

# 电力信息物理融合系统结构脆弱性分析<sup>\*</sup>

谭阳红,罗研彬<sup>†</sup>,谭鑫,蒋鹏

(湖南大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410082)

**摘要:**为了识别电力信息物理融合系统(Cyber Physical Power System, CPPS)脆弱性并制定相应脆弱性防控策略,从结构的角度的角度,建立电力网为IEEE118节点系统、双星型信息网和网型信息网2种具有不同子网络结构的CPPS相依网络模型.提出一种相依节点对重要度综合指标,该指标可以辨识对CPPS结构脆弱性产生重大影响的相依节点对,克服单层网络指标的局限性.基于相依网络连锁故障模型,分别采用随机攻击策略和蓄意攻击策略,分析2种CPPS的结构脆弱性,并研究关键节点保护策略对2种CPPS结构脆弱性的影响.仿真结果表明,随机攻击策略下,网型信息网CPPS的结构比双星型信息网CPPS更加脆弱.蓄意攻击策略下,优先攻击相依节点对对网络连通性的破坏程度更大.合理选取关键节点保护策略的保护节点可以改善系统的结构脆弱性.

**关键词:**电力信息物理融合系统;相依网络;复杂网络;连锁故障;结构脆弱性;关键节点保护策略

中图分类号:TM73

文献标志码:A

## Analysis on Structural Vulnerabilities of Cyber Physical Power Systems

TAN Yanghong, LUO Yanbin<sup>†</sup>, TAN Xin, JIANG Peng

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** To identify the vulnerabilities of Cyber Physical Power System (CPPS) and formulate the corresponding prevention and control strategy, the models of two kinds of CPPS interdependent networks with different subnetworks were presented, in which IEEE 118 bus system was chosen as Power Grid and cyber networks adopted two typical structures: double-star and mesh, respectively. An index of comprehensive importance on interdependent pairs of nodes was proposed, and it was used to identify the key pairs of interdependent nodes causing large influence on CPPS structural vulnerabilities, which overcame the limitations of single-layer network indicators. Based on the model of cascading failures in interdependent network, CPPS structural vulnerabilities were analyzed by using two extreme attack strategy: randomly attack and deliberately attack. The effect on CPPS structural vulnerabilities of Key Node Protection

<sup>\*</sup> 收稿日期:2017-10-27

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51577046), National Natural Science Foundation of China(51577046); 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2012CB215106), National Key Basic Research and Development Program of China(973 Program)(2012CB215106); 湖南省自然科学基金资助项目(14JJ7029), Natural Science Foundation of Hunan Province(14JJ7029); 浙江省控制科学与工程重中之重一级学科开放基金资助项目, The Open Foundation of First Level Zhejiang Key in Key Discipline of Control Science and Engineering

**作者简介:**谭阳红(1971-),女,湖南长沙人,湖南大学教授,博士生导师

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: luoyanbin@live.cn

Strategy was considered. Simulation results indicate that, compared with double-star cyber network CPPS, the structure of mesh cyber network CPPS is more vulnerable under randomly attack. Under deliberately attack strategy, prior attacking pairs of interdependent nodes can cause more damage to network connectivity. CPPS structural vulnerabilities can be improved with selecting proper nodes of Key Node Protection Strategy.

**Key words:** cyber physical power system; interdependent network; complex networks; cascading failures; structural vulnerabilities; key node protection strategy

电力一次侧和信息技术的深度融合是能源互联网背景下智能电网的发展趋势. 电力信息物理融合系统是通过 3C (Computation, Communication, Control) 技术将计算、通信和物理环境融为一体的二元复杂交互式系统<sup>[1]</sup>. 一方面, 信息和通信技术 (Information and Communications Technology, ICT)<sup>[2]</sup> 的应用改善了 CPPS 中电力网的可控范围和精度, 提高了系统的可靠性. 另一方面, 2015 年乌克兰大停电事故<sup>[3]</sup> 的调查分析指出信息环节的功能失效同样能诱发物理环节的风险, 信息网和电力网的协调运行和交互影响带来新的脆弱因素. CPPS 脆弱性是引起不确定性大停电事故的根源, 研究如何分析、识别 CPPS 脆弱性并建立 CPPS 脆弱性评估模型具有十分重要的理论价值与现实意义.

复杂网络理论的兴起为复杂系统安全性研究提供新的思路<sup>[4-6]</sup>. 文献[4]克服单一指标对电网节点脆弱性评估的片面性, 提出一种基于效用风险熵权和模糊综合评判的节点脆弱性评估模型. 文献[5-6]从结构的角度对比分析华中电力通信网在随机攻击和蓄意攻击下的脆弱性. 但是, 对电力网、信息网的割裂研究无法计及两种网络间的交互影响. 电力领域已有学者尝试从 CPS 的角度研究电力系统<sup>[7-11]</sup>. 文献[8-9]基于直流潮流模型建立一种电力网和信息网之间的交互影响模型, 并分析内在相似性的影响. 文献[7, 11]提出一种基于信息-能量流的 CPS 融合建模方法, 可以通过矩阵运算进行量化求解. 文献[10]分析监视和控制功能失效导致电力系统事故蔓延情况并提出一种可靠性评估方法.

