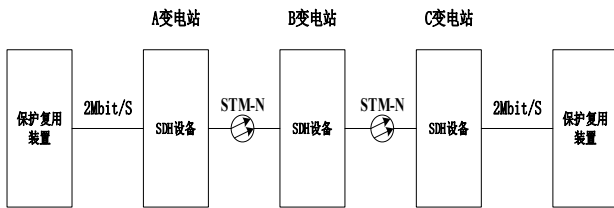


图 3 采用复用方式的继电保护通道连接示意

Fig. 3 Relay protection channel connection diagram using multiplexing mode

2 基于相互依存网络的电力物理信息系统节点重要度排序

2.1 考虑能量流的电力网节点重要度

电力网中的潮流分布在大多数情况下都呈不均匀的特点，且不同中心介数性的节点对系统稳定运行的影响程度也有所差别。首先要确定电力网节点的重要度指标，见式(18)

$$K_{Power}(i) = \frac{W_{LP,ij}}{2} (\alpha_p T_{Power}^*(i) + \beta_p L_{Power}^*(i)) \quad (18)$$

式(18)中： $K_{Power}(i)$ 指的是电力节点的重要度； $T_{Power}^*(i)$ 描述的是经过处理后的拓扑中心度； $L_{Power}^*(i)$ 代表的是经过处理后的节点注入状态下的有功功率；电力网中电力节点的 $K_{Power}(i)$ 重要度下拓扑中心性为 α_p ；电力网中电力节点所注入的有功功率权重为 β_p 。

其中将 $C_{Power.B}^*(i)$ 、 $C_{Power.D}^*(i)$ 以及 L_{Power}^* 进行归一化计算处理，见式(19)

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{Power.B}^*(i) = \frac{C_{Power.B}(i) - C_{Power.Bmin}}{C_{Power.Bmax} - C_{Power.Bmin}} (1 - X) + X \\ T_{Power}^*(i) = \varphi_p C_{Power.B}^*(i) + \lambda_p C_{Power.D}^*(i) \\ C_{Power.D}^*(i) = \frac{C_{Power.D}(i) - C_{Power.Dmin}}{C_{Power.Dmax} - C_{Power.Dmin}} (1 - X) + X \\ L_{Power}^*(i) = \frac{L(i) - L_{min}}{L_{max} - L_{min}} (1 - X) + X \end{array} \right. \quad (19)$$

式(19)中：电力网中电力节点归一化处理后的拓扑中心度为 $T_{Power}^*(i)$ 下介数中心性的权重为 φ_p ；基于 $T_{Power}^*(i)$ 计算出其权重，即 λ_p 。 $C_{Power.Bmax}$ 描述的是节点中介数的中心性； $C_{Power.Dmax}$ 描述的是节点中介数的度数中心性； L_{max} 描述的是节点中介数的有功功率最大值； $C_{Power.Bmin}$ 描述的是全部节点中介数的中心性； $C_{Power.Dmax}$ 描述的是全部节点中介数的度数中心性； L_{min} 描述的是全部节点中介数的有功功率最小值。由

此可见, $X=1$, 其重要度介于 $[0.1, 1]$ 间。

2.2 考虑信息流的信息网节点重要度

由于信息网中各个节点传输路径不同, 包含不同介数的节点影响系统运行的关键程度也有所差异。根据节点的拓扑中心性和传输路径提出信息网节点重要度指标, 见式(20)

$$K_{cycle}(i) = \frac{W_{Lc,ij}}{2} (\alpha_c T_{cycle}^*(i) + \beta_c D_{cycle}^*(i)) \quad (20)$$

式(20)中: 信息网中的信息节点重要度为 $K_{cycle}(i)$; 信息网中信息节点归一化处理后的拓扑中心度为 $T_{cycle}^*(i)$; 信息网中信息节点归一化处理后的信息节点传输路径为 $D_{cycle}^*(i)$; 信息网中信息节点的重要度下拓扑中心性为 α_c ; 信息网中信息节点的传输路径权重为 β_c 。

将信息节点介数中心性 $C_{cycle.B}^*(i)$ 、信息节点度数中心性 $C_{cycle.D}^*(i)$ 以及信息节点传输路径 $D_{Power}^*(i)$ 进行归一化计算, 见式(21)

