

引用格式:王思奇,梁智娴,王致杰,等.基于潮流和复杂网络理论的综合能源系统关键环节识别[J].电力科学与技术学报,2024,39(3):242-252.

Citation: WANG Siqi, LIANG Zhixian, WANG Zhijie, et al. Identification of key links in integrated energy system based on power flow and complex network theory[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(3): 242-252.

基于潮流和复杂网络理论的综合能源系统 关键环节识别

王思奇, 梁智娴, 王致杰, 王 鸿

(上海电机学院电气学院, 上海 201306)

摘要:综合能源系统(integrated energy system, IES)的关键环节识别对于系统的脆弱性研究和改善有重要意义。针对传统还原论方法无法解释系统层面且复杂网络分析中未考虑能流带来影响的问题,提出一种基于潮流和复杂网络结构的 IES 关键环节识别方法。首先,建立基于潮流的综合能源复杂网络模型,将 IES 的数学模型参数和潮流结果引入复杂网络的建模以使模型更加贴合现实的运行工况;其次,基于潮流计算结果和复杂网络参数,提出节点能量度和能量边介数 2 个评价指标,提高了关键环节识别精度;最后,根据所建立的模型对关键环节进行破坏并观察网络效率的变化,与其他攻击模式进行对比分析,验证了所提方法的可行性。

关键词:综合能源系统;潮流计算;复杂网络理论;关键环节识别;评价指标

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.03.026 **中图分类号:** TM732 **文章编号:** 1673-9140(2024)03-0242-11

Identification of key links in integrated energy system based on power flow and complex network theory

WANG Siqi, LIANG Zhixian, WANG Zhijie, WANG Hong

(School of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China)

Abstract: The identification of key links in a comprehensive energy system is of great significance for the research and improvement of system vulnerability. Aiming at the problem that the traditional reductionism method can not explain the system level and the influence of energy flow is not considered in the analysis of complex network, a key link identification method of the IES based on power flow and complex network structure is proposed. Firstly, a comprehensive energy complex network model is established based on power flow, and the mathematical model parameters and power flow results of the IES are introduced into the modeling of complex network to make the model more suitable for realistic operating conditions. Secondly, based on the power flow calculation results and complex network parameters, two evaluation indicators, i.e. node energy degree and energy edge intermediate, are proposed to improve the identification accuracy of key links. Finally, based on the established model, the key links are destroyed and the changes in network efficiency are observed. Compared with other attack modes, the feasibility of the proposed method is verified.

Key words: integrated energy system; power flow calculation; complex network theory; key link identification; evaluation index

目前,针对综合能源系统(integrated energy system, IES)的研究主要有综合能源系统的潮流计

算、调度、规划、经济运行^[1-10]等。随着新技术的开发以及各种创新设备的引进,势必会对 IES 产生重

收稿日期:2023-03-27;修回日期:2023-08-30

基金项目:国家自然科学基金(12204301)

通信作者:王致杰(1964—),男,博士,教授,主要从事微电网智能控制和故障诊断方面研究;E-mail: wzjsdstu@163.com

大的影响^[11],所以 IES 方面的课题将会是比较重要的研究方向。而 IES 之间相互依存的特性给其稳定运行带来了更大的挑战,一个能源系统的故障会引起其他能源的扰动,更有可能引起级联故障。美国西南部某事故开始是由于气负荷需求过高,大量气负荷被切除,故障未被及时控制而蔓延至电网,导致电负荷切除,由于电驱动加压站受事故影响,故障通过耦合元件传回气网,最终使 130 万用户电力供应不足;2017 年中国台湾也发生过类似的故障,故深入提高 IES 的抗毁性、脆弱性的研究迫在眉睫。系统中最关键的环节是对系统影响最大的环节也是受到破坏时造成连锁故障最多的环节^[12-13],所以对关键环节进行识别在提升系统安全稳定运行方面有着重要的作用。

目前针对关键环节识别主要有以下几种研究方法。文献[14]对经典的网页排名算法进行改进,最终得出所有节点的关键值排序结果。文献[15]采用近邻传播(affinity propagation, AP)聚类算法确定了该网络中的聚类中心,以此作为相应状态的关键节点。文献[14-15]运用的识别方法较为传统,与复杂网络理论的方法相比较为低效,且不能像复杂网络一样从数据中展现网络的复杂程度和系统的小世界网络特性。

文献[16]提出了一种基于随机矩阵理论的电气热 IES 薄弱环节辨识方法,只考虑了 IES 能流对关键环节识别的影响,并未将系统拓扑结构考虑其中。文献[17-19]主要运用复杂网络对系统的拓扑结构进行关键节点识别,并未考虑能流的影响。文献[20-22]考虑了潮流和拓扑结构对关键节点排序的影响,但也只是在单一能源系统中进行识别,并未在 IES 中展开研究。

文献[23-24]通过建立电气统一潮流模型,并利用灵敏度指标分析两网的耦合作用机理;文献[25]根据三层显式差分格式构建电气动态能流时域计算模型。文献[23-26]在构造 IES 模型和灵敏度指标方面提出了较新的方法,但未在关键环节识别方向上深入研究,只是提供了理论指导。

上述工作在电力系统的关键环节识别研究上起到了很好的奠基作用。但在 IES 里,将复杂网络结构和系统实际运行的能流结果相结合的研究仍未成熟。

为了解决以上问题,本文提出一种基于潮流和复杂网络理论的 IES 关键环节识别方法:①构造基于潮流的综合能源复杂网络模型;②提出考虑潮流

和复杂网络参数的评价指标,使关键环节识别更加精准,减小识别误差;③打破结构和能流的壁垒,为改善 IES 脆弱性提供研究基础。

1 IES 潮流数学模型

1) 电力系统潮流计算数学模型。

电力系统的运行状态分为暂态和稳态 2 种,但 2 种状态下的潮流计算公式均可表示如下:

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_i^s - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}), \\ i = 1, 2, \dots, n-1 \\ \Delta Q_i = Q_i^s - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}), \\ i = 1, 2, \dots, m \\ P_i^s = P_{Gi} - P_{Li} \\ Q_i^s = Q_{Gi} - Q_{Li} \end{cases} \quad (1)$$

式中, P_{Gi} 、 P_{Li} 、 Q_{Gi} 、 Q_{Li} 分别为节点 i 发出的有功功率和无功功率以及消耗的有功功率和无功功率; P_i 、 Q_i 、 V_i 为节点 i 的有功功率和无功功率以及电压幅值; G_{ij} 、 B_{ij} 为 i 、 j 两节点之间支路的电导以及电纳; θ_{ij} 为 i 、 j 支路的电压相角差; P_i^s 、 Q_i^s 为节点 i 输出的有功功率和无功功率。

2) 冷和热力数学模型。

热力系统和冷力系统的原理相似,所以分析方式相同。传递热力的方式是用管道中流动的水流将能量转移,主要观测的参数是:流入节点的水温、流出节点的水温以及供热结束后回水管的水温,公式如下:

$$\begin{cases} T_{ke} = T_{ks} e^{-\frac{F_H L_k}{c_n l_{ok}}} \\ (\sum l_{out}) T_{out} = (\sum l_{in} T_{in}) \end{cases} \quad (2)$$

式中, F_H 为单位长度热力传输管道的传热系数; L_k 为管道长度; l_{GK} 为管道的流量; c_n 为水流密度; T_{ks} 、 T_{ke} 为流入管道的水流温度和流出管道的水流温度; l_{in} 、 l_{out} 为流入某节点的液体流量以及在某节点里损失的液体流量; T_{in} 、 T_{out} 分别为流入节点的水流温度和流出节点的水流温度。

本文热力系统潮流计算运用到的结果为 T_{ks} 、 T_{ke} 、 T_{in} 、 T_{out} 。

3) 天然气系统数学模型。

天然气管道的物理原理符合基尔霍夫第一定律,故管道中流量的流动满足流量的代数平衡,即

$$B_G Q_G = S_G \quad (3)$$

式中, B_G 为天然气网络的节点与管道的关联矩阵; Q_G 为节点负荷列向量; S_G 为天然气各管道的流量

列向量。

本文构造的天然气管网是中低压管网,没有设立加压站和压缩机,故管道压强与流量满足相对偏差(relative deviation, RD)公式^[27],即:

$$\begin{cases} \Delta P_i = p_{in}^2 - p_{out}^2 = G_i q_i^{1.82} \\ G_i = 4.810s \frac{L_i}{D_i^{4.82}} \end{cases} \quad (4)$$

式中, ΔP_i 为支路 i 的压降; G_i 为管道 i 的流量; p_{in} 、 p_{out} 分别为管道 i 的始末节点压力; q_i 为管道 i 的横截面面积; s 为天然气的密度; L_i 、 D_i 分别为管道 i 的长度和内径。本文通过计算得出的潮流结果为 p_{in} 和 p_{out} 。

4) 电—气耦合环节模型

电—气耦合设备主要包括燃气轮机和电转气设备,前者通过燃气为发电机提供原动力,后者将电能转化成气能。

燃气轮机中燃气流量与电能输出功率之间的关系如下:

$$R_{cost} = A_1 + A_2 N + A_3 N^2 = \frac{N}{\delta_{gt} q_{cost}} \quad (5)$$

$$P_{gt} = \delta_{fd} N \quad (6)$$

式(5)、(6)中, R_{cost} 为单位时间内消耗的燃气流量; N 为燃气轮机的输出功率; A_1 、 A_2 、 A_3 为燃料系数,通常 A_1 、 A_3 取 0; δ_{gt} 为燃气轮机的效率; q_{cost} 为燃料燃烧的热值; P_{gt} 为燃气轮机式发电机的输出功率; δ_{fd} 为发电机的发电效率。

电转气设备相较于燃气轮机原理更加简单,公式如下:

$$L_{P2G} = \frac{\delta_{P2G} C_{P2G}}{Q_{gas}} \quad (7)$$

式中, L_{P2G} 为产出的气体流量; δ_{P2G} 为电转气(power to gas, P2G)设备的转换效率; C_{P2G} 为 P2G 设备容量; Q_{gas} 为天然气热值。

5) 电—热耦合 P2H 设备模型。

电转氢(power to hydrogen, P2H)设备一般包括热泵和电锅炉 2 种,本文模型选用电锅炉为电气耦合设备。电锅炉是将电能转化成热能,其原理是由水蒸气、高温水来传递热量,公式如下:

$$P_d = \frac{Q_d}{\lambda_d} \quad (8)$$

式中, P_d 、 Q_d 、 λ_d 分别为电锅炉的电功率、热输出功率以及热转换效率。

6) 电—冷耦合环节模型。

冷力主要由压缩式制冷机消耗电能制冷。公

式如下:

$$L_c = \mu_z P_d \quad (9)$$

式中, L_c 、 μ_z 、 P_d 分别为压缩式制冷机的制冷功率、制冷系数、电功率。

7) 热—冷耦合环节模型。

冷热耦合制冷的情况下运用的制冷设备为吸收式制冷机,其原理是通过溴化锂对水蒸气进行吸收从而将热量转换成冷力,公式如下:

$$L_x(t) = Q_1(t) \mu_x \quad (10)$$

式中, $L_x(t)$ 、 $Q_1(t)$ 、 μ_x 分别为吸收式制冷机 t 时刻的制冷量、加热源热量以及制冷系数,制冷系数一般取 1.38。

8) 电—气—热—冷耦合环节模型。

本文的综合能源耦合环节由冷热电联产(combined cooling heating and power, CCHP)机组构成^[28],包括燃气轮机、P2G、P2H、压缩式制冷机、吸收式制冷机。电气热能源的输入与电热冷能源的输出关系式如下:

$$\begin{cases} P_a = P_{by} + \eta_f R_{cost} P_{gt} \\ H_a = H_{GL} (1 - \lambda_{YRB}) + \lambda_d P_d \\ L_a = \mu_z \lambda_{YRB} H_{GL} \end{cases} \quad (11)$$

式中, P_a 、 H_a 、 L_a 分别为 CCHP 机组产生的总电能、热能、冷能; P_{by} 为光伏、风力发电的电功率; η_f 为燃气轮机的转换效率; λ_{YRB} 为余热锅炉的转换效率; H_{GL} 为余热锅炉和燃气锅炉产生的总热能,如下:

$$H_{GL} = \frac{\eta_f R_{cost} P_{gt}}{\lambda_{YRB} \Delta t} (1 - \eta_f) + (f_{GB} P_{gt} - Q_1 - Q_2 - Q_3) \quad (12)$$

式中, f_{GB} 为燃气锅炉消耗的天然气流量; Q_1 、 Q_2 、 Q_3 分别为天然气未完全燃烧热损失、排烟热损失、散热热损失。由于以上公式包含了多个设备,若系统中不包含的设备其值取 0。

2 基于潮流的 IES 复杂网络模型建立

2.1 复杂网络理论常规参数

一般常规的参数主要包括平均路径长度、聚集系数、度与度分布、介数等^[29]。本文运用以下 4 个参数的概念,其他参数不多加赘述。

1) 平均路径长度及边介数。

平均路径长度是衡量网络节点之间紧密程度的衡量指标之一。 b_{ij} 为从节点 i 到节点 j 之间的众多路径之中最短路径上边的个数,在复杂网络中最短路径也称为测地路径。在网络中任意 2 个 i 、 j 节

点之间的最大路径距离称为直径,定义为 B, B_{ij} 表示 i, j 之间的所有路径的边的个数:

$$B = \max_{i,j} B_{ij} \tag{13}$$

复杂网络中所有节点之间的最短距离的平均值就是平均路径长度 L, n 为节点总数。如下:

$$L = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{\substack{i,j \in n \\ i \neq j}} b_{ij} \tag{14}$$

边介数是衡量边的中心性的指标,指所有最短路径中经过该边的路径的数目占最短路径总数的比例,如下:

$$J_{i,k} = \frac{d_{i,k}}{S} \tag{15}$$

式中, $J_{i,k}$ 为路径 i, k 的边介数; $d_{i,k}$ 为经过路径 i, k 的最短路径个数; S 为最短路径总数。

2) 节点度。

节点度是衡量节点在拓扑结构上是否关键的依据。节点 i 的度 d_i 表示与节点 i 相连节点的数目。

3) 节点介数。

介数最初是衡量节点在网络中的重要性或体

现节点中心性的标准之一。概念为通过节点 i 的所有两两节点之间的最短路径与所有两两节点之间的最短路径的比值之和,如下:

$$Z_i = \sum_{j,k \in n, j \neq k} \frac{b_{jk}(i)}{b_{jk}} \tag{16}$$

式中, $b_{jk}(i)$ 为通过节点 i 的路径 j, k 之间的最短路径; b_{jk} 为节点 j, k 之间的最短路径; Z_i 为节点 i 的介数。

2.2 基于潮流的 IES 复杂网络模型建立

本文采用由 IEEE 30 节点配电系统(E1-E30)^[30]、9 节点燃气系统(G1-G9)、8 节点热力系统(H1-H8)和 5 节点冷力系统(L1-L5)构建的区域 IES, 具体综合能源拓扑图如图 1 所示。E8 为小型天然气电站接入点, 与燃气轮机相接, 节点 E8 发电设备中的燃料是天然气, 因此与天然气供给节点 G5 直接连接。节点 E26 为电锅炉接入点, 与热力网络节点 H7 连接; 节点 E30 为 P2G 设备接入点。E29 节点与压缩式制冷机(L4)相连, H8 余热锅炉与吸收式制冷机(L1)相连。L1、L4 冷力节点与冷负荷相连。

