

考虑信息物理融合的电网脆弱社团评估方法

汪勋婷, 王 波

(武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 针对目前元件级的电力信息物理脆弱性评估应用于实际大规模电力信息物理网时存在计算复杂度高和脆弱性保护配置难的问题, 充分考虑网络的介观局域特征和社团结构, 提出了一种考虑信息物理融合的电网脆弱社团评估方法。以电力系统潮流为边权重, 采用 Fast Unfolding 算法对电网进行社团划分, 根据电网和通信网对应分层分区建设的现状和实际耦合关系划分通信网社团, IEEE 标准算例的仿真结果证明所采用社团划分方法的优越性。在不同的社团内部耦合关系下采用不同的攻击策略攻击电网中各个社团, 根据整个信息物理融合系统故障后的最大连通子集指标评估电网中的脆弱社团, 符合我国电网和通信网分层分区建设的现状, 有利于减少计算复杂度和脆弱性保护模块化配置的难度。华中 500 kV 电网信息物理系统的仿真结果证明了所提方法的可行性。

关键词: 信息物理融合系统; 相互依存网络; 社团理论; 脆弱社团; 脆弱性评估; 鲁棒性

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.12.006

0 引言

现代电网的复杂性与日俱增, 传统还原论方法已难以为继, 将网络理论应用于电网脆弱性研究可在一定程度上弥补其不足。网架拓扑是电力网和通信网最直观、本质的物理属性, 识别现有网架的脆弱环节对于之后针对性的脆弱性保护具有重要的工程价值。脆弱性保护是指为了提高系统的鲁棒性、降低其脆弱性而对系统的脆弱环节采取的重点保护措施。已有很多文献应用网络理论研究电力系统重要结构的辨识问题^[1-7], 社团作为复杂网络的重要特征在电力系统也有较多应用^[8-15]。

电力系统智能化的发展及多区域能源信息互联使得电网和信息通信系统的耦合性不断加强, 逐渐发展为电力信息物理系统 GCPS (Grid Cyber-Physical System), 其中针对信息物理系统 (CPS) 的耦合性和脆弱性分析是重要研究内容并已有较多研究。文献 [16] 采用集合论的方法描述 GCPS 模型及其子系统的信息-物理交互特性。文献 [17-20] 利用 CPS 架构研究信息-能量流在系统中的交融, 提出一种基于信息物理融合并考虑时空异构性和量测数据不同步的能源互联网模型。文献 [21-25] 提出单侧系统的故障有可能通过系统间的依存关系而在网间产生交互传播的连锁故障, 其中文献 [23] 基于博弈论提出一种电力物理网络和电力信息网络同时遭受人为攻击场景的数学规划模型; 文献 [24] 研究了 CPS 中为达到全网崩溃需要的最小攻击节点数。与此同时, 也有一

些研究机构基于复杂网络理论和相依理论进行 CPS 的研究并取得了一些成果^[21, 25-28]。文献 [21] 以意大利大停电事故为例, 揭示了单个网络 (电网) 的故障通过依存边转移到另一个网络 (信息网) 中, 从而引起 2 个网络之间的交互连锁故障; 文献 [26] 从复杂网络视角评述智能电网信息安全的研究现状, 提出将复杂网络理论加以发展并应用于二元复合网络 (CPPG) 的网络建模、拓扑结构特征提取、连锁故障机理分析和脆弱度评估的新思路; 文献 [25, 27] 总结归纳了现有的电力信息-物理相依网络的建模方法和模型及脆弱性评估方法, 以最大连通子集指标衡量耦合系统的鲁棒性, 提出了一种加边脆弱性保护策略; 基于改进渗流理论, 文献 [28] 提出了考虑物理层电网潮流分析与信息层延时的 GCPS 连锁故障模型。但是, 已有研究主要集中在耦合系统建模、框架等理论研究, 对于耦合系统脆弱环节的辨识研究较少, 且多从节点和线路层面或网络的角度研究, 较少从介观尺度进行分析。

在电网与通信网深度耦合形成的 GCPS 介观层面的脆弱性评估中引入社团理论具有重要意义。一方面, 在基于相互依存网络的脆弱性评估方法中引入社团理论是合理的。我国电网结构实行分层和分区的建设原则, 传统电网依据地域或电网所属电力公司自然地划分为多个区域电网, 该方法最为直接, 但仅仅考虑了电网的自然属性而忽略了其电气特性, 所得到的分区结果不适用于系统的稳定监测和控制, 难以反映规模大、运行方式多变的实际大电网运行特性, 对实际大电网的安全运行极为不利^[11-12]。启发式算法^[29]、Tabu 搜索算法^[30]、社团划分^[8-15]等基于电气距离和拓扑结构特性的电网分区逐渐应用于

收稿日期: 2017-02-14; 修回日期: 2017-11-13
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51477121)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51477121)

实际互联电网分析中,其中社团划分方法主要依据电网的拓扑结构特征、电气特性,更适用于侧重耦合网络拓扑结构的 GCPS 的脆弱性分析。国标 DL/T 364—2010《光纤通道传输保护信息通用技术条件》规定:新建单回线路应随线路架设 OPGW 光缆;改扩建或开断线路,在杆塔能满足架设光缆的技术条件下,宜架设 OPGW 光缆。理想情况下,输电网的每条高压线路都应随塔铺设 OPGW 光缆以实现线路纵联继电保护,这造成了电网和通信网网间拓扑的高度相似性。电网和通信网分层分区而治的现状与社团的思想不谋而合。这说明理论上电网和通信网本身都存在社团化特性,GCPS 作为电力网和信息网的耦合网络,其网络结构也存在着不同程度的社团网络,运行过程中不可避免地受到社团网络结构的影响。从社团层面研究互联大电网背景下 GCPS 的脆弱性具有重要的理论和现实意义^[31]。