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{cycle.B}^*(i) = \frac{C_{cycle.B}(i) - C_{cycle.Bmin}}{C_{cycle.Bmax} - C_{cycle.Bmin}} (1 - X) + X \\ T_{cycle}^*(i) = \varphi_p C_{cycle.B}^*(i) + \lambda_p C_{cycle.D}^*(i) \\ C_{cycle.D}^*(i) = \frac{C_{cycle.D}(i) - C_{cycle.Dmin}}{C_{cycle.Dmax} - C_{cycle.Dmin}} (1 - X) + X \\ D_{cycle}^*(i) = \frac{D(i) - D_{min}}{D_{max} - D_{min}} (1 - X) + X \end{array} \right. \quad (21)$$

式(21)中: 信息网中信息节点归一化处理后的拓扑中心度为 $T_{cycle}^*(i)$ 下介数中心性的权重为 φ_p ; 信息网中信息节点归一化处理后的拓扑中心度为 $T_{cycle}^*(i)$ 下度数中心性的权重为 λ_p 。 $C_{cycle.Bmax}$ 、 $C_{cycle.Dmax}$ 和 D_{max} 表示信息网中所有信息节点中介数中心性、度数中心性和信息节点传输路径最大值; $C_{cycle.Bmin}$ 描述的是全部节点中介数的中心性; $C_{cycle.Dmax}$ 描述的是全部节点中介数的度数中心性;

D_{min} 描述的是全部节点中介数的传输路径最小值。由此可见, $X=1$, 其重要度介于 $[0.1, 1]$ 间。

3 算例分析

3.1 评价指标

为验证文中方法的正确性和有效性, 提出以下评价指标:

1) 电力网负荷损失率。若该节点受到攻击时, 电力网产生连锁故障反应负荷损失率越大则该节点越脆弱, 节点负荷损失度可以被定义为

$$S_{Pi.nor} = \frac{1}{P_{i.nor}} \sum_{i=1}^S \Delta P_{c,i} \quad (22)$$

式(22)中: $S_{Pi.nor}$ 描述的是电力网发生故障时的负荷损失率; $\Delta P_{c,i}$ 指的是电力网出现故障时的负荷总损失量; $P_{i.nor}$ 描述的是电力网不受干扰时的负荷量; S 指的是电力网发生故障时的连通子集数量。

2) 信息网网络传输效率。以网络效率作为切入点, 可以通过计算信息节点故障后的网络效率来分析其传输能力。信息网的网络传输效率为:

$$E_c(G) = \frac{1}{N_c(N_c - 1)} \sum_{i,j \in G, i \neq j} \frac{1}{D_{ij}} \quad (23)$$

$$D_{ij} = \min \left(\sum_{i,j \in G, i \neq j} d_{ij} \right) \quad (24)$$

式(23)、(24)中: 信息网的传输效率为 $E_c(G)$; 信息网的节点数目为 N_c ; 信息网中节点 i 和节点 j 之间最短有效路径的有效长度之和为 D_{ij} 。

3) 信息网流量传输损耗。在实际的传输过程中, 不可避免地会受到信息流损耗, 致使会出现差错产生流量传输错误。流量传输损耗是指在数据传输的过程中, 由于各种因素的影响, 数据的完整性和质量会有所下降, 是衡量数据在规定时间内数据传输质量的指标, 其计算式为

$$F_{error}(t) = \frac{F_{out}(t)}{F_{in}(t) + F_{co}(t)} \times 100\% \quad (25)$$

式(25)中： $F_{error}(t)$ 表示信息网中信息流的流量传输损耗； $F_{out}(t)$ 表示从网络节点流出的信息流量； $F_{in}(t)$ 描述的是当前的信息流量； $F_{co}(t)$ 指的是经过复制后的信息流量。