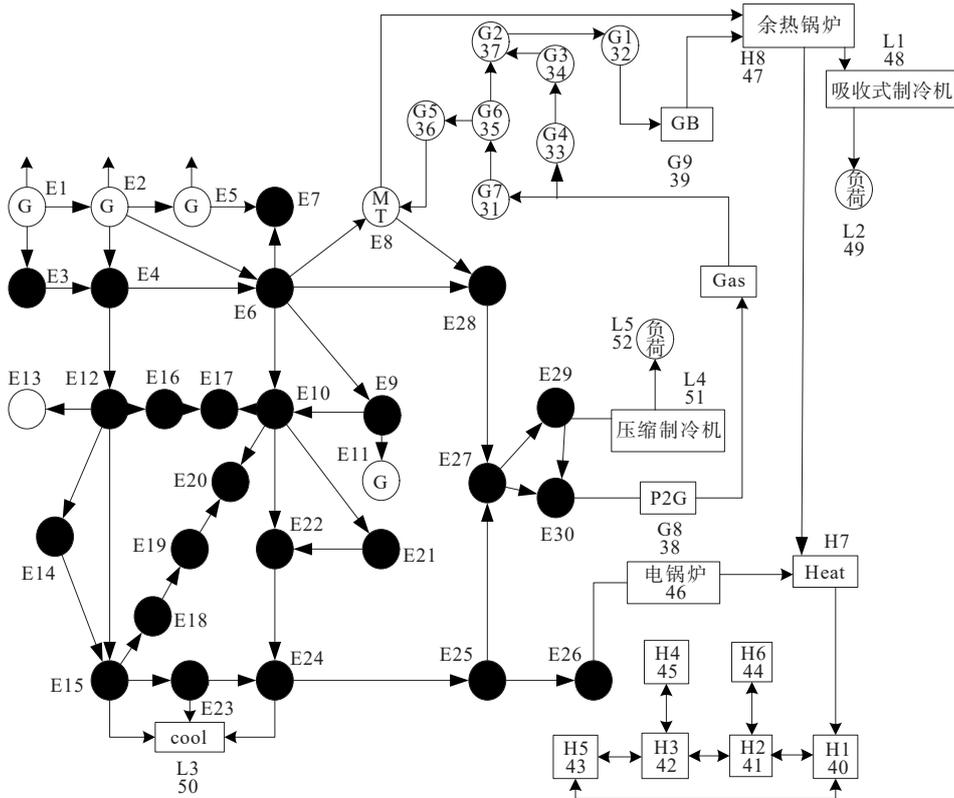


图 1 电—气—冷—热综合能源拓扑图

Figure 1 Electric-gas-cooling-heat integrated energy topology

通过潮流计算可得到各个节点和线路的各种参数以及能流的方向。将潮流结果与复杂网络相

结合构造一个有权重有向的复杂网络模型。

电力系统复杂网络子模块的边权重由各支路

的额定功率 P_{ij} 表示。

天然气系统复杂网络模块的边权重由输气支路的支路流量 η_{ij} 表示,支路流量可通过潮流计算得出。

6节点供热网的水流管道包含6节点供水网和6节点回水网^[31],如图2所示。

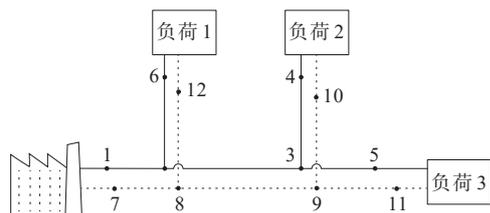


图2 6节点供热网

Figure 2 Six-node heating network

故热力系统复杂网络子模块的边权重由每条供水支路温度减去回水管道流过的水流温度 T_{ij} 表示,水流温度可以通过潮流计算得出。由于冷力和热力系统的原理几乎一样,所以冷力系统的边权重也是 T_{ij} 。

$$T_{ij} = T_g - T_h \quad (17)$$

由于功率和支路流量以及水流温度的单位不统一,故对所有参数归一化。运用 min-max 标准化方法(min-max normalization, MMN)将每个值都映射到0~1,如下:

$$X^* = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (18)$$

式中, X_{\min} 、 X_{\max} 为样本中的最小值和最大值; X^* 为归一化后的值。

构造好的有权有向 IES 复杂网络模型如图3所示。

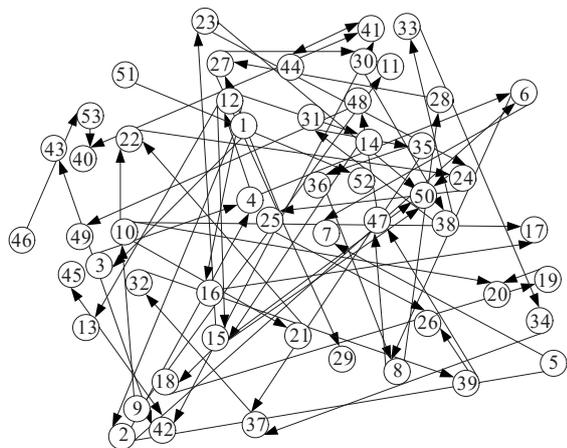


图3 IES 复杂网络图

Figure 3 Complex network diagram of integrated energy system

3 关键环节评价指标

3.1 节点能量度

节点能量度的概念由复杂网络理论中节点度的概念演变而来,节点能量度是指:在经过2次输入不同的潮流计算后每个节点的电压、压强、温度都会改变,计算出每个节点的潮流结果变化,最后将某个节点和与其相连节点的变化值相加,值为节点能量度。

节点能量度计算方法如下。

1) 将整个 IES 在 Python 中进行仿真得到一个有向有权的复杂网络图。

2) 在不改变任何参数的情况下对系统进行一次潮流计算,保存结果。

3) 所有发电机设备的有功增加 20 MW,对系统进行潮流计算,保存结果。

4) 用步骤3)的结果减去步骤2)的结果,得到各节点的潮流增量,保存结果。

5) 由于电力系统的潮流结果是电压幅值,天然气系统的潮流结果是节点气压,热力系统的潮流结果是温度,各结果的单位并不统一,故运用 MMN 方法归一化。

6) 计算各个节点的节点能量度:

$$\begin{cases} \Delta K_i = K'_i - K_i \\ Z_i = \sum_{j \in q} \Delta K_j^* \end{cases} \quad (19)$$