另一方面,在基于相互依存网络的脆弱性评估方法中引入社团理论,也存在必要性:对于节点众多、区域广泛的大规模互联电网而言,基于元件级的脆弱性分析计算量巨大,基于社团化的脆弱性分析相当于进行了双层优化,先将 GCPS 社团化分区后再进行社团间的脆弱性分析,大幅减少了计算复杂度;针对大规模互联电网的元件级脆弱环节的重点脆弱性保护也存在工程量浩大的问题。大规模互联电网的元件级脆弱环节可能跨越众多不同地区、不同级别的电网机构,统一进行实施重点脆弱性保护存在诸多不便。电网的社团特性可能与潮流特性、变电站等电力设备的布局等相关特征有关,对于大规模互联电网(区调及以上级别)而言,社团特性受电网分层分区的划分结果影响,同一行政区域内地理位置接近,功率和信息交换更为密切,同一社团内的电力和通信设备设施更可能是归属同一上级(市或省级)或邻近调控中心的。从社团层面分析 GCPS 的脆弱性进而以社团为单位进行后续的重点脆弱性保护对于互联大电网而言存在便于模块化的管理和操作、减少运维成本、减少电网跨区域跨级调控不便等优势。

因此,本文对以往基于相互依存网络理论的脆弱性评估方法引入社团理论进行双层优化改进,从介观尺度考虑电网和通信网之间的耦合影响,提出一种评估 GCPS 中电网脆弱社团的方法。先将 GCPS 社团化分区后再进行社团间的脆弱性分析,从而使得基于社团化的脆弱性评估方法更适用于互联大电网背景下的 GCPS,有利于减少计算复杂度及在电网和通信网的分层分区建设现状下对脆弱环节进行模块化的重点脆弱性保护,提高系统的模块化运作效率,便于电力系统的管理,减少运维成本。

1 社团理论

社团结构是指整个网络由若干个社团构成,每个社团内节点联系紧密,社团之间关系稀疏,图 1 为社团结构示意图。社团划分的模块化水平一般用模块化函数 Q 来定量描述^[32]。

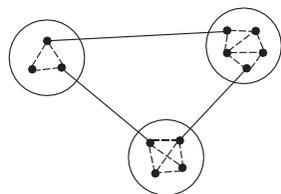


图 1 社团结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of community structure

假设网络被划分为 k 个社团,模块度 Q 定义为:

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{i,j} \left(A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m} \right) \delta(C_i, C_j) \quad (1)$$

其中, m 为网络中边的总数; A_{ij} 为网络邻接矩阵的元素,若节点 i 与节点 j 之间有边则 $A_{ij}=1$,若节点 i 与节点 j 之间没有边则 $A_{ij}=0$; k_i 为所有连接到节点 i 的边的权重之和; C_i 为节点 i 所在社团;若节点 i 、节点 j 处在相同社团中有 $\delta(C_i, C_j)=1$,否则 $\delta(C_i, C_j)=0$ 。

综合数据规模、运行时间等多方面的考虑,本文选择 Blondel 等人提出的 Fast Unfolding^[33] 算法进行社团划分。算法的基本步骤如下。

a. 初始化,将每个节点划分在不同的社团中。

b. 逐一选择各个节点,将其划分到邻居社团中并计算模块度增益。如果最大增益大于 0,则将它划分到对应的邻居社团;否则,保持归属于原社团。

c. 重复步骤 b,直至节点的社团不再发生变化。

d. 构建新图。新图中的点代表上一阶段产生的不同社团,边的权重为 2 个社团中所有节点对的边权重之和。重复步骤 b,直到获得最大模块度值。

社团之间的支路数目能够在一定程度上表征社团发生解列的概率大小。定义社团 i 的度数 D_i 为社团之间连边的数目,度数 D_i 越大,则社团解列的概率越小,即度数与解列概率成反比。

2 社团结构下的相互依存网络理论

从相互依存网络的视角看,GCPS 可建模为一个典型的双层相互依存网络:一次电网为其信息通信网提供电力支撑;同时,信息通信网通过收集各电力站点的状态信息、发送相应的控制命令而成为电力网的神经系统与大脑。为了监测控制的需要,电力站点内同时部署了信息通信设备,因此,电力站点和信息通信站点在物理、信息、功能、地理等方面上均具有相互依存的关系。在国内,各电力站点都部署有数据采集与监视控制 SCADA(Supervisory Control And Data Acquisition)系统以实现对各站点运行状态的监测与控制。而信息网不仅包含各电力场站的信息系统,还包括各级调度中心 CC(Control Center)及光纤

中继节点 FO(Fiber-Optical relay station)。调度中心按照控制权限的不同可划分为国调、网调、省调、市调和县调 5 级,通过相量测量单元(PMU)、SCADA 等量测设备收集其控制区域内电力站点的运行状态信息,并通过能量管理系统(EMS)进行安全校核后将相应的控制命令发送至各站点。由于其重要的作用,调度中心部署有完备的备用发电机组,在主供电厂失效的情况下仍可保持一定时间的正常工作,可认为上述节点为自治节点。

以 IEEE 39 节点系统为例,介绍构建含社团结构的 CPS 模型的过程,并与文献[12]的社团划分效果进行对比。以电网潮流为各边权重,利用 Fast Unfolding 社团划分算法得到 8 个社团,如图 2 所示,模块度为 0.743,与同样情况下文献[12]的模块度 0.7399 相比,划分社团效果更佳。其中每个社团中均包含发电机节点(图 2 中黑色的节点)。各调度数据网按标准 IP 网络分层设计,可分为核心层、骨干层和接入层^[34]。根据电网和通信网具有的部分一对一特点及通信网具有的无标度特性构建对应的通信网结构^[34-35],如图 3 所示。