其中，将信息网节点注入的信息流量 $F(t)$ 与节点注入电流进行对比，把未知量时延 T_c 与电力网络的节点电压进行对比。由此建立信息流静态计算的代数方程

$$F(t) = VT_c \quad (26)$$

式(26)中：函数 $F(t)$ 指的是节点当前的注入流量，bit。

在某些因素的影响下，网络中的数据会消失不见，但数据的总输入和总输出始终保持平衡，这就是流量守恒定律。即

$$F_{in}(t) + F_{co}(t) = F_{dr}(t) + F_{out}(t) \quad (27)$$

式(27)中： $F_{dr}(t)$ 描述的是消失的信息流量。

由式(16)、(17)计算出信息传输过程中相对于发送时刻的时延，由式(25)、(26)可知，根据电力通信网络在SDH设备，信息流速 V 在SDH设备传输速度固定，得出流入某一个网络节点的信息流量。从而得出以下约束

$$\begin{cases} T_{SDH} + \sum_{i=1}^N T_i + T_0 \leq 12ms \\ \frac{F_{out}(t)}{F_{in}(t) + F_{co}(t)} \leq 90\% \end{cases} \quad (28)$$

4)CPPS节点存活率。其中，节点存活率 G 反映的是网络在遭受攻击的情况下节点的损失程度，即

$$G = \frac{N_a}{N_b} \quad (29)$$

式(29)中： N_a 表示连锁故障后的存活节点数； N_b 表示故障前的存活节点数。其中， $N_a = N_{ap} + N_{ac}$ ， $N_b = N_{bp} + N_{bc}$ 分别表示故障前后电力网和信息网的存

活节点数。

3.2 基于 CPPS 能量流信息流连锁故障模拟的验证思路

文中通过对 CPPS 进行连锁故障模拟，计算上述 4 个评价指标，并在此基础上得出 CPPS 节点重要度排序结果，以该结果为基准结果。将其与本文方法以及对比方法进行对比，来分析文中方法的正确性和有效性。具体的连锁故障模拟思路如下：

首先，建立基于电力网和信息网的拓扑分析模型结构，形成稳定的映射关系，对目前的 CPPS 模型进行初始化处理；然后依次攻击的采用直流潮流电力网的各个节点，若攻击该电力节点引起线路潮流超过其容量极限时，导致线路开断，则连接该电力节点的信息节点失效；若相连信息节点失效时，采用 Dijkstra 算法重新计算信息网最短传输路径是否大于原信息节点最短路径的，若大于则摘除该信息节点，小于则保留该信息节点。当信息网内部各节点的最短路径变化时，摘除最短路径变化超过 13% 时信息节点，当摘除该失效信息节点时，对应的电力节点立即失效；最后循环执行上述阶段的连锁故障演化流程，若无新的失效节点，则 CPPS 进入稳定运行状态，连锁故障结束。

同时，为了横向对比文中方法的正确性，设置了以下 3 种方法对比：

方法 1 为基于复杂网络下考虑能量流与信息流的 CPPS 关键节点辨识方法，即文中方法；

方法 2 为参考文[21]考虑加权拓扑模型下的电力网脆弱性评估；

方法 3 为基于 Floyd 算法计算拓扑结构下的信息网时延评估。

3.3 参数设置

为针对辨识系统节点方法的可行性和有效性进行检验，这里选择在 MATLAB 环境下展开一系列的仿真验证。文中选择 IEEE-39 节点系统作为一次侧电力网，将敷设于输电线路架空地线中的通信光纤组成的网络结构看作二次侧信息网。构建的 CPPS 模型一次侧电力网包含 10 个发电机节点、19 个负荷节点和 46 条电力线路；二次侧信息网包含 40 个信息节点、78 条通信线路，将度数最大的信息节点作为控制中心，其他信息节点与电力节点形成一对一对应关系。相关的仿真参数设置要求和标准为：以线路重载阈值 δ 为例，这里取 0.7；以重载线路的开断概率 β 为例，这里取 0.7。根据信息节点时延计算为应用 Dijkstra 算法，计算信息网时延 T_c ，时延大于 12ms 则摘除信息节点，若时延 T_c 小于 12 ms，则继续计算源节点和中继节点各自的 $F_{in}(t)$ 和 $F_{co}(t)$ ；当输入信息流量小于输出信息流量与丢弃流量之和，即信息流量传输损耗大于 10%，则摘除该信息节点。CPPS 系统 IEEE-39 电力网拓扑结构见图 4。

