

基于复杂网络理论的综合能源系统网络安全研究

沈超¹, 华梁¹, 虎啸¹, 古丹妍²

(1. 国网江苏省电力有限公司无锡供电分公司, 江苏 无锡 214000; 2. 东南大学, 南京 210018)

摘要: 综合能源系统作为能源互联网的底层重要物理形态,在技术的不断革新下,其规模扩展迅速,各种能源的高度整合对系统的稳定性和安全性提出了越来越高的要求。文章以蓄意攻击为背景,基于复杂网络理论对综合能源系统网络安全开展相关研究。文中针对考虑综合能源系统的脆弱环节,通过推导气网流量传输分布因子,并应用能源集线器构建有向加权的综合能源系统拓扑模型。在此基础上,引入最大流和信息熵理论,分别提出针对线路和节点的脆弱环节辨识方法。构建了由 IEEE-30 节点电网和改进的 11 节点中压配气网组合而成的系统,对其进行了脆弱性分析,并通过对比不同攻击策略下典型综合能源系统的鲁棒性验证了所提出模型及方法的有效性。

关键词: 综合能源系统; 脆弱环节; 复杂网络理论; 最大流; 鲁棒性

DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2026.03.005

中图分类号: TM732

文献标识码: B

文章编号: 1001-1390(2026)03-0048-11

Research on network security in integrated energy system based on complex network theory

SHEN Chao¹, HUA Liang¹, HU Xiao¹, GU Danyan²

(1. Wuxi Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Wuxi 214000, Jiangsu, China.

2. Southeast University, Nanjing 210018, China)

Abstract: The integrated energy system, as a crucial physical form supporting the energy Internet, has rapidly expanded in scale under the continuous wave of technological innovation. The high integration of various energy sources imposes increasingly stringent requirements on the stability and security of system. This paper, set against the backdrop of deliberate attacks, conducts relevant research on the network security of integrated energy system using complex network theory. The study initially focuses on identifying vulnerable links within the integrated energy system. It begins by deriving distribution factors for gas network flow and applies an energy hub to construct a directed weighted topology model for the integrated energy system. Building upon this foundation, the paper introduces maximum flow and information entropy theories, proposing vulnerability identification methods for both lines and nodes. To validate the effectiveness of the proposed model and methods, a system composed of an IEEE-30 node power grid and an improved 11-node medium-pressure gas network is analyzed for vulnerability. The study compares the robustness of typical comprehensive energy systems under different attack strategies, confirming the validity of the proposed model and methods.

Keywords: integrated energy system, vulnerable link, complex network theory, max-flow, robustness

0 引言

面对化石能源日益匮乏与生态环境持续恶化的双重挑战,综合能源系统(integrated energy system, IES)作为解决能源供需矛盾的关键方案应运而生。当前,在“双碳”战略目标的指引下,能源电力行业正加速数字化转型,通过深化应用大数据、

云计算、物联网、移动互联网、人工智能及区块链等前沿技术(即“大云物移智链”),极大地推动了能源系统的融合创新与智能化升级。电力等传统工业控制系统在早期构建阶段多遵循“重功能、轻安全”的设计导向,导致其缺乏内生安全设计。随着信息技术与物理系统的深度融合,系统先天性防护缺失导致系统脆弱,进而使得针对工控系统的网络攻击与安全事件呈高发态势^[1-2]。2010年,Stuxnet病毒

基金项目: 国网江苏省电力有限公司科技项目资助(J2022130)

造成伊朗布尔什尔核电站大量离心机报废;2015 年,对乌克兰电网的网络攻击造成了三个电力企业管理的区域大规模停电;2017 年,黑客向继电保护装置发送虚假跳闸指令,造成印度大停电。该类事件无一不造成了巨大的损失,引发了学者对于电力系统在网络信息化背景下的安全问题的新思考。脆弱性评价是电力系统安全评估体系的重要组成部分,快速精准地完成对综合能源系统的脆弱环节辨识,可为系统的安全防御提供决策依据。因此对脆弱环节辨识方法进行研究具有重要的工程应用价值^[3]。

综合能源系统属于多能量系统,采用网络流量理论的分析方法成为主流:文献[4]通过对多能流系统静态模型进行求解,提出了面向能源互联网的多能流静态安全分析的概念和方法;文献[5]基于网络流量理论建立了 IES 模型,定量分析了不同情景下天然气供应的风险;文献[6]总结了四种基于网络流量的电-气耦合数学模型,并在此基础上通过对皮尔逊相关系数、绝对差异和组件一致性百分比这三种脆弱性评估指标的比较,优选出了最适合于综合能源系统脆弱性分析的模型。在电力系统方面,基于复杂网络理论方法的输配电系统脆弱性分析被认为是可行的,因此有学者对其进行了在综合能源方面的应用拓展。文献[7]提出了一种用于分析传输网络基础设施和识别关键要素的随机流模型;文献[8]证明了综合能源系统具有复杂网络特性,通过建立无权无向网络分析了综合能源系统的健壮性;文献[9]在此基础上,引入带权重线路介数,对综合能源系统进行了脆弱环节辨识,但仍缺乏对能源网络潮流特性的考虑。

基于此,文章在前述工作的基础上,进一步探究了基于复杂网络的综合能源系统脆弱环节辨识方法。文章首先推导了气网流量传输分布因子,结合线路容量提出了综合能源系统的线路网络传输能力指标,采用能源集线器建立了综合能源系统动态有向加权拓扑模型。在此基础上,引入最大流理论和信息熵理论,分别提出针对线路和节点的脆弱环节辨识方法。最后对 30 节点电网-11 节点气网的互联系统进行了脆弱环节辨识分析,通过不同策略攻击下的系统鲁棒性结果对比,验证了该辨识方法的有效性。