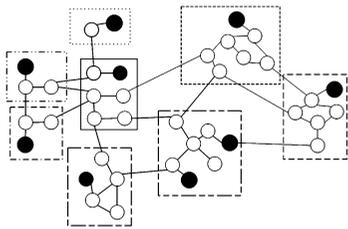
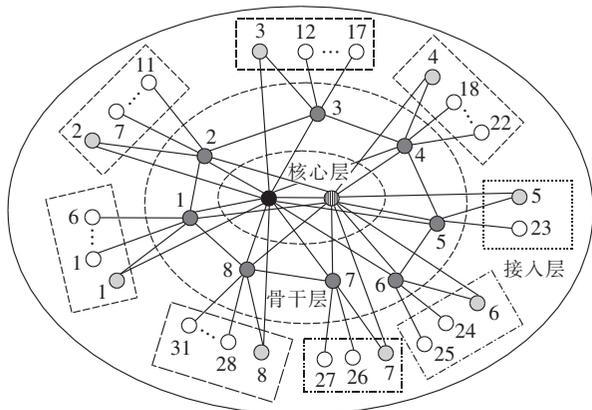


图 2 IEEE 39 节点系统社团结构划分
Fig.2 Community structure partition of IEEE 39-bus system



● 发电厂, ○ 变电站, ● 地调, ● 省调, ● 备调

图 3 IEEE 39 节点系统对应的通信网结构图
Fig.3 Communication network structure of IEEE 39-bus system

考虑到电力网和通信网的实际耦合情况,通信网的社团划分不直接采用算法划分,而是根据电网划分结果进行相应划分,从而更贴近 GCPS 的实际情况。由上文分析可知,核心层和骨干层的调度节点可

认为是自治节点,基于我国电网和通信网之间分层区域化相互依存(通常 A 地区的电网为 A 地区的通信网提供电力支撑,A 地区的通信网控制 A 地区的电网)的实际,接入层的各节点和电网节点一一对应存在相互依存关系,接入层基于电网社团划分结果相应划分为 8 个分区(图 3 中 8 个虚线矩形框对应 8 个社团),同时骨干层含 8 个地调节点。电网和整个通信网符合部分一一对应相互依存关系^[25]。

结合相互依存网络理论和社团理论,对电网和通信网间连锁故障的动态影响过程进行分析,以图 4 为例,电网和通信网同时包含 3 个社团。相互依存网络存在连接边和依存边 2 种类型的边,连接边表示电网中的电力线或通信网中的通信线路,依存边通过网间节点的耦合实现能量或信息的交换^[21,25,27]。社团包括社团内部联系的边和社团之间联系的边,但同种网络中这 2 种边都属于连接边,即其失效不会引起相关节点失效。由于相互依存网络理论较新、发展时间较短,目前应用该理论研究电网/通信网耦合网络基本采用最大连通子集作为指标^[7,21,25,27],考虑只有相互关联的最大连通子集才有潜在的功能性,因此本文以电网和通信网构成的 CPS 的最大连通子集为指标衡量故障后整个系统维持基本工作能力的水平,即本文辨别脆弱社团时考虑的是整个系统的脆弱性而不仅仅是电网的脆弱性。

具体分析如下。

a. 电网的社团 1 被攻击,如图 4 的 Stage 1 所示。

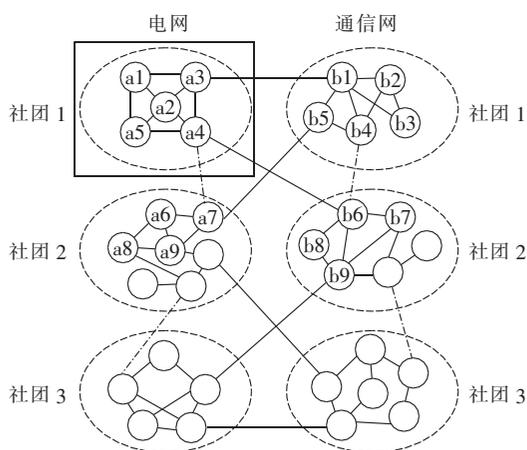
b. 电网中其他社团与社团 1 有联系的边均失效,如电网某变电站被摧毁,则与该变电站相关的母线也会相应失效;a4 与 a7 之间的边失效;因 a3 与 b1 相互依存,则 b1 失效;通信网的社团 1 中所有与 b1 有联系的边失效;a4 与 b6 相互依存,则 b6 失效,通信网社团 2 中所有与 b6 相连的边失效,b4 与 b6 之间的边也失效,如图 4 的 Stage 2 所示。

c. 根据最大连通子集的定义,通信网社团 1 不属于该网的最大连通子集,故通信网社团 1 失效,b5 与 a7 之间连接的边失效。此时没有边被消除,也没有网络分裂的情况发生,系统达到稳定状态,如图 4 的 Stage 3 所示。

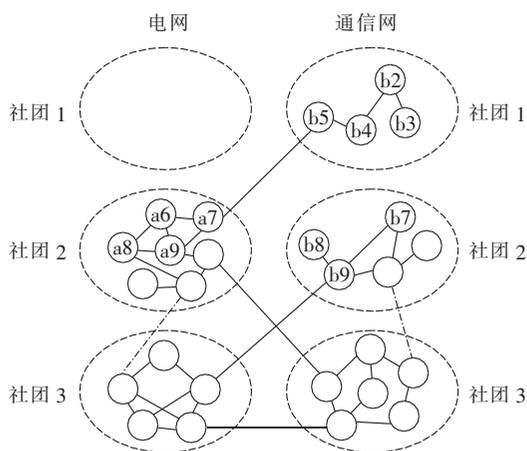
3 算例分析

将电力网和通信网分别抽象为一个无向复杂网络,将电力网的发电站、变电站或者负荷看作节点,电力线看作边;将信息网中的 SCADA 系统、PMU 和调度中心抽象为节点,通信光缆看作边。华中 500 kV 电网含 210 个节点,通信网含 217 个节点,其中包括 7 个调度节点。华中 500 kV GCPS 如图 5 所示。