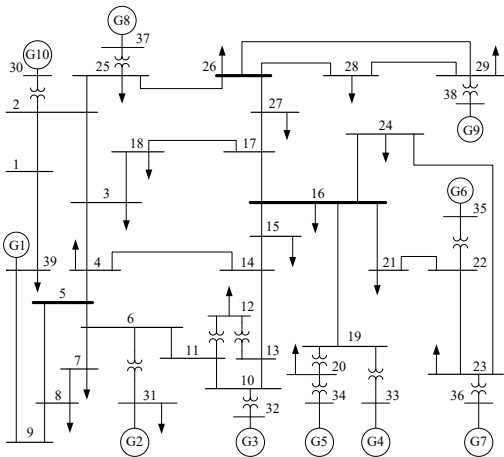


图 4 CPPS 系统 IEEE-39 电力网拓扑结构

Fig.4 IEEE-39 power grid topology of CPPS system

3.4 过程性仿真

基于 CPPS 权重模型分析中提及的关键节点辨识结果，根据式(18)、(21)计算出电力—信息重要节点指标排序，见表 1。

表 1 电力—信息节点重要度排序

Table 1 Power-information node importance ranking

节点排序	节点编号	重要度排序	节点排序	节点编号	重要度排序
------	------	-------	------	------	-------

1	16	1.000	21	10	0.455
2	4	0.790	22	18	0.430
3	12	0.789	23	31	0.410
4	26	0.740	24	7	0.400
5	3	0.730	25	9	0.350
6	11	0.728	26	1	0.320
7	15	0.700	27	24	0.280
8	5	0.680	28	28	0.250
9	19	0.678	29	32	0.220
10	33	0.640	30	29	0.210
11	14	0.630	31	39	0.190
12	13	0.627	32	27	0.158
13	36	0.620	33	20	0.137
14	38	0.580	34	30	0.135
15	37	0.557	35	21	0.130
16	6	0.550	36	35	0.128
17	17	0.540	37	34	0.125
18	2	0.520	38	23	0.120
19	25	0.480	39	8	0.115
20	22	0.458			

由表 1 分析可得，电力—信息重要度排序靠前 4 个节点分别为：节点 16 重要度为 1，节点 4 重要度为 0.79，节点 12 重要度为 0.789，节点 26 重要度为 0.74；重要度排序靠后 4 个节点分别为：节点 35 重要度为 0.128，节点 34 重要度为 0.125，节点 23 重要度 0.12，节点 8 重要度 0.115。出现这一结果的具体原因是，以节点 16 为例，在 IEEE-39 节点 CPPS 电力网各个节点中，与节点 16 相连的节点，在介数中心性和电气介数值上虽然不是最大值，但通过文中算法加权后的结果显示它是该系统中最重要节点。进一步观察可以发现，该节点出现在发电机的不同功率输送通道上，是重要的负荷节点之一。