CPPS 脆弱性可以从网络结构和运行状态两方面分析, 其中, 网络结构决定电力网承载负荷和传输潮流的能力以及信息网传输信息流的能力. 基于系统论的结构脆弱性分析方法对系统整体加以研究, 可以弥补传统基于还原论的分析方法在揭示系统整体动态行为方面的局限性. Buldyrev 等<sup>[12]</sup> 在 Nature 杂志上提出相依网络的概念及相依网络连锁故障模

型, 以研究相依网络中不同于单侧网络的渗流特性. 文献[13]将相依网络相关研究成果应用于华中地区 CPPS 的结构脆弱性评估, 并提出低度数节点加边分配策略以改善系统的脆弱性. 据笔者所知, 国内外对相依网络在 CPPS 结构脆弱性评估方面的研究较少, 很少涉及不同子网络结构类型 CPPS 结构脆弱性分析.

因此, 本文基于相依网络已有的研究成果, 首先, 运用图论数学工具对电力网为 IEEE118 节点系统、信息网分别为双星型和网型的具有两种不同子网络结构的 CPPS 进行一体化结构建模, 并以此为研究对象. 其次, 提出一种重要度综合指标, 对 CPPS 中相依节点对的重要程度进行定量评估. 最后, 基于相依网络连锁故障模型, 采用随机攻击和蓄意攻击两种不同的攻击策略对两种不同信息网结构的 CPPS 进行动态结构脆弱性分析, 并研究关键节点保护策略对两种 CPPS 结构脆弱性的影响.

## 1 CPPS 相依网络建模

CPPS 作为信息网与电力网深度耦合且高度相依的二元复杂网络, 建立能够反映 CPPS 中信息网与电力网交互影响演化过程的一体化网络模型具有重要的研究意义.

### 1.1 CPPS 相依网络数学模型

为了对 CPPS 进行定量分析和研究, 本文在对电力网、信息网建模时做出如下假设:

- 1) 电力网和信息网只考虑输电网及其对应的信息网;
- 2) 将电力网中的发电站和变电站分别抽象为发电站节点和变电站节点; 将信息网中各级调度中心和各电力站点对应的信息系统分别等效为调度中心节点以及各电力站点对应的信息节点;
- 3) 将输电线路抽象为电力网的边, 将通信线路抽象为信息网的边, 忽略线路的差异且认为所有边

都是无向边,不考虑多重边和自环。

运用图论数学工具,CPPS 的电力网、信息网作为单侧网络,可分别抽象为两个无权无向图。

$$G = (V, E) \quad (1)$$

式中:  $V$  为单侧网络的节点集合;  $E$  为单侧网络的边集合。

CPPS 中相依边可以抽象为一组特殊边的集合

$E_{inter}$

$$E_{inter} = \{(v_p, v_c) \mid v_p \in V_p, v_c \in V_c\} \quad (2)$$

式中:  $V_p$  和  $V_c$  分别表示电力网和信息网的节点集合。

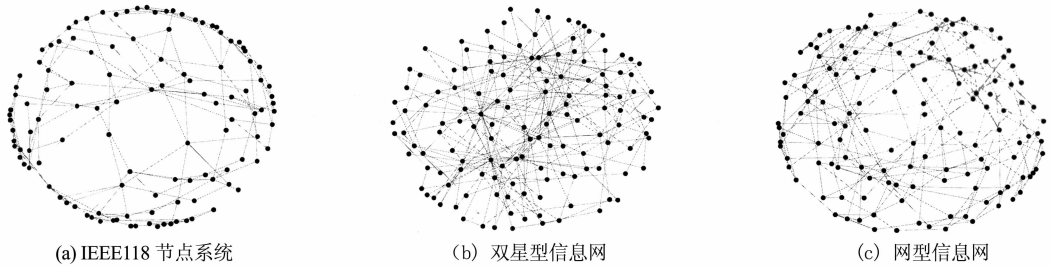


图 1 IEEE118 节点系统及其对应的 2 种信息网  
Fig. 1 IEEE118 bus system and its 2 kinds of cyber networks

由图 1 可以看出,双星型信息网具有少数的高度数节点,而 IEEE118 节点系统电力网和网型信息网度数分布相对均匀。表 1 进一步给出这 3 种网络的统计特征参数对比,常用的统计特征参数指标有度数、边数、平均度数、特征路径长度、聚集系数等,具体的参数定义可以参考文献[13],在此不再赘述。小世界网络的判据公式<sup>[16]</sup>为:

$$\begin{cases} L \geq L_{random} \\ C \gg C_{random} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $L_{random}$  和  $C_{random}$  分别为与该网络具有相同节点数和平均度数的随机网络的特征路径长度和聚类系数,  $L_{random} \approx \ln N / \ln \bar{k}$ ,  $C_{random} \approx \bar{k} / N$ 。