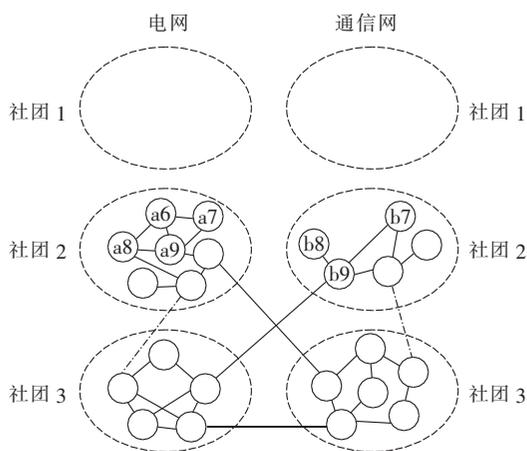
以电网潮流为各边权重,利用 Fast Unfolding 社



(a) Stage 1



(b) Stage 2

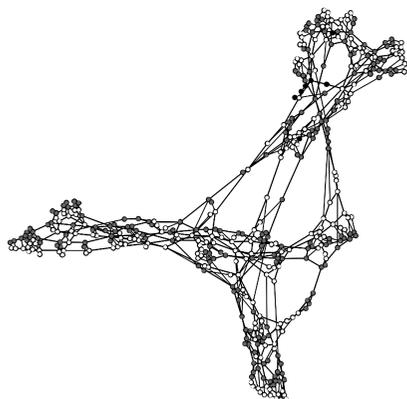


(c) Stage 3

图 4 基于社团结构的电网/通信网动态耦合模型

Fig.4 Dynamic coupling model of electricity power grid/communication network based on community structure

团划分算法计算电网社团划分情况:电网分为 11 个社团,模块度 $Q=0.803$;通信网基于电网社团划分情况和与电网之间的耦合关系相应分为 11 个社团。表 1 为华中 500 kV 电网社团划分情况,包括各社团度数和包含节点个数。由表 1 可知,电网社团中包含节点个数最多的是社团 4,含有 33 个节点,其次为



• 电网节点, • 通信网节点(调度节点), • 通信网节点

图 5 华中 500 kV GCPS

Fig.5 500 kV GCPS in Central China

表 1 华中 500 kV 电网社团划分结果

Table 1 Community partition result of 500 kV power grid in Central China

电网 社团	社团 度数	包含节 点个数	电网 社团	社团 度数	包含节 点个数
1	5	18	7	2	14
2	5	16	8	3	13
3	8	17	9	4	16
4	5	33	10	4	23
5	3	20	11	6	23
6	5	17			

社团 10 和社团 11,各有 23 个节点;社团 3 的度数最大为 8,说明该社团与其他社团联系紧密,社团 11 的度数次之,为 6。对于单个网络而言,度数越大、节点个数越多的社团往往在网络中扮演着重要角色,其鲁棒性对整个系统的鲁棒性有重要作用,但是考虑到电网和通信网之间的相互影响,原先在网络中很重要的电网社团在 CPS 中的重要性可能会改变。

图 6 为华中 500 kV 电网以潮流为边权重,采用 Fast Unfolding 算法进行聚类的社团示意图;图 7 为通信网对应的社团示意图,其中编号为 12 的 7 个节点表示调度节点(图 6、7 中数字编号代表划分的社团编号)。由于考虑了潮流特性,同一社团内的节点不一定属于同一行政区域,而且电网和通信网内部的拓扑结构并不相同,电网具有小世界网络特征,而通信网具有无标度特性,因此实际电网中 2 个节点有边相连,而通信网对应的 2 个节点可能并不存在联系,反之亦然,故图 6、图 7 存在一定差异。

对电网 11 个社团分别进行攻击,按每个社团内节点的度数、介数、随机 3 种方式攻击,电网和通信网对应社团之间连接关系按实际情况连接,考虑电网社团的脆弱性对整个 CPS 鲁棒性的影响,因此以整个系统故障后的最大连通子集比例 G 为指标,结果如图 8 所示。由图 8 可知,3 种攻击方式下,社团 11 都是最脆弱的。一方面,3 种攻击方式下,故障结束后系统达到稳态时系统的最大连通子集比例最

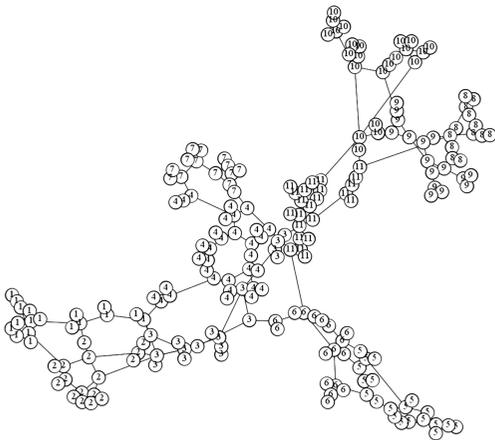


图 6 华中 500 kV 电网社团聚类结果
Fig.6 Community clustering result of 500 kV power grid in Central China