通过模拟 CPPS 连锁故障，计算文中算例的“负荷损失度”，“信息传输效率”，“信息流量传输损耗”，“节点存活率”结果见图 5。

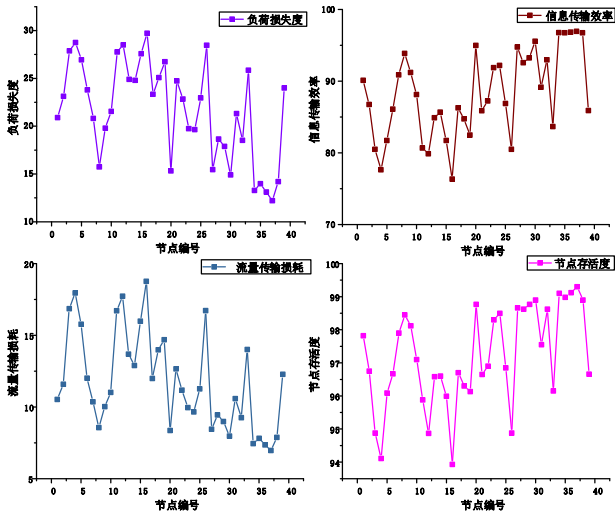


图 5 基准 IEEE-39CPPS 评价指标

Fig. 5 Benchmark IEEE-39CPPS evaluation index

对比图 5 的基准结果与文中方法在表 1 中的排序结果可以看出,文中方法对节点重要度进行排序的整体正确率为 74.36%,但是对重要性前 10 的节点的排序正确率为 100%。即对于文中方法计算得到的重要性排名前 10 的节点为节点 16、4、12、26、3、11、15、5、19、33,其在遭遇连锁故障后,负荷损失度、节点存活率、信息传输效率、信息流量传输损耗的排序结果与文中方法的排序结果一致,这表明文中方法对于重要性较高的节点的排序评估正确率较高。但是文中方法对全部 IEEE-39CPPS 节点的排序结果出现了和实际模拟结果不一致的情况,其原因一是并未考虑电力网运行时潮流的变化过程与信息网运行时信息传输的过程之间的影响。电气介数的计算过程并不复杂,在大规模电网的电气介数计算中比较常用,但这种方法在评估系统状态方面不够深入;二是虽然考虑了 SDH 设备支路到群路和群路到支路的复用、解复用时延在信息网拓扑的关系。但未考虑电力网的继电保护保护动作以及整定时间对信息网时延的影响,导致摘除信息节点的时延约束条件有所不同,故对后续排序结果造成一定影响。

3.5 仿真对比

将文中方法与方法二电力网节点排序进行对比,同时根据图 5 的基准结果标注出排序错误的节点,其结果见表 2。

表 2 电力网 IEEE39 节点系统的关键节点的识别与分析

Table 2 Key node identification of IEEE39 node system

		in power grid								
节点排序	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
方法 1	16	4	12	26	3	11	15	5	19	
方法 2	16	14	11	34	26	3	15	5	4	
节点排序	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
方法 1	33	14	13	36	38	37	6	17	2	
方法 2	12	18	13	37	21	39	6	17	2	
节点排序	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
方法 1	25	22	10	18	31	7	9	1	24	
方法 2	31	10	36	19	1	7	9	23	24	
节点排序	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
方法 1	28	32	29	39	27	20	30	21	35	
方法 2	22	25	29	8	27	20	35	30	33	
节点排序	37	38	39							
方法 1	34	23	8							
方法 2	28	32	38							

而从表 2 可知,文中数字加粗的部分是文中方法、方法 2 与实际模拟结果排序不一致的电力节点。整体来看,文中方法的整体正确率为 74.36%,方法 2 的正确率为 48.71%,文中方法的正确率较方法 2 高了 25.65%。在排序前 10 电力网节点中,文中方法相较于方法 2,将 12、26、19、33 等电力节点排序正确。其原因是,方法 2 只强调基于电力网拓扑结构来评估电力节点的重要性,忽略了电力线路自身原有的物理特性。而文中方法不仅分析了电力网各个节点度数中心性、介数中心性等相关的拓扑特性,还考虑将改进后的电气介数作为电力网线路的权重,弥补了现有电力网潮流模型的缺陷和不足,还能切实体现“发电—负荷”节点之间功率传输影响电力线路运行的效果和作用。因而文中方法相较于方法 2 的优越性。

将文中方法与方法 3 对信息网的排序结果进行对比,同时根据图 5 的基准结果标注出排序错误的节点,其结果见表 3。

表 3 信息网 IEEE39 节点系统的关键节点辨识
Table 3 Identification of key nodes in IEEE39 node system of information network

节点排序	1	2	3	4	5	6	7	8	9
方法 1	16	4	12	26	3	11	15	5	19
方法 3	16	4	12	26	3	11	15	5	19
节点排序	10	11	12	13	14	15	16	17	18
方法 1	33	14	13	36	38	37	6	17	2
方法 3	33	14	13	36	38	37	6	17	2
节点排序	19	20	21	22	23	24	25	26	27
方法 1	25	22	10	18	31	7	9	1	24
方法 3	25	22	10	18	31	7	9	1	24
节点排序	28	29	30	31	32	33	34	35	36
方法 1	28	32	29	39	27	20	30	21	35
方法 3	28	32	29	39	27	20	30	21	35
节点排序	37	38	39						
方法 1	34	23	8						
方法 3	34	23	8						