1 基于复杂网络的综合能源系统建模

将复杂网络理论应用于综合能源系统必须先构建综合能源系统的图模型。图模型构建分为两部分:1)通过能源集线器抽取综合能源系统的耦合

结构,并依据规则将系统其他部分抽象为图的节点和边,构成系统拓扑图;2)通过功率传输分布因子和气体流量传输分布因子计算网络传输能力,对网络拓扑进行加权。

1.1 综合能源系统拓扑

能源集线器(energy hub, EH)最早由文献[10]提出,可同时为不同能源的输入输出提供接口,实现能源的转换、存储、分配等功能。

典型能源集线器结构如图 1 所示。

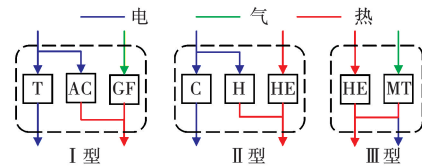


图 1 能源集线器的三种典型结构

Fig. 1 Three typical structures of energy hubs

图 1 中元件分别为变压器(transformer, T),空调(air conditioner, AC),燃气锅炉(gas furnace, GF),压缩机(compressor, C),电加热器(heater, H),换热器(heat exchange, HE)和微型燃气轮机(micro turbine, MT)。

利用能源集线器,可将电网,气网,热网等异质能源网络进行耦合互联,构成综合能源系统的通用结构^[11]。文章聚焦电气耦合的综合能源系统,利用能源集线器实现电网和气网的耦合,并在此基础上通过将系统中的电源,负荷,连接点,耦合元件抽象成节点,将线路,管道等抽象成边,形成综合能源系统网络图。

基于 I 型能源集线器模型,构建了综合能源系统的复杂网络拓扑如图 2 所示。

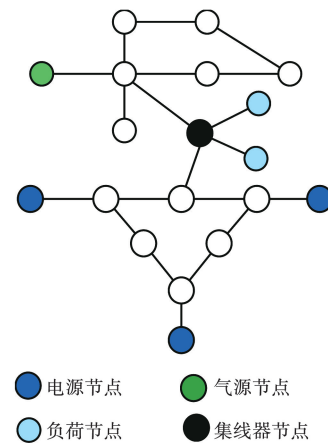


图 2 能源集线器下综合能源系统复杂网络图

Fig. 2 Complex network diagram of integrated energy system under energy hub

在该拓扑中,耦合单元发挥枢纽作用:源侧接口分别与电力网络及天然气网络的节点建立物理连接,荷侧由两个独立负荷构成,以此表征系统的终端总需求。

1.2 电网功率传输分布因子

功率传输分布因子^[12] (power transfer distribution factor, PTFDF)定义为:

$$PTDF_{st}^m = \Delta P_m / \Delta P_{st} \quad (1)$$

式中:PTDF_{st}^m表征了源-荷节点对(s, t)间的功率传输对系统支路潮流的影响灵敏度。其中,ΔP_{st}定义为从源节点s注入并由终端节点t吸收的有功功率交换量;ΔP_m对应于在此功率传输情景下,网络中任意线路m上所引起有功潮流响应值。

由此可见,PTDF本质上刻画了特定支路l在源-荷节点对(s, t)进行有功传输时的分流权重。该参数表现出显著的拓扑位置敏感性:针对网络中的同一条线路,当功率注入与流出的节点对发生改变时,其对应的灵敏度因子数值也会呈现出差异化特征。

基于网络节点导纳矩阵的拓扑特性进行推演,该功率传输分布因子的数学表达式可描述为^[11]:

$$PTDF_{st}^{ij} = (X_{is} - X_{it} - X_{js} + X_{jt}) / x_{ij} \quad (2)$$

式中:x_{ij}表征了连接节点i与j的线路电抗参数;X_{mn}对应于系统节点电纳矩阵经求逆运算后,位于(m, n)坐标处的矩阵元素值。

1.3 气网管段流量分配因子

基于电-气类比原理,参照电路中电阻的物理定义,可构建流体网络中的流阻模型:该参数R在数值上等于流体元件两端的压力势差Δp与流经该截面的流体通量之商q。

$$R = \Delta p / q \quad (3)$$

为降低系统建模的复杂度,借鉴电力系统分析方法,将天然气网络等效为“直流”架构。在此假设下,忽略气体传输过程中的暂态延迟(即管存效应),认为流体状态变量具有时不变性,仅表现为在稳态工作点附近的微小摄动,整体处于水力平衡的稳定状态。

与电力系统参数的恒定性不同,流体网络的水力阻抗表现出显著的流态依赖性(即非线性特征)。为构建适用的工程模型,针对中低压天然气配气网络通过以下简化策略进行建模:

1)空间维度的降阶:采用一维流体力学模型,

忽略管道径向的参数梯度,假设压力与流速在横截面上呈均匀分布;

2)热力学环境设定:鉴于管道深埋于地下的特性,假设管壁与土壤处于热平衡状态,即管内工质遵循等温传输规律;

3)流态与组件假设:视管内天然气为充分发展的紊流状态,且不考虑发生阻塞现象。同时,将网络简化为无源的被动系统,忽略压缩机等增压设备的接入^[13-14];

4)动态特性的忽略:基于准稳态运行前提,忽略气体的惯性效应(流感)与管存效应(流容),仅考虑由管路摩擦引起的压力损失,即认为系统处于定常流动状态。

遵循流体力学范畴内的泊肃叶定律,流经管道的体积流量与两端压力降之间的定量关系可描述为:

$$Q_v = \pi D^4 \Delta P / (128 \mu l) \quad (4)$$

式中:D与l分别表征圆形管道的内径及其轴向长度;μ指代流体的动力粘度。在本研究的参数设置中,天然气介质的粘性系数取典型值1.075 8 Pa^[15]。

基于上述分析,对于处于层流状态的圆形管路,其线性流阻的数学表达式可推演为:

$$R_v = 128 \mu l / (\pi D^4) \quad (5)$$

针对上述层流流动工况,其对应的沿程摩擦阻力系数可依据式(6)进行求解:

$$\lambda_L = 64 / R_e \quad (6)$$

针对大口径输气管道场景,借助Panhandle与Weymouth经验公式进行推演,可确立雷诺数(R_e)与管道直径之间的耦合关系:

$$R_e = 93\,368 \cdot D^{0.4962} \quad (7)$$

通过引入流体粘性参数及雷诺数进行联立求解,可推演出处于完全湍流区域时管道水力阻抗表达式:

$$R_{iT} = 0.006 \cdot D^{4.1631} l \quad (8)$$

遵循质量守恒与能量守恒的基本物理原则,天然气管网的水力平衡状态需同时受两大拓扑约束支配:即表征流体连续性的节点流量平衡方程,以及表征势能闭合的回路压力方程。

$$Aq = Q \quad (9)$$

式中:A定义为网络的节点-支路拓扑关联矩阵;q为支路流量向量;Q为节点负荷向量。

若选取p₀作为网络参考节点(平衡节点)的基

准气压,则变量 p_i^r 被定义为相对压强值:

$$p_i^r = p_0 - p_i \quad (10)$$

式中: p_i 为节点 i 受到的压力。则管网压力降方程组表示为:

$$\Delta P = A^T P^r \quad (11)$$

式中: p^r 表示节点的相对压力。

考虑管道流动方程:

$$\Delta P = R_{vT} q \quad (12)$$

式中: R_{vT} 为 $m \times m$ 的管网流阻对角矩阵,形如:

$$\begin{bmatrix} R_{vT1} & & \cdots & & \\ & R_{vT2} & & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & \\ & & & R_{vTM} & \end{bmatrix} \quad (13)$$

联立式(11)、式(12)可得:

$$R_{vT} q = A^T P^r \quad (14)$$

显然 R_{vT} 具有逆矩阵,因此有:

$$q = R_{vT}^{-1} A^T P^r \quad (15)$$

代入节点流量方程有:

$$A R_{vT}^{-1} A^T P^r = Q \quad (16)$$

设 $A R_{vT}^{-1} A^T = Y$, 令 $Z = Y^{-1}$, 有:

$$P^r = Z Q \quad (17)$$

设定在源节点 s 与负荷节点 t 之间施加单位强度的流量传输激励,由此激发的节点相对电压波动量可表示为:

$$\Delta P^r = Z \Delta Q \quad (18)$$

即:

$$\begin{bmatrix} \Delta p_1^r \\ \Delta p_2^r \\ \vdots \\ \Delta p_i^r \\ \vdots \\ \Delta p_n^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & & \\ & & \ddots & \\ \vdots & & z_{is} & z_{it} \\ & & & \ddots \\ z_{n1} & \cdots & & z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ +1 \\ -1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

可知:

$$\Delta p_i^r = z_{is} - z_{it} \quad (20)$$

设管道两端节点为 ij ,则在管道 l 上有:

$$\Delta(\Delta P) = \Delta p_i^r - \Delta p_j^r = (z_{is} - z_{it}) - (z_{js} - z_{jt}) \quad (21)$$

因此,在管段 ij 引起的流量变化为:

$$\Delta q = \frac{\Delta(\Delta P)}{R_{vTij}} = \frac{(z_{is} - z_{it}) - (z_{js} - z_{jt})}{R_{vTij}} \quad (22)$$

引入气体流量传输分布因子,定义为:

$$GTDF_{st}^{ij} = \frac{(z_{is} - z_{it}) - (z_{js} - z_{jt})}{R_{vTij}} \quad (23)$$

1.4 网架结构对潮流的承载水平

传输支路(含电力线路及天然气管道)的实际输送效能,不仅取决于由网络拓扑决定的潮流分布规律,更受制于元件自身的物理额定容量极限。基于对上述双重约束机制的耦合考量,构建了如下网络传输能力评估指标:

$$tr_{ij}^{st} = \frac{C_{ij}}{|F_{ij}^{st}|} \quad (24)$$

式中: s, t 分别指代能源系统的注入端(源节点)与汲取端(负荷节点); ij 表示连接该源荷路径的任意传输支路,其物理传输极限记为 C_{ij} ; 变量 F_{ij}^{st} 为刻画了由节点对 (s, t) 的传输行为在支路 ij 上激发的潮流分布响应(灵敏度)。

2 基于最大流理论的网络脆弱环节辨识

2.1 最大流理论

作为运筹学与图论的经典命题,网络最大流问题(maximum flow problem)的研究最早可追溯至 20 世纪 50 年代中期。其核心目标在于:在严格受限的网络拓扑约束下,求解从源节点至汇节点的传输通量极限,以实现系统传输潜能的最大化挖掘。通常设定 F_{ij} 为支路 (i, j) 的物理容量边界(即允许流过的最大值),而 f_{ij} 则表征该支路当前的实际承载流量。

针对网络拓扑结构中的任一传输支路 f ,其运行状态均需遵循如下约束:

$$0 \leq f_{ij} \leq F_{ij} \quad (25)$$

遵循流量连续性公理,在网络 A 的拓扑结构中,任一节点均需维持通量平衡状态:即汇入该节点的流量累加值,必须严格等同于由该节点引出的流量总和^[16],即:

$$\sum_{(i,j) \in A} f_{ij} = \sum_{(i,j) \in A} f_{ji} \quad (i \neq \{G, D\}) \quad (26)$$

式中: G, D 分别表征网络 A 拓扑结构中的注入节点子集(源)与流出节点子集(汇)。当系统的流量分布严格遵循上述所有约束限制时,该状态即构成了一组针对源-汇节点的有效可行流。

基于上述理论模型,网络最大流问题通常可转化为组合优化或线性规划命题进行求解。其中, Ford-Fulkerson 标号法因其鲁棒性而被广泛采用。该算法的核心机制是构建残差网络并执行迭代搜索:不断探测并移除源汇之间的增广路径,直至残差图中不再存在可行通路。最终,算法历次迭代所获流量的代数和即为系统的最大传输容量,而各支

路对应的累积流量则表征了该物理通道的实际承载状态。

将经典的图论最大流算法迁移至综合能源系统分析框架中,以此构建一种量化评估机制,用于测度网络中任意传输支路在辅助特定源-荷节点对进行能量交换时的实际承载潜能

2.2 线路传输贡献度指标

假设在源节点 s 与负荷节点 t 的拓扑连接中,存在总计 L 条有效传输路径。其中,特定线路 ij 被包含在 l 条路径之中。综合考量网络最大流理论与实际能源潮流的分布特性,针对单一源-荷节点对的线路传输贡献度指标可定义如下:

$$\omega_{ij}^{st} = \maxflow(tr^{st}) \quad (27)$$

式中: \maxflow 指代 MATLAB 仿真环境下的内置函数(或标准接口)。该指令基于标号法(Labeling Algorithm)原理进行逻辑运算,旨在精确解算出源节点 s 与汇节点 t 之间的最大传输通量。