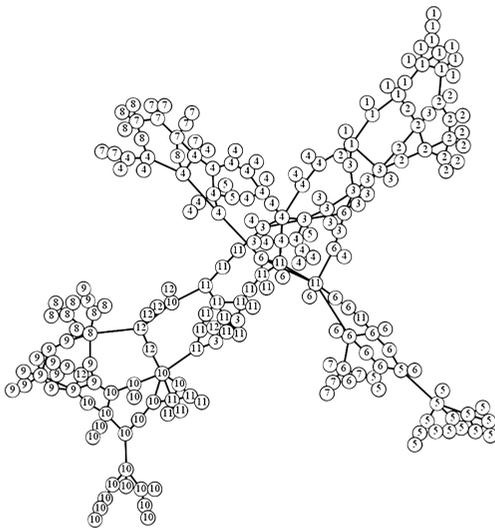


图 7 通信网社团划分结果
Fig.7 Community partition result of communication network

低,即故障结束后,系统能保持工作的节点个数最少;另一方面,3种攻击方式下社团 11 的曲线变化都最陡,即从渗流阈值^[20]的角度考虑,社团 11 也是最脆弱的。单从电网分析而言,一方面社团 2 包含的节点不是最多的,另一方面社团 2 的度数不是最大的。根据相互依存网络理论^[7,21,25,27]可知,电网中社团的重要性不仅和自身在电网中的拓扑重要性有关,与其关联的通信网社团的重要性也有关。根据通信网自身结构可知,通信网的社团 11 中多个节点处于与调度节点紧密联系、通信网的关键位置,一旦该电网社团内节点失效,将对通信网的鲁棒性产生巨大影响,继而通过两网络间的相继耦合影响大幅降低了整个系统的鲁棒性。从介数角度考虑,包含电网介数和通信网介数前 30 的节点中各社团所占比重分别如表 2 和表 3 所示,可知包含电网和通信网介数最高的 30 个节点的均是社团 11 所占比例最大,说明虽然电网中社团 11 的节点个数不是最多的,但其

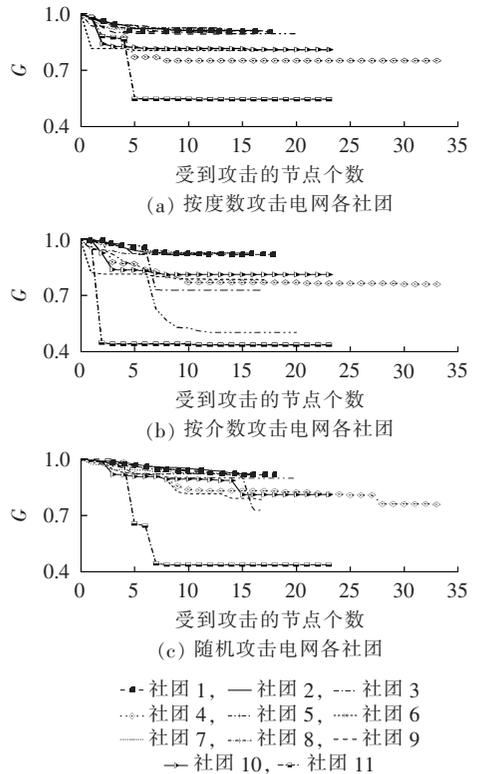


图 8 3 种攻击方式下最大连通子集比例
Fig.8 Ratios of maximum connected subset under three types of attack

中很大一部分是电网中的重要节点,而且其耦合社团通信网中的社团 11 在通信网中也起着重要作用,电网社团 11 受到攻击后,会对整个电网和通信网产生严重的破坏作用。因此社团 11 在整个 CPS 中起着关键作用。

表 2 包含电网介数前 30 节点的各社团所占比重
Table 2 Proportions of communities containing nodes with first 30 betweenness in power grid

社团	所占比重/%	社团	所占比重/%
11	34.48	6	10.34
10	6.9	4	6.9
8	3.45	3	31.03
7	6.9		

表 3 包含通信网介数前 30 节点的各社团所占比重
Table 3 Proportions of communities containing nodes with first 30 betweenness in communication network

社团	所占比重/%	社团	所占比重/%
11	33.33	4	14.81
10	14.81	3	18.52
8	3.7	1	3.7
6	11.11		

相互依存的 2 个网络之间的依存关系不是任意的,而是存在网间相似性的^[36],重要的电网节点更倾向于与重要的通信节点相互依存。基于复杂网络理论,网络节点的重要程度可以用度数或者是介数大

小来表征。结合电网和通信网的拓扑相似性,除实际耦合关系外,本文另设社团内部同配耦合关系(对应社团内节点之间分别按高度数-高度数(DDC)、高介数-高介数(BBC)、高度数-高介数(DBC)建立耦合关系),作为对比探究网络之间不同的耦合方式对于脆弱社团辨识的影响。图 9 为电网社团与对应通信网社团之间节点按 DDC 耦合时 3 种攻击方式下的结果;图 10 为电网社团与对应通信网社团之间节点按 BBC 耦合时 3 种攻击方式下的结果;图 11 为电网社团与对应通信网社团之间节点按 DBC 耦合时 3 种攻击方式下的结果。

由图 9—11 可知,不同的连接耦合关系下,各个电网的社团脆弱性不同。采用网间同配耦合关系后,系统面对蓄意攻击时更脆弱,因为重要的节点与重

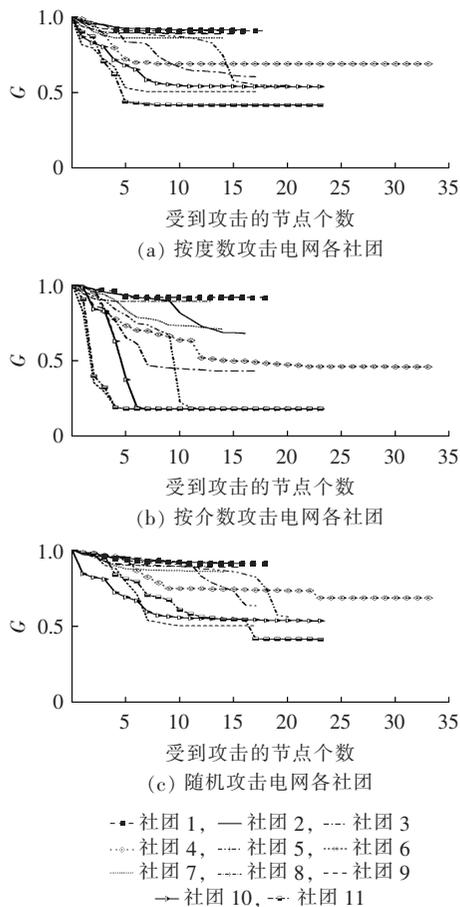
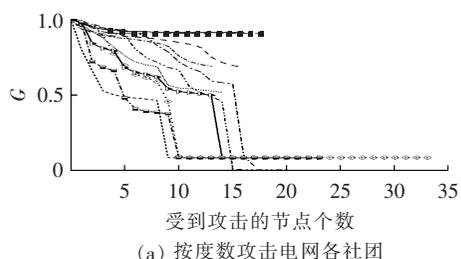