式中, Z_i 为节点能量度; ΔK_i 为节点 i 的潮流参数变化值; ΔK_j^* 为节点 j 归一化后的潮流参数变化值; q 为包含节点 i 以及与节点 i 相连的节点的集合。

3.2 能量边介数

能量边介数 H 的计算方法如下。

1) 将整个 IES 在 Python 中进行仿真得到一个有向有权的复杂网络图。

2) 搜索整个系统的能源传输路径,保存潮流走向。

3) 对能源传输路径大于1条的节点对,找到最大能量增量路径作为主要传输路径。若传输路径只有1条的节点对,这条路径就是主要传输路径。

4) 计算每一条边在主要传输路径中出现的次数 H 。

对于传输路径大于1条的发电机设备和与其进行能源传递的负荷节点对 i, j , 它们的最大能量增量

路径计算方法如下。

1) 在不改变任何参数的情况下对系统进行一次潮流计算,保存结果。

2) 对网络中的所有发电机设备的有功增加 20 MW,对系统进行潮流计算,保存结果。

3) 将步骤 2)的结果减去步骤 1)的结果,得到各节点的潮流增量,保存结果。

4) 由于电—气—热—冷系统的潮流增量结果单位不统一,故运用 MMN 方法归一化处理。

5) 计算 i,j 各个路径上的节点增量之和找到增量最大的路径,最大值为 ΔP_{\max} 。

$$\Delta P_{\max} = \max \left\{ \sum_{k \in i-j} \Delta K_k^* \right\} \quad (20)$$

式中, ΔK_k^* 为节点 k 归一化后的潮流参数变化值, k 也属于 i,j 两节点路径上的节点。

6) ΔP_{\max} 所对应的路径为 i,j 节点的主要传输路径,即为最大能量增量路径。

3.3 关键环节识别流程

关键环节识别流程如下:

1) 将 IES 进行仿真得到一个有向有权图,线路的方向为相位高节点指向相位低节点,并且遍历每一条边以了解所有发电机节点与负荷节点对间的传输路径;

2) 运用节点能量度和能量边介数的计算方法计算,得到值;

3) 对值进行排序,得到关键节点和关键边;

4) 验证合理性。

4 数据分析

首先对本文创建的 IES 进行潮流计算。

本文选取的方法是基于文献[30]中的牛顿—拉夫逊方法和文献[31]中提出的统一能路理论的潮流计算方法,对电力系统、气网系统、热力系统进行潮流计算。

文 3 中提到的节点能量度和能量边介数的计算方法需要进行 2 次潮流计算并得到各节点的潮流差值。而电力系统的节点潮流单位是电压,气系统的节点潮流单位是压力,热力系统是温度,因为单位不统一,所以需要运用前文提到的 MMN 标准化方法进行标准化处理。

计算结果见表 1,未在表 1 中列出的节点潮流差值为 0。

表 1 标准化后的节点潮流差值

Table 1 Node power flow difference after standardization

节点	潮流差值	节点	潮流差值	节点	潮流差值
3	0.725	14	0.500	21	0.325
4	1.000	15	0.400	22	0.325
6	0.650	16	0.375	23	0.325
7	0.375	17	0.350	24	0.250
9	0.200	18	0.375	25	0.025
10	0.325	19	0.375	26	0.025
12	0.500	20	0.350	27	0.150
32	0.827	40	0.884	28	0.150
37	0.790	41	1.000	29	0.500
34	1.000	42	0.865	30	0.150

4.1 关键节点排序及验证

根据前文提出的节点能量度计算方法对节点进行排序,数值越大的说明在系统中关键性越高。通过对介数和度的介绍,对节点介数和节点度进行计算并排序,小数点精确到第 3 位,结果见表 2~4。表 4 中只列出了排名前 20 的节点,剩余 31 个节点的节点度都低于 3。

表 2 节点介数排序表

Table 2 Ranking of node intermediate number

节点	介数	节点	介数	节点	介数
27	0.099	32	0.057	23	0.033
25	0.092	6	0.055	15	0.032
24	0.089	41	0.051	34	0.031
30	0.087	39	0.050	28	0.030
38	0.086	31	0.041	26	0.029
47	0.064	22	0.039	10	0.026
37	0.063	35	0.038	42	0.026
40	0.063	33	0.035	46	0.025

表 3 关键节点排序表

Table 3 Key node ranking

节点	介数	节点	介数	节点	介数
6	3.050	40	1.909	30	1.525
12	2.775	42	1.865	31	1.500
41	2.750	35	1.790	14	1.400
37	2.617	44	1.750	33	1.376
10	2.525	3	1.725	38	1.375
4	2.375	47	1.711	28	1.300
15	2.100	2	1.650	22	1.225
34	1.990	32	1.617	16	1.225

表4 节点度数排序表

Table 4 Ranking of node degrees

节点	节点度	节点	节点度	节点	节点度	节点	节点度
6	7	4	4	47	4	25	3
10	6	8	4	50	3	29	3
12	5	24	4	22	3	35	3
15	4	27	4	28	3	42	3
2	4	40	4	9	3	23	3

为验证本文关键节点识别方法的可行性设计了攻击规则,具体规则(本文所提攻击都为物理攻击)如下。

1) 在构造好的复杂网络系统里分别对排序好的关键节点、节点介数以及节点度数依次进行攻击,得到每一次攻击的剩余网络效率,剩余网络效率计算方法如式(21)、(22)。对网络效率曲线进行一一比较,验证将能流和复杂网络结构相结合的关键节点识别方法的可行性。