表 1 3 种网络的统计特征参数

Tab. 1 Statistically characteristic parameters of 3 kinds of networks

统计特征参数	电力网	双星型信息网	网型信息网
节点数 $N$	118	138	138
边数 $M$	179	272	272
平均度 $\bar{k}$	3.033	3.942	3.942
特征路径长度 $L$	6.308 7	3.317 0	4.201 7
聚集系数 $C$	0.165 1	0.065 6	0.189 6
$L_{random}$	4.298 5	3.592 1	3.592 1
$C_{random}$	0.025 7	0.028 6	0.028 6

由表 1 可知,IEEE118 节点系统电力网满足公

## 1.2 CPSS 电力网、信息网建模

文献[14]以实际的电力调度数据网为蓝本,构造双星型和网型 2 种典型的信息网结构。为了研究网络结构对 CPSS 结构脆弱性的影响,本文考虑电力网为 IEEE118 节点系统、信息网分别为双星型和网型的 2 种不同结构类型的 CPSS。其中,双星型信息网是典型的无标度网络,网型信息网是典型的小世界网络<sup>[14]</sup>。本文采用文献[15]提出的 BA 无标度网络演化算法构造双星型信息网,采用文献[16]提出的 WS 小世界网络演化算法构造网型信息网,电力网、双星型信息网和网型信息网网络结构如图 1 所示。

式(3),与网型信息网同为小世界网络。因此,网型信息网 CPSS 具有相同的子网络结构,双星型信息网 CPSS 具有不同的子网络结构。

## 1.3 CPSS 电力网、信息网相依关系建模

电力网和信息网的相依策略反映两个孤立网络间的耦合方式。信息系统是服务于电力一次系统的二次系统,配备数据采集与监视控制系统(Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA)、同步相量测量单元(Phasor Measurements Units, PMU)、计算分析设备以及高可靠性的通信系统等,依靠先进的能量管理系统(Energy Management System, EMS),满足电力网的信息需求<sup>[17]</sup>。电力网为信息网提供电能,维持信息设备的正常运行。

“部分—一对应”的相依网络模型<sup>[13,18]</sup>考虑信息网中不仅包含各电力节点所对应的信息节点,还包含各级调度中心节点,这些调度中心节点配备有备用发电机组,在主供电失效的情况下仍可正常运行一定时间,所以可将各级调度中心视为“自治节点<sup>[19]</sup>”,如图 2 所示。文献[20]中通过研究指出现实世界中相依网络并不是随机相依,节点之间的相依关系存在一定的规律,即内在相似性。文献[21]分析指出内在相似性有利于提高电力-信息耦合网络的鲁棒性,介数-度数(BD)耦合效果最佳。

因此,本文在“部分一一对应”的相依网络模型的基础上,采用介数-度数相依策略,即将1.2节生成的电力网按介数从小到大排序,而信息网按度数从小到大排序,考虑到信息网中业务流向以纵向为主,横向业务较少,调度中心承载的业务流较多,所以将高度数节点作为“自治”的调度节点,其他节点根据排序结果一一对应,作为相依节点并对其进行编号,从而建立CPPS电力网、信息网间的相依关系。

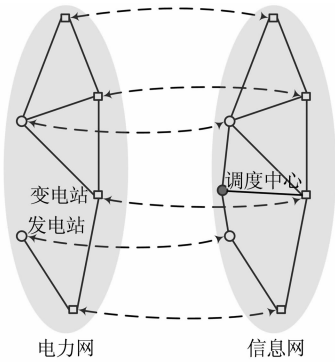


图2 CPPS相依网络

Fig. 2 CPPS interdependent network

## 2 CPPS相依网络节点重要度评估

基于复杂网络理论和相依网络理论,可以采用静态和动态分析方法研究CPPS结构脆弱性在电力网和信息网交互作用中的影响.其中,静态分析方法主要是通过提取网络拓扑的结构特征参数,反映网络中节点的重要程度,例如,在网络拓扑结构完整的前提下,计算节点在网络中的中心性指标,进行节点的重要程度评估,节点的中心性越强,节点就越重要。

### 2.1 复杂网络中心性指标

复杂网络理论作为当前的研究热点,通过提取网络的统计特征参数,从结构的角度的分析单侧网络脆弱性.本文主要介绍两个复杂网络中心性指标,具体的指标定义如下:

1)介数中心性.介数中心性在图论中的定义是指基于最短路径算法对图中节点或边中心程度的量测,具体的最短路径介数中心性的算法可以参考文献[22].其中节点介数中心性的定义是经过该节点的最短路径数目占最短路径总数的比例,该指标反映了节点在最短路径下的负荷水平,它的计算公式为:

$$C_B(v) = \sum_{s \neq v \neq t \in V} \frac{\sigma(s, t | v)}{\sigma(s, t)} \quad (4)$$