将上述定义进一步推广至系统全局,若综合考量网络中存在的多组源-荷交易对,则特定线路 ij 的综合传输贡献度可表示为各分量之和。

$$\omega_{ij} = \sum_{s \in G} \sum_{t \in D} \omega_{ij}^{st} \quad (28)$$

2.3 节点传输贡献度指标

不同节点对于网络结构和功能的影响大不相同。少量的重要节点在信息传播中承担更多的信息量,移除这些节点会对网络造成一定的影响。对于一个节点被其他节点选作为邻居节点的概率越大,说明该节点越重要。综合考量网络节点的拓扑度分布特征与边权耦合状况,本文引入信息熵理论对‘节点度’这一概念进行了广义重构。其核心动因在于:熵函数不仅能够量化节点连接强度的累积总量,更能敏锐捕捉强度分布的均衡性,从而为评估节点在系统中的重要性提供了更为全面的测度视角^[17]。

针对网络中的任意节点 i ,对其所有邻接支路 ij 的线路传输贡献度指标实施归一化运算:

$$\lambda_{ij} = \frac{\omega_{ij}}{\sum_j \omega_{ij}} \quad (29)$$

式中: j 为所有与 i 相连的节点。

基于香农信息熵的理论框架,构建了量化节点在网络传输中重要性的指标节点传输贡献度,其数学定义如下:

$$S_{ij} = (1 - \sum_j \lambda_{ij} \log \lambda_{ij}) \sum_j \omega_{ij} \quad (30)$$

2.4 综合能源系统脆弱环节辨识流程

图 3 清晰展示了综合能源系统脆弱环节的辨识实施路径,该流程系建立在上述量化评估指标的基础之上。

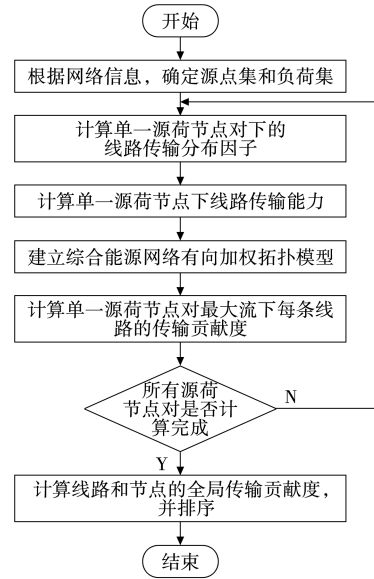


图 3 综合能源系统脆弱环节辨识流程

Fig. 3 Process of vulnerable link identification in integrated energy system

步骤一:系统参数初始化与集合定义,提取现有的网络拓扑数据,涵盖电力线路的电气参数(阻抗、容量、长度)及天然气管网的几何物理参数(管径、管长等)。同步界定系统的注入与流出边界:将常规发电机组与虚拟气源划入源节点集,而将抽象后的终端用户需求划入负荷节点集;

步骤二:单点对加权拓扑模型构建,针对任意指定的源-荷节点对,测算其线路传输分布因子,并耦合物理容量约束以推导线路传输能力指标。以此指标作为网络边权,建立基于复杂网络理论的单源-单荷有向加权拓扑模型;

步骤三:基于最大流理论的贡献度量,在上述加权模型框架下,引入网络最大流算法进行求解,从而精确计算出该特定源-荷输送路径下,各传输支路所承担的传输贡献度指标;

步骤四:全局脆弱性辨识与评估。遍历系统内所有潜在的源-荷交易对,迭代执行上述步骤,综合计算并获得全局维度的线路及节点贡献度。依据指标数值进行降序排列,识别系统的薄弱环节:贡献度越高的元件(线路或节点),其承载压力越大,表征出的脆弱性特征越显著。

3 脆弱环节辨识方法验证评估

系统的脆弱环节是针对系统整体鲁棒性而言的,环节脆弱性和系统鲁棒性之间通常存在这样一种关系:环节脆弱性越高,对其实施破坏,系统鲁棒性受到的冲击越大。因此,通过对比不同连锁攻击方式下的系统鲁棒性可验证脆弱环节辨识方法的有效性^[18-19]。

3.1 鲁棒性评估指标

1) 网络破碎度

$$S = \frac{N_{\max}}{N_{\text{all}}} \quad (31)$$

式中: N_{\max} 表征了网络在遭受攻击或故障后,残留拓扑中最大巨分量所涵盖的节点规模; N_{all} 对应于原始网络架构下的节点总数。指标 S 的数值与网络的结构完整性呈正相关; S 值越低意味着网络的碎片化程度越剧烈,进而指示系统处于高破碎状态,其运行可用性与结构鲁棒性也随之显著下降^[20]。

2) 连通因子

$$\tau = \frac{m}{m'} \quad (32)$$

式中: m 为受破坏前子图的个数; m' 为受破坏后子图的个数; τ 值越小表明网络破碎度越大,健壮性越差。

3) 失负荷比例

综合能源系统的核心使命在于保障终端用户的用能连续性,这一服务属性使其区别于普通的物理拓扑网络。为此,文章借鉴电力系统经典的 $N-1$ 静态安全分析准则,构建了以供能缺口为导向的鲁棒性评估框架,正式引入失负荷比例作为量化指标,其定义如下:

$$\eta = \frac{S - S'}{S} \times 100\% \quad (33)$$

式中: S 表征了系统在初始完整状态下的最大负荷供给能力, S' 代表在遭受外部攻击或故障扰动后,系统所能维持的剩余有效供能水平。

由于电-气综合能源网络为异质能源网,无法直接进行比较,为此通过天然气功率折算公式进行衡量标准的统一,天然气功率折算公式为^[9]:

$$W = \varepsilon_g H_0 q \quad (34)$$

式中: W 表征了天然气经转化后得到的等效功率;