图 9 DDC 耦合时 3 种攻击方式下最大连通子集比例

Fig.9 Ratios of maximum connected subset under three types of attack when in DDC coupling



(a) 按度数攻击电网各社团

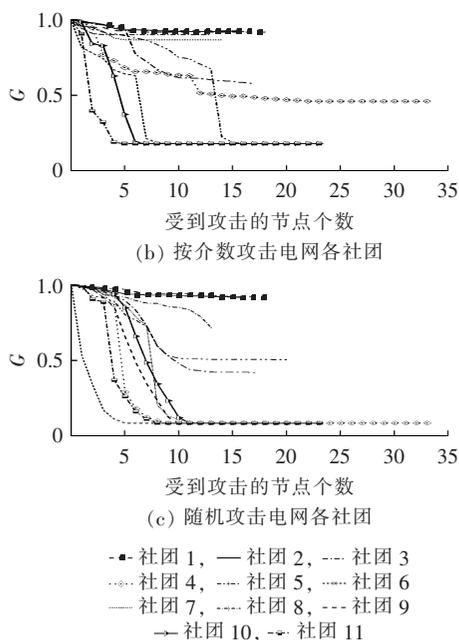


图 10 BBC 耦合时 3 种攻击方式下最大连通子集比例
Fig.10 Ratios of maximum connected subset under three types of attack when in BBC coupling

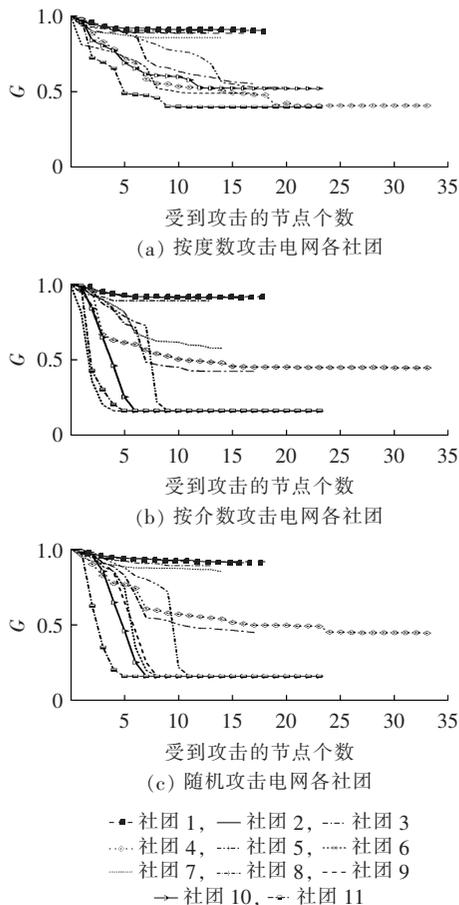


图 11 DBC 耦合时 3 种攻击方式下最大连通子集比例
Fig.11 Ratios of maximum connected subset under three types of attack when in DBC coupling

要的节点相耦合情况下,一旦攻击者知道网络的脆弱节点并将其破坏,另一个网络由于耦合重要节点也将

被破坏。综合比较各图可知,社团 11 仍是电网中较脆弱的社团,但是其他社团随着耦合关系的变化脆弱性变化较大。DDC 耦合关系下,社团 5、6 和 10 的脆弱性相比实际连接关系下明显变高;BBC 耦合关系下,社团 4—6 的脆弱性变高;DBC 耦合关系下,社团 10 和 11 的脆弱性明显变高。综合分析图 8—11 可知,电网和通信网之间采用不同的耦合方式会影响整个 CPS 的鲁棒性,也会影响脆弱社团的评估。从脆弱社团的个数和曲线的最低点来看,华中 500 kV 电网采用实际连接关系,系统的鲁棒性最高。

华中 500 kV GCPS 采用元件级脆弱性分析和社团级脆弱性分析所需的时间分别为 2296.3277 s、785.3201 s,可知社团级脆弱性分析大幅减少了计算时间。

基于社团化进行脆弱性分析的优越性体现在以下 3 个方面。

a. 社团层面的脆弱性分析在一定程度上包含了元件级脆弱性评估的影响,如前文对于高介数节点在各个社团中比例与脆弱社团之间关系的分析;但更注重社团整个单元的脆弱性,脆弱社团中的所有节点不一定全是脆弱性最高的,而是考虑彼此联系、整体均衡下最脆弱的社团环节。这对于节点众多、网络结构复杂的区域级大电网层面的脆弱性分析更具意义。

b. 对于节点众多的互联大电网而言,元件级的脆弱性分析计算量巨大,基于社团化的脆弱性分析可以大幅减少计算量。

c. 以往对脆弱环节的重点脆弱性保护是基于元件级的,但大规模互联电网的元件级脆弱环节可能跨越众多不同地区、不同级别的电网机构,统一实施重点脆弱性保护存在诸多不便。电网的社团特性与潮流特性、电力设备的布局等有关,对于大规模互联电网(区调及以上级别)而言,社团特性受电网分层分区的划分结果影响,同一行政区域内地理位置接近,功率和信息交换更为密切,同一社团内的电力和通信设备设施更可能是归属同一上级(市或省级)或邻近调控中心的,如本文划分的电网脆弱社团 11 中 23 个节点仅有 2 个不属于同一省,而属于地理位置邻近的省。因此以社团为单位进行后续的重点脆弱性保护具有可行性,对于互联大电网而言存在便于模块化的管理和操作、减少运维成本、减少电网跨区域跨级调控不便等优点。