式中: $V$ 为图中包含的节点集合; $\sigma(s, t)$ 为节点 $s$ 与 $t$ 之间所有最短路径的个数和; $\sigma(s, t | v)$ 为 $\sigma(s, t)$ 中最短路径穿过节点 $v$ 的个数和。

2)度数中心性 $C_D$ .网络中某节点度数的定义是与该节点相连的连接边个数,记作 $\text{deg}(v)$ .将得到的节点度数进行数据规格化,即用可能的最大度数除该组节点度数,得到每个节点的度数中心性 $C_D$ ,它的计算公式为:

$$C_D(v) = \frac{\text{deg}(v)}{N-1} \quad (5)$$

式中: $\text{deg}(v)$ 为节点 $v$ 的度数; $N$ 为网络的规模; $N-1$ 即为网络中可能的最大度数。

为了便于分析比较,本文对介数中心性指标 $C_B$ 和度数中心性指标 $C_D$ 进行归一化处理:

$$\begin{cases} C_B^*(v) = \frac{C_B(v) - C_{B\min}}{C_{B\max} - C_{B\min}} \\ C_D^*(v) = \frac{C_D(v) - C_{D\min}}{C_{D\max} - C_{D\min}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $C_{B\max}$ 和 $C_{B\min}$ 分别为所有节点中介数中心性指标的最大值和最小值; $C_{D\max}$ 和 $C_{D\min}$ 分别为所有节点中度数中心性指标的最大值和最小值。

### 2.2 CPPS相依节点对重要度综合指标

CPPS作为电力网和信息网深度融合的二元复杂系统,对它进行节点重要度评估时必须进行一体化考虑.本文提出一种重要度综合指标对CPPS中的相依节点对重要程度进行排序。

根据2.1节所述内容可分别计算得到电力网和信息网中每个节点的介数中心性 $C_B$ 和度数中心性 $C_D$ ,并根据式(6)分别进行归一化处理.本文从结构的角度的,首先定义单侧网络中重要度综合指标 $I_S$ 为:

$$\begin{cases} I_S(v_P) = \alpha_P C_B^*(v_P) + (1 - \alpha_P) C_D^*(v_P) \\ I_S(v_C) = \alpha_C C_B^*(v_C) + (1 - \alpha_C) C_D^*(v_C) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $v_P$ 、 $v_C$ 分别为电力网和信息网中的节点; $\alpha_P$ 、 $\alpha_C$ 分别为电力网和信息网节点重要度权重系数。

根据1.3节所述电力网和信息网间的相依关系,定义CPPS中相依节点对的重要度综合指标 $I$ 为:

$$I(v_{P \rightarrow C}) = \alpha I_S(v_P) + (1 - \alpha) I_S(v_C) \quad (8)$$

式中: $v_{P \rightarrow C}$ 为CPPS中的相依节点对编号; $\alpha$ 为CPPS相依节点对重要度权重系数。

基于上述计算方法,采用等权重设置,即取 $\alpha$ 、 $\alpha_P$ 、 $\alpha_C$ 都为0.5,对前文所述的两种CPPS进行相依节点对重要度综合指标进行排序,排序结果对比如图3所示。

由图 3 可知,2 种 CPPS 的重要度综合指标排序结果呈现的趋势基本一致,但网型信息网 CPPS 重要度综合指标数值上普遍大于双星型信息网 CPPS,这是由于网型结构中节点度数和介数分布均匀,而双星型结构中仅有少数节点具有高度数或高介数,大部分节点的度数和介数较低.表 2 进一步对比 2 种 CPPS 重要度综合指标前 10 的相依节点对.其中,编号 G80 表示 IEEE118 节点系统中编号为 80 的发电站节点及其对应的信息节点构成的相依节点对,编号 T68 表示 IEEE118 节点系统中编号为 68 的变电站节点及其对应的信息节点构成的相依节点对.表 2 中 2 种 CPPS 相依节点对在前 10 中同时存在的有 8 组,但排列顺序不同.

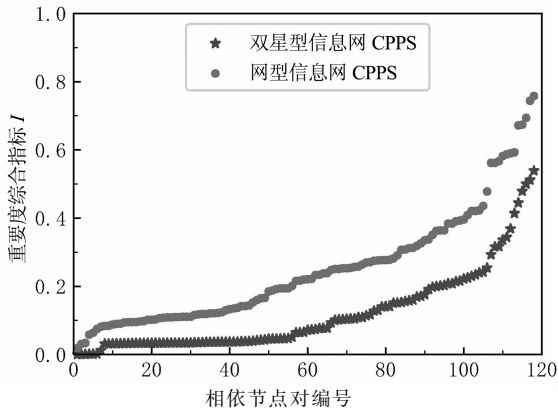


图 3 2 种 CPPS 的重要度综合指标排序结果对比  
Fig. 3 Contrast of sequence of comprehensive importance between two kinds of CPPS

表 2 2 种 CPPS 重要度综合指标前 10 的相依节点对  
Tab. 2 The top 10 interdependent node pairs of 2 kinds of CPPS in comprehensive importance