H_0 、 q 分别指代燃料的低位热值及其质量流量输入; ε_g 对应于天然气在燃烧发电过程中的电能转换效率。

3.2 鲁棒性测试策略

系统鲁棒性反映了网络架构在组件缺失工况下的可用性余量。针对元件失效的诱因,可归纳为两种典型场景:1) 随机性故障,这涵盖了自然环境侵蚀、内部机械故障以及无特定目标的外部骚扰,其特征是故障点的分布具有统计随机性;2) 策略性攻击,即攻击方基于对系统拓扑连接关系的深度解析,刻意筛选高价值节点(如高介数、高连接度节点)实施精确打击,从而破坏系统的连通性并攫取最大化的破坏收益。

为了全面测度系统的抗毁边界,设计了三种典型的拓扑扰动(节点/支路移除)策略:

1) 随机故障模拟(random failure):模拟自然灾害或非针对性攻击场景。不依赖任何网络拓扑信息,采用蒙特卡洛方法在网络中随机选取并切除一定比例的节点或连线;

2) 将该指标从大到小进行降序排列,依次移除序列顶端的关键元件,模拟对系统能量传输核心路径的精准打击;

3) 基于介数中心性的针对性攻击:利用图论中的介数(betweenness)参数衡量元件的枢纽地位。按照介数中心性数值的高低生成攻击列表,优先剔除具有高介数特征的‘桥接’线路或节点,以快速瓦解网络的连通性。

4 算例分析

4.1 算例网络构建

为了验证所提方法有效性,以 I 型能源集线器为耦合核心,搭建了电-气综合能源系统的仿真测试平台,如图 4 所示。在子系统选型上,电力网络采用改进后的 IEEE-30 节点系统,天然气网络则基于文献[21]中的 11 节点中压配气网模型。两者通过集线器实现物理互联;具体而言,电网节点 28 与气网节点 31 组合映射为耦合节点 46;而电网节点 26 与气网节点 32 则集成为耦合节点 47。为凸显系统间的能量耦合机理,算例对负荷配置进行了简化处理:将绝大部分背景负荷置零,仅保留节点 42 至 45 处的关键负荷接入。

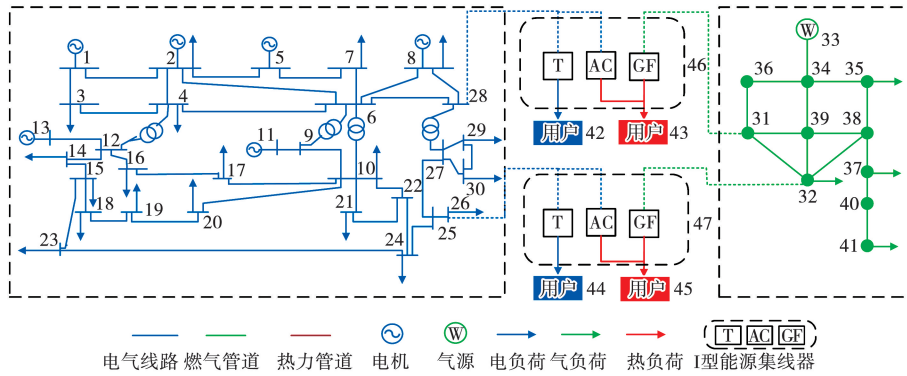


图 4 电-气耦合综合能源测试系统结构图

Fig. 4 Structure diagram of power-gas coupling integrated energy system

根据复杂网络建模理论,将电网中的母线抽象为节点,导线抽象为边;将气网中的管道连接点抽象为节点,管道抽象为边;同时将综合能源系统用户抽象为节点,构建如图 5 所示的综合能源系统复杂网络图。该图为综合能源系统复杂网络的一般结构,由于文章选择不同的源荷节点对进行计算并叠加,不同源荷节点对引起的传输分布因子不同使得节点与节点之间的权重与方向发生改变,每次的源荷节点对的选择都会导致权重和方向不一样。因此该图未描述权重与方向的相关信息。

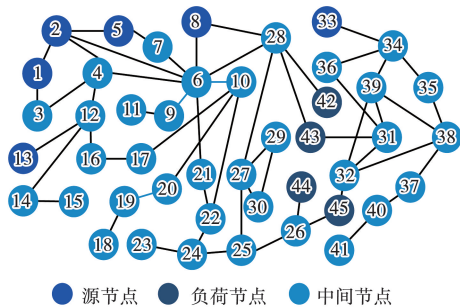


图 5 综合能源系统复杂网络图

Fig. 5 Complex network graph of integrated energy system

4.2 网络脆弱环节辨识分析

1) 脆弱线路辨识

对拓扑网络中涵盖的 54 条传输支路进行了能力测算,在对所得数据实施归一化处理并按数值降序排列后,绘制了如图 6 所示的线路传输贡献度分布曲线。

线路传输贡献度在数值 0.245 处呈现出显著的形态拐点。该临界点左侧区域的指标数值处于高位且衰减速率极快,而右侧区域则表现为低值且平缓拖尾的特征。这一‘左陡右缓’的分布形态不

仅证实了该指标在筛选关键线路时具备优异的区分度,更揭示了网络流分布的高度异质性:即系统中仅有极少数线路承担了核心传输职能。这些稀疏分布的高贡献度线路构成了系统的结构性软肋,一旦遭受针对性的定点打击,将导致系统供能可靠性出现断崖式下跌,引发严重的破坏性后果。

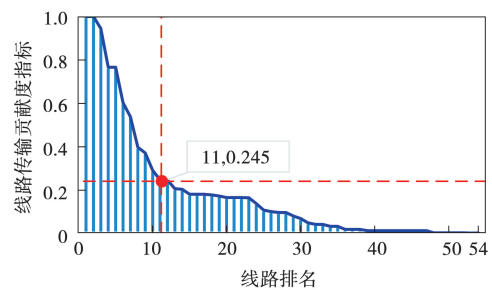


图 6 线路传输贡献度分布图

Fig. 6 Distribution of line transmission contribution

为了深入解析系统的拓扑特征,选取了排名靠前的 Top-10 关键线路作为分析样本,如表 1 所示。对比两种方法的排序结果可知,在前十位高风险线路中,共有 4 条线路重合。这一重叠现象证实,本文提出的传输贡献度指标在一定程度上继承了传统介数指标对拓扑重要性的表征能力。然而,二者在脆弱线路的系统分布上呈现出显著差异:传输贡献度指标识别出的薄弱环节完全集中于电力网络,而介数指标识别的前 7 位虽然也位于电网,但分布略有不同。产生这种差异的根本原因在于模型维度的不同:传输贡献度指标不再局限于纯拓扑结构,而是进一步融合了线路物理容量及系统实际潮流分布的双重约束。此外,从异质能源网络的供能结构来看,电网侧配置了 5 个有源节点,而气网侧仅有 1 个。这种源端布局的不平衡导致电网承载