2) 在构造好的复杂网络理论里对排序好的关键节点和随机选取的节点进行攻击,得到每一次攻击的剩余网络效率,并进行一一比较。

网络效率 $E(0 < E < 1)$ 是指任意两节点 i, j 之间路径长度的标准化值,公式如下:

$$E = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{b_{ij}} \quad (21)$$

用 E_n 表示无故障时网络的网络效率, E_d 表示遭到破坏时的网络效率,剩余网络效率为 B_E , 计算如下:

$$B_E = \frac{E_n - E_d}{E_n} \quad (22)$$

对上述攻击模式进行仿真并计算剩余网络效率。由图4可知在消除第10个节点后2条曲线的差异趋于零,说明本系统是符合小世界网络特性的,也可知在移除前几个最具有关键特性的节点后网络的效率已经极低。在移除前5个关键节点时关键节点的曲线明显比移除节点介数前5的曲线更加陡峭,且网络效率降低得更多。消除第5个节点时2条曲线的差值已有0.03。

图5中关键节点曲线比随机攻击曲线下降速度更快,随机攻击曲线几乎是按照等比例下降,而关键节点曲线更趋向于幂指数下降。在移除第13个节点以后两曲线几乎相似,这更加体现了本系统的小世界网络特性。

从图6可看出度数曲线的下降规律是在移除一定数量时曲线骤然下降,如节点7和节点14。而移除关键节点时曲线的下降更加平滑。说明每移除

一个关键节点都有大幅下降效率,并非是因为故障节点的叠加导致效率的下降。且从表4中可得除了前3个节点剩余的17个节点度数相同或者差值不大,这就难以识别关键节点位置,并且移除排名前10的关键节点的网络效率曲线比移除排名前10的高度数节点的网络效率曲线下降得更加快速。

图4~6说明了本文所提的考虑了能流和系统结构的识别方法比只考虑结构的识别方法更具有可靠性和可行性。

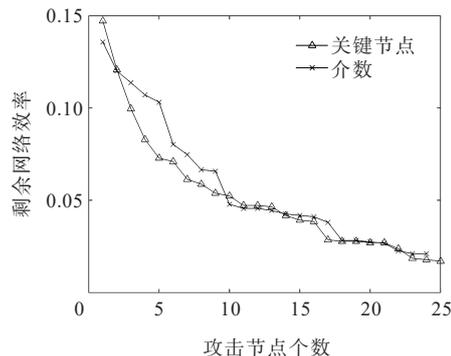


图4 关键节点与高介数节点网络效率图

Figure 4 Network efficiency diagram of key nodes and high intermediate nodes

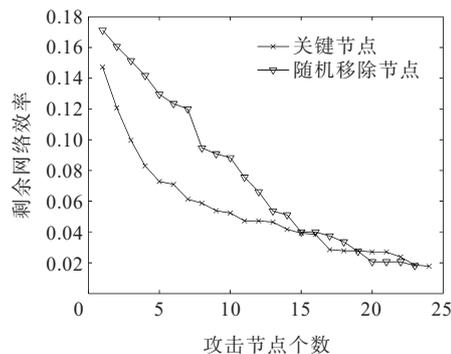


图5 关键节点与随机移除节点网络效率图

Figure 5 Network efficiency diagram of key nodes and randomly removed nodes

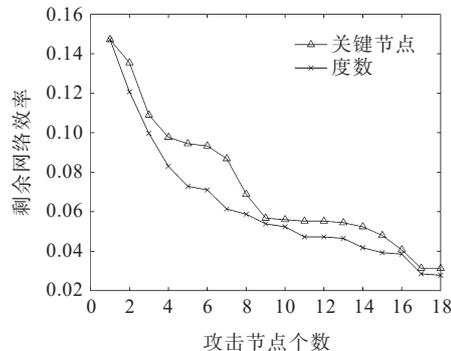


图6 关键节点与节点度数网络效率图

Figure 6 Network efficiency diagram of key nodes and node degrees

4.2 关键边排序及验证

计算能量边介数首先要知道潮流走向,以及发电机节点和与其有能源传递关系的负荷节点之间的能源传输路径。如从发电机节点 2 开始搜索,找到与其相连且相位低于它的节点,并保存,以此类推,直到搜索到负荷节点,结束搜索。表 5 为发电机与其对应的负荷节点对。

表 5 发电机与其对应的负荷节点对表

Table 5 Comparison of the generator and its corresponding load node

发电机节点	负荷节点
1	7, 17, 21, 24, 26, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 36, 38, 39, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52
2	7, 17, 21, 24, 26, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 36, 38, 39, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 33, 34
8	31, 32, 36, 38, 39, 43, 44, 45, 47, 48, 49

通过前文所提方法对本文的所有节点对的主要输电路径进行计算得到各路径的能量边介数 H 。本文 IES 的复杂网络总共有 70 条边,在网络中起到主要枢纽的边可能只有十几条,所以表 6 列出了能量边介数前 12 的边,作为本系统的关键边。表 7 为 15 条边的介数。

表 6 能量边介数排序表

Table 6 Ranking of energy edge medium

边	H	边	H	边	H
4, 6	46	25, 27	33	34, 37	24
30, 38	39	38, 33	30	32, 39	21
22, 24	39	33, 34	27	39, 47	18
24, 25	37	37, 32	24	28, 27	18

表 7 边介数排序表

Table 7 Ranking of edge intermediates

边	边介数	边	边介数	边	边介数
24, 25	0.093	40, 41	0.062	31, 35	0.044
30, 38	0.090	32, 39	0.058	47, 40	0.042
27, 30	0.083	39, 47	0.052	23, 24	0.042
37, 32	0.065	22, 24	0.048	38, 33	0.041
25, 27	0.064	38, 31	0.047	33, 34	0.038