排序	双星型信息网 CPPS		网型信息网 CPPS	
	$v_p \leftrightarrow c$	$I$	$v_p \leftrightarrow c$	$I$
1	G49	0.539 2	G69	0.757 6
2	G80	0.511 9	G80	0.744 5
3	G69	0.500 1	G100	0.693 6
4	G77	0.479 1	G77	0.673 7
5	G100	0.445 5	G49	0.671 7
6	G65	0.414 0	G70	0.592 9
7	T38	0.368 8	T68	0.590 4
8	T68	0.344 2	T30	0.586 6
9	T30	0.335 7	G65	0.581 8
10	T17	0.317 2	T37	0.567 4

### 3 CPPS 动态结构脆弱性分析

动态分析方法主要是在不同的攻击策略下,通过反复移除节点触发连锁故障,通过网络降低的性能指标来反映网络的结构脆弱性.通常采用连通性

脆弱指标  $G$ ,即存活的最大连通子集规模所占比例来量化结构脆弱程度:

$$G = \frac{N'_p + N'_c}{N_p + N_c} \quad (9)$$

式中:  $N_p$ 、 $N'_p$  和  $N_c$ 、 $N'_c$  分别为攻击前后电力网和信息网的最大连通子集规模.

#### 3.1 动态结构脆弱性分析流程

与传统电网相比,针对 CPPS 的攻击手段更加多样,除了直接攻击电力节点,亦可通过攻击信息节点,破坏其通信系统的正常运行,例如,通过拒绝服务攻击(Denial of Service, DoS),从而使信息节点失去对电网的监视与控制功能.本文以具有相同电力网、不同信息网两种类型的 CPPS 为研究对象,从结构连通性的视角,基于相依网络连锁故障模型<sup>[12,18]</sup>,采用随机攻击和蓄意攻击两种不同的攻击策略,比较 2 种 CPPS 在受到攻击时连通性脆弱指标  $G$  的变化趋势.

作为两种极端的攻击方式,随机攻击就是随机性地移除节点,由于调度中心节点在电网中的重要地位,本文考虑以下两种蓄意攻击方式:

1) 优先攻击调度中心节点,按照调度中心节点在单侧网络重要度综合指标排序确定先后攻击顺序;

2) 优先攻击相依节点对,按照相依节点对重要度综合指标排序确定先后攻击顺序.

根据文献[12],相依网络连锁故障模型中节点的存活条件为:1)该节点在初始攻击下存活;2)节点处于所在单侧网络的最大连通子集中;3)除“自治节点”外,节点存活的前提是其相依节点存活.如节点不满足存活条件,则认为该节点失效.

具体的动态结构脆弱性分析流程图如图 4 所示.

#### 3.2 仿真分析

根据图 4 所示流程图,对双星型信息网 CPPS 和网型信息网 CPPS 进行动态脆弱性分析对比.

图 5 中,按照随机攻击策略攻击网络中的节点,每种初始失效节点个数下的初始失效节点集都随机生成,并进行相依网络连锁故障仿真,重复进行 10 000 次求取平均值,得到每种初始失效节点个数下两种 CPPS 的连通性脆弱指标  $G$ .由图 5 可知,随机攻击下,网型信息网 CPPS 的结构比双星型信息网 CPPS 更加脆弱.这是由 CPPS 网络结构决定的,

网型信息网 CPPS 中电力网和信息网都为典型的小世界网络,其聚集系数  $C$  高、特征路径长度  $L$  小的特点在随机攻击下连锁故障蔓延中起到了推波助澜的作用. 而双星型信息网 CPPS 中信息网为典型的无标度网络,具有少数的“核心”节点以及较多的低度数节点,这使得它在面对随机攻击时维持较好的连通水平.

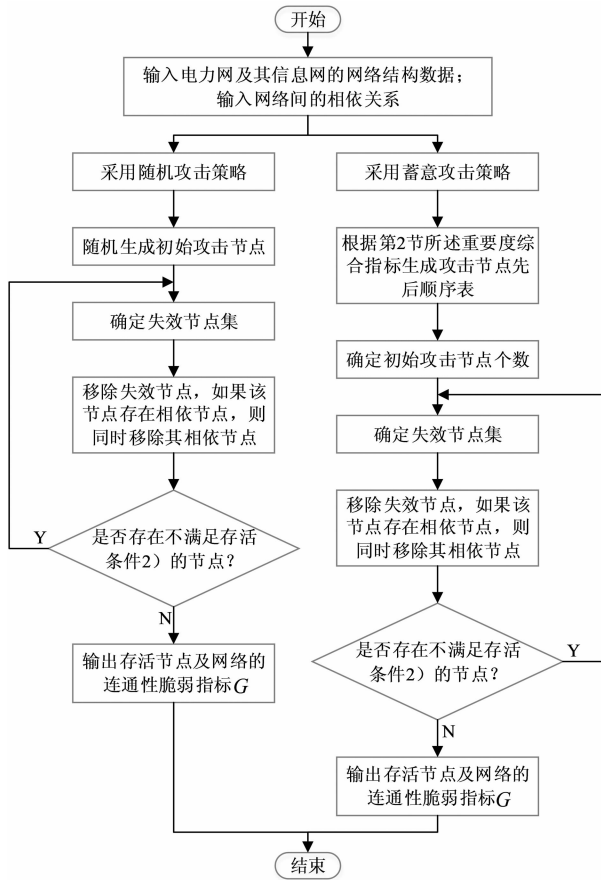
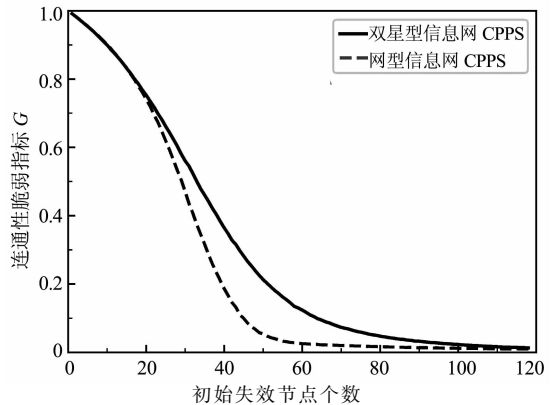