4 结论

本文提出考虑信息融合的电网脆弱社团辨识方法,从介观尺度研究电网在整个 GCPS 中的脆弱环节。在电网/通信网采用不同的网间对应社团内部耦合

连接关系下以不同攻击策略攻击电网各个社团,通过整个 CPS 的最大连通子集来辨识电网脆弱社团。本文研究可得出如下结论。

a. 提出了基于社团化的 GCPS 的脆弱性评估方法。针对传统元件级的 GCPS 脆弱性评估方法进行改进,从介观层面引入社团理论,结合电网和通信网对应分层分区建设的现状提出双层优化脆弱性评估方法。

b. 以 IEEE 39 节点系统为例,结合相互依存网络理论提出了基于社团结构的电网/通信网动态耦合模型,从社团层面分析了 GCPS 发生连锁故障时的动态影响过程,证明所采用社团划分方法的优越性。

c. 针对大规模 GCPS 脆弱性评估存在计算复杂度大的问题,本文所提方法可有效降低计算复杂度,华中 500 kV 电网的算例仿真证明了其有效性。

d. 针对大规模 GCPS 存在脆弱性保护配置难的问题,从社团层面评估电网脆弱环节,有利于模块化、系统化地对电网脆弱环节进行针对性的脆弱性保护,有利于降低电网运维成本,对于大规模互联网的脆弱性分析有很好的应用前景。

参考文献:

- [1] 谭玉东,李欣然,蔡晔,等. 基于电气距离的复杂电网关键节点识别[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):146-152.
TAN Yudong,LI Xinran,CAI Ye,et al. Critical node identification for complex power grid based on electrical distance[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(1):146-152.
- [2] 曹一家,陈晓刚,孙可. 基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路辨识[J]. 电力自动化设备,2006,26(12):1-5.
CAO Yijia,CHEN Xiaogang,SUN Ke. Identification of vulnerable lines in power grid based on complex network theory[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(12):1-5.
- [3] 倪向萍,梅生伟,张雪敏. 基于复杂网络理论的输电线路脆弱度评估方法[J]. 电力系统自动化,2008,32(4):1-5.
NI Xiangping,MEI Shengwei,ZHANG Xuemin. Transmission lines' vulnerability assessment based on complex network theory [J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(4):1-5.
- [4] MEI Shengwei,ZHANG Xuemin,CAO Ming. Power grid complexity [M]. Berlin,Germany:Springer Science & Business Media,2011: 1-28.
- [5] 梁颖,方瑞明,卢小芬,等. 基于复杂网络理论的电力系统脆弱线路辨识研究现状[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(20):151-155.
LIANG Ying,FANG Ruiming,LU Xiaofen,et al. Research status of power system vulnerable line identification based on complex-network theory [J]. Power System Protection and Control,2012, 40(20):151-155.
- [6] 陈晓刚,孙可,曹一家. 基于复杂网络理论的大电网结构脆弱性分析[J]. 电工技术学报,2007,22(10):138-144.
CHEN Xiaogang,SUN Ke,CAO Yijia. Structural vulnerability analysis of large power grid based on complex network theory [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2007,22 (10):138-144.