为验证能量边介数的可行性,设计如下 2 条攻击规则。

- 1) 对关键边按照顺序进行攻击,对网络的边进行随机攻击,比较 2 种攻击模式下网络的剩余网络效率。
- 2) 对关键边按照排序进行攻击,对边介数按照

顺序攻击,比较 2 种攻击模式下的剩余网络效率。

从图 7 可得出:随机攻击和攻击关键边时攻击第 1 条边对网络的影响几乎一样,但当攻击第 2 条关键边时对网络的影响要比随机攻击 1 条边的影响大,在攻击前 4 条关键边时网络效率下降极快。这 4 条边基本都处在系统中 2 种能源的连接处并且也都是能量传输较大的边。也可知攻击关键边的网络效率曲线一直低于随机攻击边的网络效率曲线。

图 8 中攻击前 4 个高能量边介数的边时网络效率曲线下降得更加陡峭,说明这 4 条边在网络中的关键程度很高并且高于边介数排序出来的边。能量边介数曲线大部分时候都低于边介数曲线,这说明在同样个数的边故障时,消除能量边介数高的边能使网络故障更加严重,也就验证了能量边介数的可行性。

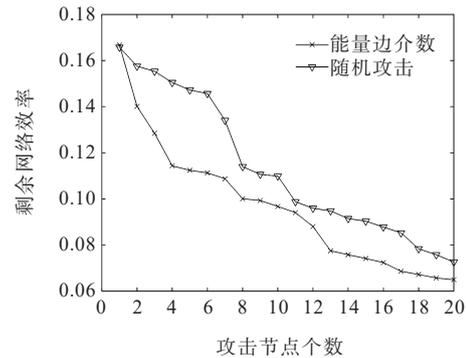


图 7 随机攻击和能量边介数网络效率对比图
Figure 7 Comparison of network efficiency at random attacks and energy edge intermediates

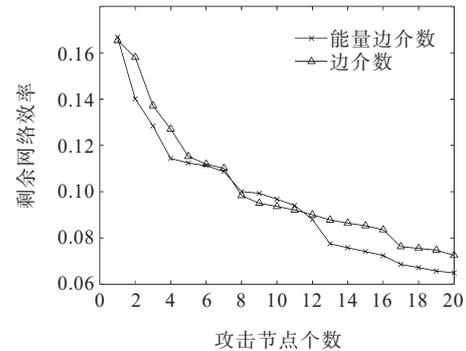


图 8 边介数和能量边介数网络效率图
Figure 8 Efficiency of edge intermediary number and energy edge intermediary number networks

4.3 方法通用性验证

为验证本文所提方法在绝大多数 IES 中均可使用,在由 IEEE 39 节点和 7 节点气网组成的 IES 中运用本文方法进行关键环节识别。IES-46 结构图如图 9,节点和边的排序结果见表 8、9。

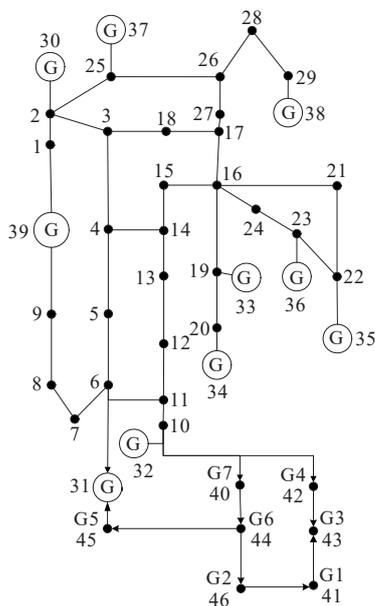


图9 IES-46拓扑图

Figure 9 IES-46 topology diagram

表8 节点关键程度排序

Table 8 Node criticality ranking

排序	节点	排序	节点	排序	节点
1	16	5	3	9	10
2	2	6	4	10	11
3	6	7	5	11	13
4	26	8	8	12	14

表9 关键边排序

Table 9 Key edge ranking

排序	边	排序	边	排序	边
1	6,31	5	5,8	9	29,38
2	19,20	6	25,37	10	5,6
3	16,17	7	44,46	11	7,8
4	3,4	8	17,18	12	21,22

应用前文方法对边和节点进行攻击,并观察网络的网络效率变化。图10表示在3种攻击方案下剩余网络效率曲线的变化趋势,当按照关键节点排序攻击节点,网络效率下降的速度最快且效率降到0.1也最早,验证了本文方法在这种组网下的可行性。图11表示在3种攻击边的方案下剩余网络效率曲线的变化趋势,按照关键边排序攻击边,系统的网络效率下降得比另外2种方案更快,并且在攻击第11条边时网络效率骤降,因为前10条边的损坏使系统已经在崩溃的边缘,故第11条边损坏打破了这种平衡从而导致效率骤降,随机攻击第18条边也是这种现象。