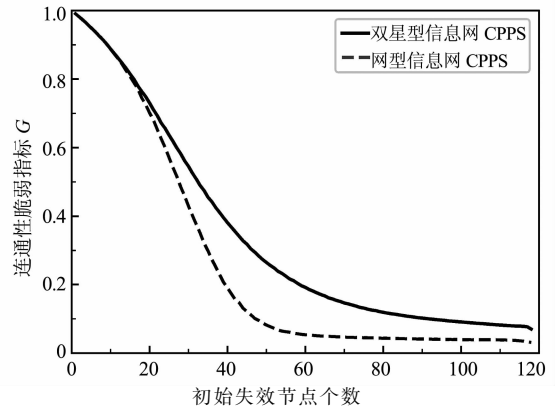
图 4 动态结构脆弱性分析流程图  
Fig. 4 Flow chart of dynamic analysis of structural vulnerability

关键节点保护策略是通过提高站点安全设计标准、扩大关键设备的冗余、改进应急处理预案和流程等措施,降低站点遭受攻击的概率. 各级调度中心站点因其在电网中的重要地位而受到高度重视,调度中心站点作为“自治节点”,配备有备用供电系统以防止主供电系统失效导致调度中心无法正常工作. 各级调度中心站点通常作为关键节点进行保护. 因此,图 5(a)和图 5(b)给出了初始失效节点是否考虑调度节点两种情况下两种 CPPS 结构脆弱性比较. 从图 5 可以看出,当初失效节点个数少于 20 个时,两种情况下双星型 CPPS 和网型 CPPS 的连通水平下降趋势基本一致,且连通水平都下降了 20%

以上,在初始失效节点不考虑调度中心节点情况下,连通水平几乎下降了 30%. 这说明,仅把调度中心站点作为关键节点进行保护在初始失效节点较少时并没有改善反而加剧了 CPPS 的结构脆弱性,尤其对网型信息网 CPPS. 对曲线进一步分析可以看出,当初失效节点个数继续增加时,这种保护策略减缓了 CPPS 连通水平的下降趋势,双星型信息网 CPPS 连通水平得到明显改善. 这意味着该保护策略在初始失效节点个数大于一定数量时可以改善 CPPS 的结构脆弱性,尤其是对双星型信息网 CPPS.



(a) 初始失效节点考虑调度中心节点



(b) 初始失效节点不考虑调度中心节点

图 5 随机攻击下 2 种 CPPS 的结构脆弱性对比  
Fig. 5 Comprison of structural vulnerabilities between two kinds of CPPS under randomly attack

图 6 采用蓄意攻击策略攻击网络中的节点,由图 6(a)可以看出,按照方式 1)攻击 CPPS 中的节点时,网型信息网 CPPS 的结构要明显优于双星型信息网 CPPS,当初失效节点个数达到 20 个时,双星型信息网 CPPS 连通性脆弱指标  $G$  已基本接近于 0,而网型信息网 CPPS 仍维持在 85%以上. 而图 6(b)中,按照方式 2)进行蓄意攻击时,小规模攻击情况下,两条曲线相差不大. 初始失效节点规模较大时,双星型信息网 CPPS 结构要优于网型信息网

CPPS.