由表 3 可知文中所提的方法 3 辨识关键信息节点排序与文中方法关键节点排序一致。整体来看,文中方法与方法 3 的正确率均为 74.36%。出现这一结果的具体原因是,文中方法计算时延变化与方法 3 Floyd 算法寻找最短路径进行对比,根据模拟 CPPS 连锁故障后各节点时延变化大小与 Floyd 最短路径排序一致,说明文中 CPPS 模型从信息流计算各节点时延变化与拓扑模型计算最短路径变化一致。但文中方法不仅可以通过 SDH 光纤通道对 CPPS 时延进行计算,而且通过文中辨识方法可以计算电力—信息节点重要度排序,可以反映 CPPS 电力—信息节点之间的互动情况,弥补了已有模型仅就对电力网或信息网单侧的物理特性分析,更好表征了 CPPS 能量流与信息流的互动过程。证明了文中方法相较于方法 3 的优越性。

4 结论

文中基于复杂网络理论,在电力—信息拓扑模型的基础上,通过考虑电力网的潮流分布特性与信息网的数据传输特性来表征能量流信息流交互过程,构建 CPPS 一二次系统相互依存网络模型,并在此基础上提出了一种关键电力节点与信息节点的辨识方法,其具体结论如下:

1)文中方法辨识出关键信息—物理重要节点与实际基准算例下计算 CPPS 重要节点指标排序前 10 的节点排序正确率 100%,但后续节点排序存在一定误差。

2)与传统方法相比,文中方法对于一次系统节点重要度的排序准确性提升了 25.65%,基于复杂网络特征参数及电网物理特性,其原因是,文中方法不仅考虑了电气节点的度值、中心介数值拓扑关系,还将改进后线路的电气介数作为电力网线路的权重。弥补了已有模型的缺陷和不足,还能切实体现“发电—负荷”节点之间功率传输影响电力线路运行的效果和作用。

3)分析了 CPPS 的信息—物理交互机理,与现有辨识方法相比,所提方法能够通过采用 Dijkstra 算法计算信息网时延,得到信息节点受到攻击后时延变化情况。在此基础上不仅仅可以对信息网节点重要度进行排序,还可以同时得到电力网节点重要度排序。

参考文献:

- [1] 陈树勇, 宋书芳, 李兰欣, 等. 智能电网技术综述[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 1-7.
CHEN Shuyong, SONG Shufang, LI Lanxin, et al. Survey on smart grid technology[J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 1-7.
- [2] LI H, DIMITROVSKI A, SONG J B, et al. Communication infrastructure design in cyber physical systems with applications in smart grids: A hybrid system framework[J].

- IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2014, 16(3): 1689-1708.
- [3] 杨楠, 李希喆, 刘毅, 等. 电力市场环境基于多边不完全信息演化博弈的配电网规划方法研究[J]. 电网技术, 2023, 47(11): 4658-4673.
- YANG Nan, LI Xizhe, LIU Yi, et al. Research on distribution network planning method based on multilateral incomplete information evolutionary game in electricity market environment[J]. Power System Technology, 2023, 47(11): 4658-4673.
- [4] 杨楠, 郝俊聪, 雪振, 等. 数据驱动的考虑安全约束机组组合问题研究综述[J/OL]. 高电压技术: 1-15[2023-12-30]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20231039>. YANG Nan, HAO Juncong, XUE Zhen et al. A survey on data-driven unit commitment with safety constraints[J/OL]. High Voltage Engineering: 1-15[2023-12-30]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20231039>.
- [5] 王宇飞, 高昆仑, 赵婷, 等. 基于改进攻击图的电力信息物理系统跨空间连锁故障危害评估[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1490-1499.
- WANG Yufei, GAO Kunlun, ZHAO Ting, et al. Research on power cyber-physical system security[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1490-1499.
- [6] 赵俊华, 文福拴, 薛禹胜, 等. 电力CPS的架构及其实现技术与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(16): 1-7.
- ZHAO Junhua, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Cyber physical power systems: architecture, implementation techniques and challenges[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(16): 1-7.
- [7] 刘东, 盛万兴, 王云, 等. 电网信息物理系统的关键技术及其进展[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3522-3531.
- LIU Dong, SHENG Wanxing, WANG Yun, et al. Key technologies and trends of cyber physical system for power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3522-3531.
- [8] 杨楚原, 姚俊伟, 项川, 等. 面向增量配电网的协同规划方法研究[J]. 湖南电力, 2022, 42(6): 69-75.
- YANG Chuyuan, YAO Junwei, XIANG Chuan, et al. Xiang chuan and so on. research on collaborative planning method for incremental distribution network[J]. Hunan Electric Power, 2022, 42(6): 69-75.
- [9] 冀星沛, 王波, 刘涤尘, 等. 相依网络理论及其在电力信息—物理系统结构脆弱性分析中的应用综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4521-4533.
- JI Xingpei, WANG Bo, LIU Dichen, et al. An overview of interdependent network theory and its application in structural vulnerability analysis of power cyber-physical systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4521-4533.
- [10] 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. Cyber-Physical modeling and integrated security assessment of power systems: driving forces and research concepts[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1481-1489.
- [11] MA Shuang, AMER H M, GAO Liang. Heterogeneity and directionality analysis of the cyber physical power system[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2021, 16(2): 749-757.
- [12] 马爽, 徐震, 王利明. 基于集合论的电网信息物理系统模型构建方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(6): 1-5.
- MA Shuang, XU Zhen, WANG Liming. Set theory based modeling method of cyber physical system for power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6): 1-5.
- [13] 王云, 刘东, 陆一鸣. 电网信息物理系统的混合系统建模方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1464-1470.
- WANG Yun, LIU Dong, LU Yiming. Research on hybrid system modeling method of power grid cyber-physical system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1464-1470.
- [14] 杨楠, 黄禹, 董邦天, 等. 基于多主体博弈的电力—天然气综合能源系统联合规划方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6521-6532.
- YANG Nan, HUANG Yu, DONG Bangtian, et al. Research on the joint planning method of electricity-gas integrated energy system based on Multi-Agent game[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22): 6521-6532.
- [15] 杨楠, 刘钊, 鄢晶, 等. 考虑主变调整利用和安全效能成本的变电站规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(13): 4187-4199.
- YANG Nan, LIU Zhao, YAN Jing, et al. A planning method of substation considering main transformer adjustment utilization and safety efficiency cost[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(13): 4187-4199.
- [16] LIN Hua, VEDA S S, SHUKLA S S, et al. GECCO: global Event-Driven Co-Simulation framework for interconnected power system and communication network[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1444-1456.