- [7] 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 Dichen,JI Xingpei,WANG Bo,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.
- [8] 魏震波,刘俊勇,程飞,等. 利用社区挖掘的快速无功电压分区方法[J]. 中国电机工程学报,2011,31(31):166-172.
WEI Zhenbo,LIU Junyong,CHENG Fei,et al. Fast power network partitioning method in Mvar control space based on community wining[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(31):166-172.
- [9] 廖永锋. 基于复杂网络理论的电网结构脆弱性评估指标研究[D]. 成都:电子科技大学,2015.
LIAO Yongfeng. Research on vulnerability assessment index of power grid structure based on complex network theory[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China,2015.
- [10] 王淑良. 基于复杂网络理论的基础设施系统脆弱性分析[D]. 武汉:华中科技大学,2012.
WANG Shuliang. Vulnerability analysis of infrastructure systems based on complex network theory[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2012.
- [11] 于琳,孙莹,徐然,等. 改进粒子群优化算法及其在电网无功分区中的应用[J]. 电力系统自动化,2017,41(3):89-95.
YU Lin,SUN Ying,XU Ran,et al. Improved particle swarm optimization algorithm and its application in reactive power partitioning of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(3):89-95.
- [12] 潘高峰,王星华,彭显刚,等. 复杂网络的社团发现方法在电网分区识别中的研究[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(13):116-121.
PAN Gaofeng,WANG Xinghua,PENG Xiangang,et al. Study of power grid partition identification method based on community structure detection[J]. Power System Protection and Control, 2013,41(13):116-121.
- [13] 倪向萍,阮前途,梅生伟,等. 基于复杂网络理论的无功分区算法及其在上海电网中的应用[J]. 电网技术,2007,31(9):6-12.
NI Xiangping,RUAN Qiantu,MEI Shengwei,et al. A new network partitioning algorithm based on complex network theory and its application in Shanghai Power Grid[J]. Power System Technology,2007,31(9):6-12.
- [14] 魏震波. 复杂网络社区结构及其在电网分析中的应用研究综述[J]. 中国电机工程学报,2015,35(7):1567-1577.
WEI Zhenbo. Overview of complex networks community structure and its applications in electric power network analysis[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(7):1567-1577.
- [15] 林振智,文福拴,周浩. 基于复杂网络社团结构的恢复子系统划分算法[J]. 电力系统自动化,2009,33(12):12-16.
LIN Zhenzhi,WEN Fushuan,ZHOU Hao. A new algorithm for restoration subsystem division based on community structure of complex network theory[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(12):12-16.
- [16] 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.
- [17] 赵俊华,文福拴,薛禹胜,等. 电力信息物理融合系统的建模分析与控制研究框架[J]. 电力系统自动化,2011,35(16):1-8.
ZHAO Junhua,WEN Fushuan,XUE Yusheng,et al. Modeling analysis and control research framework of cyber physical power system[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(16):1-8.
- [18] 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.
- [19] 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 modelling and security assessment:motivation and ideas[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(6):1481-1489.
- [20] 王冰玉,孙秋野,马大中,等. 能源互联网多时间尺度的信息物理融合模型[J]. 电力系统自动化,2016,40(17):13-21.
WANG Bingyu,SUN Qiuye,MA Dazhong,et al. A cyber physical model of the energy internet based on multiple time scales[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(17):13-21.
- [21] BULDYREV S V,PARSHANI R,PAUL G,et al. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks[J]. Nature,2010,464(7291):1025-1028.
- [22] CAI Ye,CAO Yijia,LI Yong,et al. Cascading failure analysis considering interaction between power grids and communication networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2016,7(1):530-538.
- [23] 石立宝,简洲. 基于动态攻防博弈的电力信息物理融合系统脆弱性评估[J]. 电力系统自动化,2016,40(17):99-105.
SHI Libao,JIAN Zhou. Vulnerability assessment of cyber physical power system based on dynamic attack defense game mode[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(17):99-105.
- [24] PARABDEHGHEIBI M,MODIANO E. Robustness of interdependent networks;the case of communication networks and the power grid[C]//Global Communications Conference. Atlanta,GA, USA:IEEE,2013:2164-2169.
- [25] 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. Review on interdependent networks theory and its applications in the structural vulnerability analysis of electrical cyber-physical system[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(17):4521-4533.
- [26] 梅生伟,王莹莹,陈来军. 从复杂网络视角评述智能电网信息安全研究现状及若干展望[J]. 高电压技术,2011,37(3):672-679.
MEI Shengwei,WANG Yingying,CHEN Laijun. Overviews and prospects of the cyber security of smart grid from the view of complex network theory[J]. High Voltage Engineering,2011,37(3):672-679.
- [27] 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 Xingpei,WANG Bo,DONG Zhaoyang,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.
- [28] 韩宇奇,郭创新,朱炳铨,等. 基于改进渗流理论的信息物理融合电力系统连锁故障模型[J]. 电力系统自动化,2016,40(17):30-37.
- HAN Yuqi, GUO Chuangxin, ZHU Bingquan, et al. Model cascading failures in cyber physical power system based on improved percolation theory[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(17):30-37.
- [29] 赵彩虹,马晓光. 基于遗传算法的局部电压分域新方法[J]. 电网技术,2002,26(9):47-50.
- ZHAO Caihong, MA Xiaoguang. A novel method to form partial voltage regions based on genetic algorithm[J]. Power System Technology,2002,26(9):47-50.
- [30] 刘大鹏,唐国庆,陈珩. 基于 Tabu 搜索的电压控制分区[J]. 电力系统自动化,2002,26(3):18-22.
- LIU Dapeng, TANG Guoqing, CHEN Heng. Tabu search based network partitioning for voltage control[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(3):18-22.
- [31] 王先培,朱国威,贺瑞娟,等. 复杂网络理论在电力 CPS 连锁故障研究中的应用综述[J]. 电网技术,2017,41(9):2947-2956.
- WANG Xianpei, ZHU Guowei, HE Ruijuan, et al. Survey of cascading failures in cyber physical power system based on complex network theory[J]. Power System Technology,2017,41(9):2947-2956.
- [32] NEWMAN M E, GIRVAN M. Finding and evaluating community structure in networks[J]. Physical Review E Statistical Non-linear & Soft Matter Physics,2004,69(2):026113.
- [33] BLONDEL V D, GUILLAUME J L, LAMBIOTTE R, et al. Fast unfolding of communities in large networks[J]. Journal of Statistical Mechanics Theory & Experiment,2008,2008(10):155-168.
- [34] 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 Juan, LI Zhihuan, DUAN Xianzhong. Structural feature analysis of the electric power dispatching data network[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(4):53-59.
- [35] BARASI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science,1999,286(5439):509-512.
- [36] PARSHANI R, ROZENBLAT C, IETRI D, et al. Inter-similarity between coupled networks[J]. Epl,2010,92(6):68002.

作者简介:



汪勋婷

汪勋婷(1994—),女,安徽滁州人,硕士研究生,主要研究方向为信息物理融合系统(**E-mail**:wangxuntong1994@163.com);

王波(1978—),男,湖北武汉人,副教授,博士,主要研究方向为综合能源系统、能源大数据(**E-mail**:whwdwb@whu.edu.cn)。

Assessment method of vulnerable communities in power grid considering cyber-physical integration

WANG Xuntong, WANG Bo

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In view of the high computational complexity and vulnerability protection configuration difficulties when the vulnerability assessment of grid cyber-physical system of component level is applied to an actual large-scale power cyber-physical system, an assessment method of vulnerable communities in power grid considering cyber-physical integration is proposed, considering the mesoscopic local characteristics and community structure of networks. Based on Fast Unfolding algorithm, the power grid is divided into several communities taking power flow as edge weights, the communities of communication network is divided according to the hierarchical partition status and the actual coupling relationship between the power grid and the communication network. Simulative results of IEEE standard system prove the superiority of the community partition method. Under different coupling connections, each community in the power grid is attacked by different strategies, and the vulnerable communities of the power grid are assessed based on the ratio of maximum connected subset with fault in the cyber-physical system. The assessment method conforms to the present hierarchical partition status in the power grid and the communication network and can reduce the calculation complexities and difficulties of vulnerability protection configuration. Simulative results of 500 kV power grid cyber-physical system in Central China verify the feasibility of the proposed method.

Key words: cyber-physical system; interdependent network; community theory; vulnerable communities; vulnerability assessment; robustness