进一步对比图 6(a)和(b)不难发现,采用蓄意攻击策略时,方式 2)比方式 1)对网络连通性的破坏程度更大,相比而言,网型信息网 CPSS 受蓄意攻击

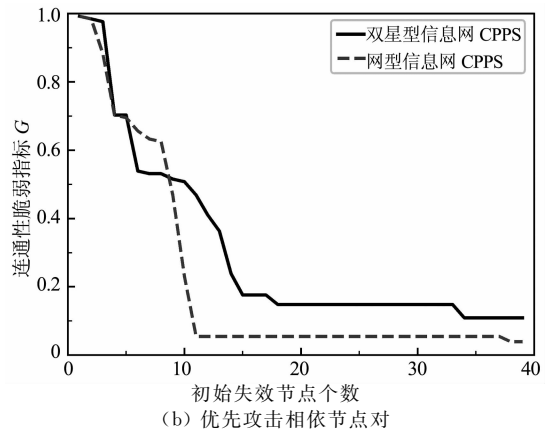
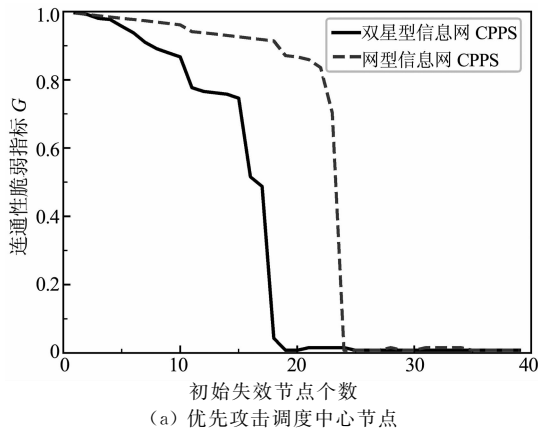


图 6 蓄意攻击下 2 种 CPSS 的结构脆弱性对比

Fig. 6 Comprison of structural vulnerabilities between two kinds of CPSS under deliberately attack

图 7 给出 2 种攻击策略下关键节点保护策略相依节点对保护比例  $p=5\%$  时 2 种 CPSS 结构脆弱性曲线. 分别对比图 5(b)和图 7(a)、图 6(b)和图 7(b)可知,当相依节点对保护比例  $p$  为  $5\%$  时,两种

攻击策略下两种 CPSS 的结构脆弱性都得到了改善. 蓄意攻击策略下,关键节点保护策略对双星型信息网 CPSS 改善效果明显,但无法消除网型信息网 CPSS 出现的急剧下降,只是相对推迟了它的出现.

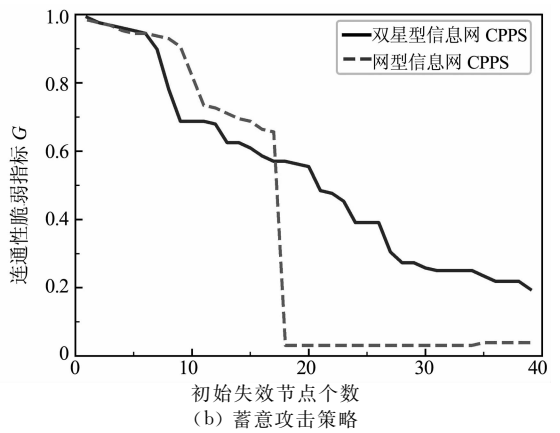
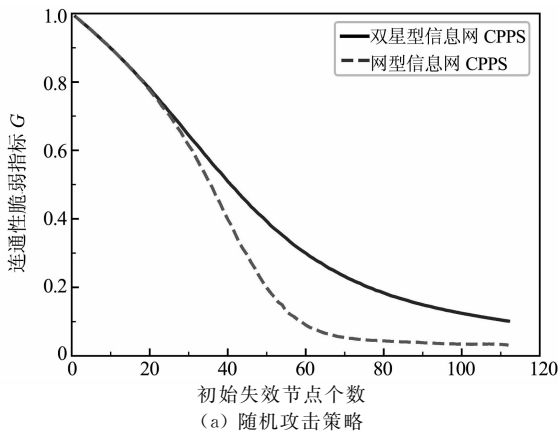


图 7  $p=5\%$  时 2 种 CPSS 的结构脆弱性对比

Fig. 7 Comprison of structural vulnerabilities between two kinds of CPSS when  $p=5\%$

## 4 结 论

脆弱性是复杂系统的潜在威胁,相比于传统电网,电力信息物理融合系统将电力系统与信息系统深度融合,拥有比以往更多的脆弱之处. 本文建立 IEEE118 节点系统分别与双星型信息网、网型信息网的两种 CPSS 相依网络模型,采用相依节点对重要度综合指标辨识关键节点,并分析了 2 种 CPSS 在随机攻击和蓄意攻击下的结构脆弱性,得出了以

下结论:

- 1) 随机攻击策略下,网型信息网 CPSS 的结构比双星型信息网 CPSS 更加脆弱;
- 2) 蓄意攻击策略下,重要度综合指标排序靠前的相依节点比自治节点具有更高的结构重要性;
- 3) 合理选取关键节点保护策略的保护节点可以改善系统的结构脆弱性,相比之下,双星型信息网 CPSS 在关键节点保护策略下改善效果更好.