[17]杨楠, 贾俊杰, 邢超, 等. 基于 E-Seq2Seq 技术的数据驱动型机组组合智能决策方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(23): 7587-7599.

YANG Nan, JIA Junjie, XING Chao, et al. Data-driven Intelligent Decision-making Method for Unit Commitment Based on E-Seq2Seq Technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23): 7587-7599.

[18]逯宝中, 李庚银, 王剑晓, 等. 计及监测与控制功能的电力信息物理系统关键输电线路辨识方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(7): 2556-2565.

TI Baozhong, LI Gengyin, WANG Jianxiao, et al. Identification of critical transmission lines in cyber-physical power system considering monitoring function and control function[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(7): 2556-2565.

[19]曾倬颖, 刘东. 光伏储能协调控制的信息物理融合建模研究[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1506-1513.

ZENG Zhuoying, LIU Dong. Research on cyber-physical fusion modeling of photovoltaic energy storage coordinated control[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1506-1513.

[20]杨楠, 董邦天, 黄禹, 等. 考虑不确定性和多主体博弈的增量配电网源网荷协同规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2689-2701.

YANG Nan, DONG Bangtian, HUANG Yu, et al. Incremental distribution network source-load collaborative planning method considering uncertainty and multi-agent game[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2689-2701.

[21]张海翔, 吕飞鹏. 基于保护脆弱度加权拓扑模型下的电网脆弱性评估[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 613-619.

ZHANG Haixiang, LV Feipeng. The vulnerability evaluation model of power grid based on the protection-vulnerability-weighted topological model[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 613-619.

[22]刘艳, 顾雪平. 基于节点重要度评价的骨架网络重构[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 20-27.

LIU Yan, GU Xueping. Node importance assessment based skeleton-network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10): 20-27.

[23]梁金正, 梁九龄, 熊振冬, 等. 基于全寿命周期成本的变电站设计方案比选方法研究[J]. 湖南电力, 2023, 43(3): 115-119.

LIANG Jinzheng, LIANG Jiuling, XIONG Zhendong, et al. Research on comparison method of substation design scheme based on Life cycle cost[J]. Hunan Electric Power, 2023,

43(3): 115-119.

李希喆(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划(E-mail: 542085927@qq.com)。