了远高于气网的能源通量,从而使其内部线路在综合评估中表现出更高的负载压力与脆弱性。

表 1 不同指标下的线路排序

传输贡献度排序	线路编号	介数排序	线路编号
1	25-27	1	6-28
2	27-28	2	6-10
3	24-25	3	4-6
4	10-22	4	25-26
5	22-24	5	27-28
6	6-10	6	4-12
7	2-6	7	24-25
8	6-8	8	39-32
9	4-12	9	31-39
10	8-28	10	38-32

2) 脆弱节点辨识

基于信息熵赋权机制,对节点所有邻接支路的传输贡献分量进行了加权聚合与无量纲化处理。经剔除末端用户节点后,最终解算出的 41 个系统关键节点的传输贡献度数值分布详情可见图 7。

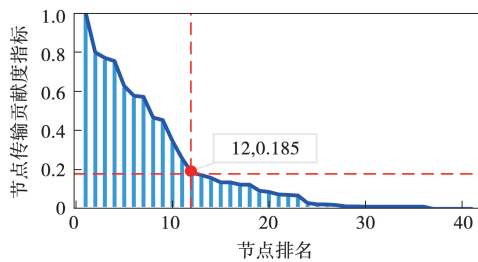


图 7 节点传输贡献度分布图

Fig. 7 Distribution of node transmission contribution

观察节点传输贡献度的分布态势可知,该曲线在数值 0.185 附近呈现出显著的拐点特征。这一演化趋势与前述线路传输贡献度的分布规律高度吻合,充分证实了该指标在节点层面同样具备优异的层级划分能力。

为深入剖析关键节点的拓扑属性,本研究提取了排名位居前列的 Top-10 节点作为分析样本,如表 2 所示。通过横向比对两种模型的辨识结果可知,在高脆弱性节点序列中,两者具有显著的一致性。从复杂网络视角审视,这些被共同锁定的核心节点普遍占据了电力子系统的高连接度枢纽位置。产生这一分布特征的根本动因在于:本算例中电网侧的能源供给容量在系统总规模中占据主导地位,导致高连通度的电网节点承担了更重的输能职能,从而表现出更高的脆弱性。

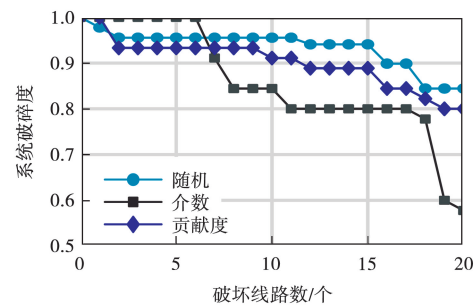
表 2 不同指标下的节点排序

Tab. 2 Node sequencing under different indices

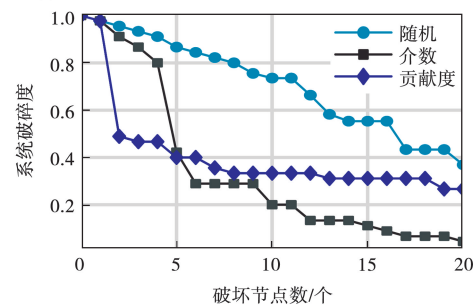
传输贡献度排序	节点编号	介数排序	节点编号
1	6	1	6
2	25	2	28
3	24	3	31
4	27	4	10
5	10	5	25
6	22	6	4
7	28	7	38
8	2	8	32
9	4	9	27
10	12	10	12

4.3 网络鲁棒性分析

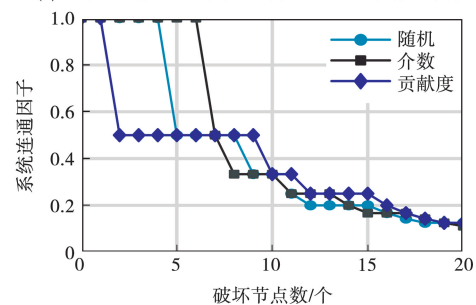
为了校验所识别脆弱环节的准确性,设计了元件序贯切除仿真实验。该实验分别复现了随机故障与蓄意攻击两种典型的结构扰动场景,通过追踪网络在组件连续缺失过程中的性能衰退轨迹,实现了对辨识结果的有效性验证,相关鲁棒性演化曲线如图 8 与图 9 所示。