本文对电力信息物理融合系统规划和设计具有一定的指导意义,如何综合考虑网络结构和运行状

态进行脆弱性评估是进一步的研究方向。

## 参考文献

- [1] 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 J H,WEN F S,XUE Y S,*et al.* Cyber physical power systems: architecture, implementation techniques and challenges[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(16):1-7. (In Chinese)
- [2] SRIVASTAVA A,MORRIS T,EMSTER 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.
- [3] 郭庆来,辛蜀骏,王剑辉,等. 由乌克兰停电事件看信息能源系统综合安全评估[J]. 电力系统自动化,2016,40(5):145-147.  
GUO Q L,XIN S J,WANG J H,*et al.* Comprehensive security assessment for a cyber physical energy system: A lesson from Ukraine's blackout[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(5):145-147. (In Chinese)
- [4] 丁明,过羿,张晶晶,等. 基于效用风险熵权模糊综合评判的复杂电网节点脆弱性评估[J]. 电工技术学报,2015,30(3):214-223.  
DING M,GUO Y,ZHANG J J,*et al.* Node vulnerability assessment for complex power grids based on effect risk entropy-weighted fuzzy comprehensive evaluation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2015,30(3):214-223. (In Chinese)
- [5] 刘涤尘,冀星沛,王波,等. 基于复杂网络理论的电力通信网拓扑脆弱性分析及对策[J]. 电网技术,2015,39(12):3615-3621.  
LIU D C,JI X P,WANG B,*et al.* Topological vulnerability analysis and countermeasures of electrical communication network based on complex network theory[J]. Power System Technology,2015,39(12):3615-3621. (In Chinese)
- [6] 刘涤尘,冀星沛,陈果,等. 基于复杂网络理论的电力通信网加边保护策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(10):121-126.  
LIU D C,JI X P,CHEN G,*et al.* Link addition strategy based on complex network theory for power communication network[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(10):121-126. (In Chinese)
- [7] 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 Q L,XIN S J,SUN H B,*et al.* Power system cyber-physical modelling and security assessment: Motivation and ideas[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(6):1481-1489. (In Chinese)
- [8] 张宇栋,曹一家,包哲静. 输电线路开断状态信息传输失真对连锁故障的影响[J]. 电力系统自动化,2012,36(24):4-9.  
ZHANG Y D,CAO Y J,BAO Z J. Impact of transmission distortion of line-outage-state information on cascading failures[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(24):4-9. (In Chinese)
- [9] CAI Y,LI Y,CAO Y,*et al.* Modeling and impact analysis of interdependent characteristics on cascading failures in smart grids[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2017,89:106-114.
- [10] 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 J,HAN Y Q,GUO C X,*et al.* Reliability assessment of cyber physical power system considering monitoring function and control function[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(8):2123-2130. (In Chinese)
- [11] XIN S,GUO Q,SUN H,*et al.* Information-energy flow computation and cyber-physical sensitivity analysis for power systems[J]. IEEE Journal on Emerging & Selected Topics in Circuits & Systems,2017,7(2):329-341.
- [12] BULDYREV S V,PARSHANI R,PAUL G,*et al.* Catastrophic cascade of failures in interdependent networks[J]. Nature,2009,464(7291):1025-1028.
- [13] 冀星沛,王波,董朝阳,等. 电力信息-物理相互依存网络脆弱性评估及加边保护策略[J]. 电网技术,2016,40(6):1867-1873.  
JI X P,WANG B,DONG Z Y,*et al.* Vulnerability evaluation and link addition protection strategy research of electrical cyber-physical interdependent networks[J]. Power System Technology,2016,40(6):1867-1873. (In Chinese)
- [14] 胡娟,李智欢,段献忠. 电力调度数据网结构特性分析[J]. 中国电机工程学报,2009,29(4):53-59.  
HU J,LI Z H,DUAN X Z. Structural feature analysis of the electric power dispatching data network[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(4):53-59. (In Chinese)
- [15] BARABASI A L,ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science,1999,286(5439):509-512.
- [16] WATTS D J,STROGATZ S H. Collective dynamics of 'small-world' networks[J]. Nature,1998,393(6684):440-442.
- [17] 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 D,SHENG W X,WANG Y,*et al.* Key Technologies and trends of cyber physical system for power grid[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(14):3522-3531. (In Chinese)
- [18] 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.
- [19] 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. (In Chinese)
- [19] ZHOU D,GAO J,STANLEY H E,*et al.* Percolation of partially interdependent scale-free networks[J]. Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics,2013,87(5):052812.
- [20] PARSHANI R,ROZENBLAT C,IETRI D,*et al.* Inter-similarity between coupled networks[J]. Europhys Lett,2010(92):68002-68006.
- [21] 董政呈,方彦军,田猛. 不同耦合方式和耦合强度对电力-通信耦合网络的影响[J]. 高电压技术,2015,41(10):3464-3469.  
DONG Z C,FANG Y J,TIAN M. Influences of various coupled patterns and coupling strength on power-communication coupled networks[J]. High Voltage Engineering,2015,41(10):3464-3469. (In Chinese)
- [22] BRANDES U. On variants of shortest-path betweenness centrality and their generic computation[J]. Social Networks,2008,30(2):136-145.