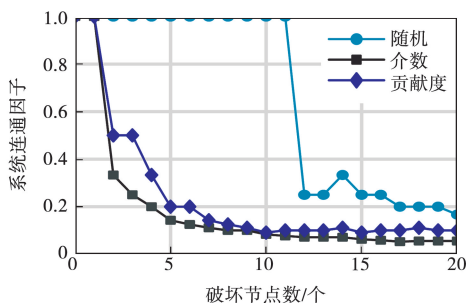
(a) 不同攻击方式下系统破碎度随破坏线路数的演化规律



(b) 不同攻击方式下系统破碎度随破坏节点数的演化规律



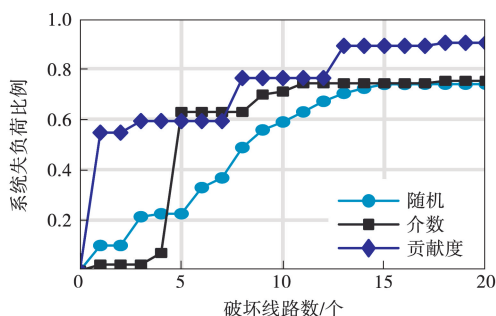
(c) 不同攻击方式下系统连通因子随破坏线路数的演化规律



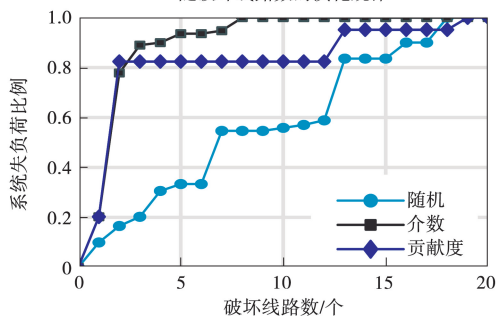
(d) 不同攻击方式下系统连通因子随破坏节点数的演化规律

图 8 不同攻击下系统拓扑结构鲁棒性测试结果

Fig. 8 Results of system topology robustness under different attacks



(a) 不同攻击方式下系统失负荷比例随破坏线路数的演化规律



(b) 不同攻击方式下系统失负荷比例随破坏节点数的演化规律

图 9 不同攻击下系统供能效率鲁棒性测试结果

Fig. 9 Results of system energy efficiency robustness under different attacks

基于复杂网络理论框架,选取系统破碎度与连通因子作为核心测度指标,以量化表征网络拓扑的结构完整性。图 8 直观描绘了在不同攻击策略驱动下,系统经历 20 轮次序贯打击(连锁攻击)后的拓扑结构演化轨迹与退化态势。

由图 8 可见,在随机策略下,系统表现出较强的抗毁韧性,结构退化缓慢;反之,蓄意策略造成的破坏则更为显著。这种反差揭示了系统在面对盲目干扰时的稳定性。但是,任何复杂系统都无法规

避自身的结构软肋。当外部威胁具备了信息优势,并针对关键节点实施精准打击时,系统的防御防线将迅速瓦解,导致鲁棒性发生不可逆的急剧恶化。为此,本节将重点对比两种蓄意攻击手段在破坏深度与破坏速率上的具体表现。

在经历了 20 轮次的持续攻击后,系统的拓扑完整性发生了显著分化。量化数据显示:在介数攻击模式下,针对线路与节点的打击分别导致系统破碎度降至 0.58 与 0.02,连通因子降至 0.12 与 0.08;而在贡献度攻击模式下,相应的破碎度指标分别为 0.8 与 0.28,连通因子则维持在 0.13 与 0.1 水平。横向对比表明,无论采用何种指标引导,节点移除策略对网络结构的破坏效能均显著优于线路移除策略,证实了节点侧具备更高的结构脆弱性。此外,纵向对比发现,虽然介数攻击造成的系统破碎化程度(即更低的破碎度数值)略高于贡献度攻击,但两者的连通因子响应曲线趋于一致。这种结果的同质性归因于贡献度指标在数学构造上对介数中心性的继承与拓展,从而在鲁棒性测试中表现出相似的演化规律。

在蓄意攻击的博弈场景中,攻击方往往遵循“最小代价、最大杀伤”的原则,系统鲁棒性随攻击次数衰减的速率是衡量脆弱性的关键维度。仿真表明,相比于介数指标,基于传输贡献度的攻击策略展现出显著的高费效比:在线路攻击场景下,该策略仅需移除 2 条线路即可诱发破碎度与连通因子的显著恶化,而介数策略达到同等破坏程度需累积攻击 7 次。在节点攻击层面,仅 2 步操作便重创系统;相比之下,介数策略若要达到相同的连通度破坏效果,则需将攻击成本提升至 5 次。综上所述,传输贡献度指标能够更精准地锁定系统命门,其造成的破坏效应在时间轴上呈现出更快的收敛速度。

综上所述,在针对系统拓扑抗毁性的综合研判中,本文提出的传输贡献度指标展现出鲜明的性能特征:在宏观破坏深度层面,该指标与经典的介数中心性指标保持了高度的一致性;而在攻击收敛效率层面,该指标则表现出显著的优越性,能够以更快的速率瓦解系统防线。

在综合能源系统的抗毁性评估框架中,供能效能被视为衡量系统生存能力的首要标尺,同时也是防御方与攻击方进行资源博弈的核心焦点。图 9

详细记录了在不同攻击范式驱动下,系统经历 20 次序贯打击后的能效演化轨迹与衰退特性。

仿真结果表明,节点级攻击对系统的毁灭性最强:在 20 轮次打击后,所有策略均导致系统陷入全停状态。其中,蓄意攻击表现出极端的破坏爆发力,仅需移除 2 个关键节点,即可瞬间诱发 80% 的负荷损失,远快于随机攻击的演化进程。在线路级攻击场景中,各策略的终态差异显著:传输贡献度策略最终致使失负荷率飙升至 90%,明显高于其他两类策略的 75% 上限。更关键的是其攻击效率:仅切除 1 条最高贡献度线路,系统即丧失约 55% 的供能能力;相比之下,介数策略需累积攻击 5 条线路方能企及同等破坏效果。综上所述,贡献度攻击模式在削弱系统供能效率方面表现出压倒性的破坏优势。

值得关注的是,在传输贡献度导向的攻击演化中,系统的失负荷呈现出显著的多级阶跃特征。具体而言,线路攻击序列中的第 1、8、13 次操作构成了三个关键的突变节点,分别诱发了约为 60%、20% 及 10% 的负荷削减。随着攻击深度的增加,攻击方所需付出的成本不断累积,但获取的相对破坏收益却在逐渐收窄。这种非线性的收益衰退特性,为攻防双方提供了量化的决策依据,有助于明确最佳的攻击截止点或防御优先级。

5 结 论

构建了基于复杂网络理论的综合能源系统脆弱性辨识框架。该方法实现了电力系统功率传输分布因子向天然气网络的理论迁移,并通过融合网络最大流机制与物理容量约束,推导了线路传输贡献度指标。在此基础上,引入信息熵理论进一步量化了节点的传输贡献权重。成功打破了传统方法在“纯拓扑结构”与“纯运行状态”之间的壁垒,实现了对系统元件关键性的多维耦合定量表征,克服了单一视角评估的局限性,为 IES 的规划建设及针对性防御提供了科学依据。然而,本研究仍存在一定的边界条件:当前工作主要聚焦于静态拓扑与容量约束的分析,尚未完全涵盖系统在故障引发潮流转移时的动态响应特性;同时,对于电-气深度耦合下的跨网故障传播及交互脆弱性机理,仍需进一步挖掘。鉴于此,后续工作将致力于引入高保真的动态运行模型,深入剖析异质网络间的耦合交互机制,以实现了对系统动态性能更精准的评估。

参 考 文 献

- [1] 李鸿培, 忽朝俭, 王晓鹏. 工业控制系统的安全研究与实践[J]. 保密科学技术, 2014(4): 17-23.
LI Hongpei, HU Chaojian, WANG Xiaopeng. Security research and practice of industrial control system[J]. Science and Technology of Confidentiality, 2014(4): 17-23.
- [2] 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 Qinglai, XIN Shujun, WANG Jianhui, et al. Comprehensive security assessment of information energy system based on Ukraine power outage[J]. Power System Automation, 2016, 40(5): 145-147.
- [3] 张汪洋, 樊艳芳, 侯俊杰, 等. 基于集成深度神经网络的配电网分布式状态估计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(3): 128-140.
ZHANG Wangyang, FAN Yanfang, HOU Junjie, et al. Distribution network distributed state estimation method based on an integrated deep neural network[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(3): 128-140.
- [4] 潘昭光, 孙宏斌, 郭庆来. 面向能源互联网的多能流静态安全分析方法[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1627-1634.
PAN Zhaoguang, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Multi energy flow static security analysis method for energy internet [J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1627-1634.
- [5] ZHU D L, WANG B. Research on evaluating vulnerability of integrated electricity-heat-gas systems based on high-dimensional random matrix theory[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019(99): 1-10.
- [6] ZHANG H, OUYANG M, WU S, et al. Simplified operation models of integrated power and gas systems for vulnerability analysis[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2019, 531: 121428.
- [7] ZIO E, PICCINELLI R. Randomized flow model and centrality measure for electrical power transmission network analysis[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2010, 95(4): 379-385.
- [8] 潘华, 肖雨涵, 梁作放, 等. 基于复杂网络的电-气-热综合能源系统健壮性分析[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 104-112.
PAN Hua, XIAO Yuhan, LIANG Zuofang, et al. Robustness analysis of electricity gas heat integrated energy system based on complex network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 104-112.
- [9] 周步祥, 姚先禹, 臧天磊. 计及电-气双向耦合的综合能源配电网优化重构[J]. 电测与仪表, 2024, 61(2): 17-24.
ZHOU Buxiang, YAO Xianyu, ZANG Tianlei. Optimization and reconfiguration of the integrated energy distribu-

- tion network considering the electricity-gas two-way coupling[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(2): 17-24.
- [10] 王伟亮, 王丹, 贾宏杰, 等. 考虑天然气网络状态的电力-天然气区域综合能源系统稳态分析[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(5): 1293-1305.
WANG Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Steady state analysis of power natural gas regional integrated energy system considering the state of natural gas network[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(5): 1293-1305.
- [11] 王珏, 廖溢文, 韩文福, 等. 碳达峰背景下抽水蓄能-风电联合系统建模及有功功率控制特性研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2021, 52(9): 172-181.
WANG Jue, LIAO Yiwen, HAN Wenfu, et al. Research on modeling and active power control characteristics of pumped storage wind power combined system in the context of carbon peak[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering (Chinese and English)*, 2021, 52(9): 172-181.
- [12] 田鑫, 李雪亮, 孙俊德, 等. 基于功率传输分布因子和支路暂态稳定性函数的电网关键线路综合辨识方法[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2020, 41(5): 145-149, 157.
TIAN Xin, LI Xueliang, SUN Junde, et al. A comprehensive identification method for power grid key lines based on power transmission distribution factor and branch transient stability function[J]. *Power Capacitor and Reactive Compensation*, 2020, 41(5): 145-149, 157.
- [13] 刘剑. *流体网络理论*[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2002.
LIU Jian. *Fluid network theory*[M]. Beijing: Coal Industry Press, 2002.
- [14] 吴桂联, 张林垚, 林婷婷, 等. 不同运行模式下区域综合能源系统多能潮流计算方法[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2019, 31(7): 95-104.
WU Guilian, ZHANG Linyao, LIN Tingting, et al. Multi energy power flow calculation method of regional integrated energy system under different operation modes[J]. *Proceedings of the CSU-EPSCA*, 2019, 31(7): 95-104.
- [15] 宓亢琪. *燃气输配工程学*[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
MI Kangqi, *Gas Transmission and Distribution Engineering*[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2014.
- [16] 鞠文云, 李银红. 基于最大流传输贡献度的电网关键线路和节点辨识[J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(9): 6-12.
JU Wenyun, LI Yinhong. Identification of key lines and nodes of power network based on maximum transmission contribution[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(9): 6-12.
- [17] DWIVEDI A, YU X, SOKOLOWSKI P. Identifying vulnerable lines in a power network using complex network theory[C]//2009 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2009.
- [18] 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): 6.
CAO Yijia, CHEN Xiaogang, SUN Ke. Identification of vulnerable lines in large power system based on complex network theor[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2006, 26(12): 6.
- [19] ZANG T L, GAO S B, LIU B X, et al. Integrated fault propagation model based vulnerability assessment of the electrical cyber-physical system under cyber attacks[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2019, 189(9): 232-241.
- [20] XI Z, CHI K, TSE K C. Assessment of robustness of power systems from a network perspective[J]. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 2015, 5(3): 456-464.
- [21] ABEYSEKERA M, WU J, JENKINS N, et al. Steady state analysis of gas networks with distributed injection of alternative gas[J]. *Applied Energy*, 2015, 164: 991-1002.

收稿日期: 2023-10-16; 修回日期: 2024-05-13

作者简介:

沈超(1987—),男,硕士,高级工程师,研究方向为电网信息通信。E-mail:527200783@qq.com

华梁(1990—),男,硕士,工程师,研究方向为电网数字化。E-mail:hualiang19900415@163.com

虎啸(1988—),男,硕士,工程师,研究方向为电网数字化。E-mail:qqhuxiao@yeah.net

古丹妍(1998—),女,通信作者,硕士研究生,研究方向为复杂网络在电力系统应用。

E-mail:220215870@seu.edu.cn

(编辑 杜景飞)