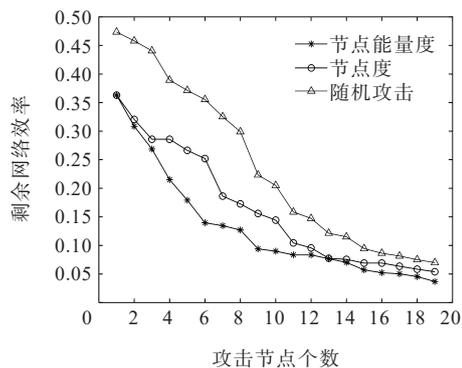


图10 攻击节点后剩余网络效率

Figure 10 Remaining network efficiency after attacking nodes

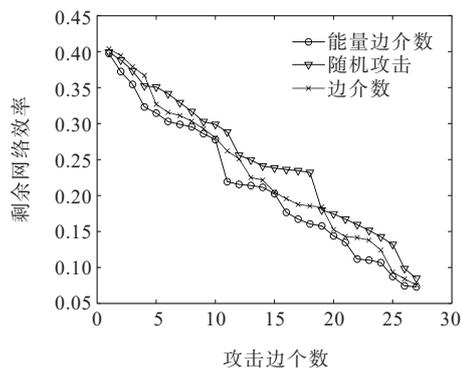


图11 攻击边后剩余网络效率

Figure 11 Remaining network efficiency after attacking the edge

5 结语

本文提出了基于潮流和复杂网络理论的IES识别方法,得到以下结论。

1) 构造了将能流和拓扑相结合的复杂网络模型,该模型更加符合实际运行的工况。同时,提出了将潮流和拓扑结构结合的评价指标,通过潮流计算和评价指标得出了关键环节的排序。

2) 通过仿真验证了所提识别方法能够辨识出节点度数和介数无法辨识的关键环节,有效提高识别精度,降低了误差。本文运用结构和能流相结合的方法,为未来IES在脆弱性方面的研究提供了思路。

参考文献:

[1] DANCKER J, WOLTER M. A joined quasi-steady-state power flow calculation for integrated energy systems[J]. IEEE Access, 1961, 10: 33586-33601.

[2] YIN L F, ZHANG B. Relaxed deep generative adversarial networks for real-time economic smart generation dispatch and control of integrated energy systems[J].

- Applied Energy,2023,330:120300.
- [3] WANG Y L,LIU C,QIN Y M,et al.Synergistic planning of an integrated energy system containing hydrogen storage with the coupled use of electric-thermal energy [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48 (40):15154-15178.
- [4] 蒋明喆,成贵学,赵晋斌.考虑动态荷储策略的综合能源系统双层规划模型[J].电力科学与技术学报,2022,37 (5):44-57.
JIANG Mingzhe,CHENG Guixue,ZHAO Jinbin.Double-deck planning model of integrated energy system in consideration of dynamic load energy storage strategy[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2022, 37(5):44-57.
- [5] ZHANG B,HU W H,CAO D,et al.Economical operation strategy of an integrated energy system with wind power and power to gas technology - a DRL-based approach[J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(17): 3292-3299.
- [6] 刘赫川,周孝信,杨小煜,等.考虑天然气季节性存储的综合能源系统年度运行方式研究[J].中国电力,2022,55 (4):145-155.
LIU Hechuan, ZHOU Xiaoxin, YANG Xiaoyu, et al. Annual operation mode study of integrated energy system considering seasonal natural gas storage[J]. Electric Power,2022,55(4):145-155.
- [7] 陈胜,张景淳,卫志农,等.面向能源转型的电—气—氢综合能源系统规划与运行[J].电力系统自动化,2023,47 (19):16-30.
CHEN Sheng, ZHANG Jingchun, WEI Zhinong, et al. Energy transition oriented planning and operation of electricity-gas-hydrogen integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems,2023,47(19):16-30.
- [8] 王琛,王颖,郑涛,等.基于ResNet-LSTM网络和注意力机制的综合能源系统多元负荷预测[J].电工技术学报, 2022,37(7):1789-1799.
WANG Chen, WANG Ying, ZHENG Tao, et al. Multi-energy load forecasting in integrated energy system based on ResNet-LSTM network and attention mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2022,37(7):1789-1799.
- [9] 亢猛,钟祎勍,石鑫,等.计及负荷供给可靠性的园区综合能源系统两阶段优化方法研究[J].发电技术,2023,44 (1):25-35.
KANG Meng,ZHONG Yiqing,SHI Xin,et al.Research on two-stage optimization approach of community integrated energy system considering load supply reliability[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(1): 25-35.
- [10] 冉华军,祝杰,张涛.基于类电磁机制算法的综合能源系统多目标优化调度[J].智慧电力,2022,50(3):22-29.
RAN Huajun, ZHU Jie, ZHANG Tao. Multi-objective optimal scheduling of integrated energy system based on electromagnetism-like mechanism algorithm[J]. Smart Power,2022,50(3):22-29.
- [11] STENNIKOV V, BARAKHTENKO E, MAYOROV G. An approach to energy distribution between sources in a hierarchical integrated energy system using multi-agent technologies[J].Energy Reports,2023,9:856-865.
- [12] 乔志杰,马临超.适用于电力系统稳定性提升的大规模储能控制策略研究[J].高压电器,2022,58(12):75-84+91.
QIAO Zhijie, MA Linchao. Research on large-scale energy storage control strategy for power system stability improvement[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(12):75-84+91.
- [13] CHEN Z H, WU J J, XIA Y X, et al. Robustness of interdependent power grids and communication networks: a complex network perspective[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II:Express Briefs, 2018,65(1):115-119.
- [14] 李昌超,康忠健,于洪国,等.基于PageRank改进算法的电力系统关键节点识别[J].电工技术学报,2019,34(9): 1952-1959.
LI Changchao, KANG Zhongjian, YU Hongguo, et al. Identification method of key nodes in power system based on improved PageRank algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(9): 1952-1959.
- [15] CUI X H, YUN Z H, LIU G P. Key node identification of power grid based on AP clustering[C]//2018 14th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD). Huangshan, China. IEEE, 2018:1-5.
- [16] 刘志宏,邵振通,丛鹏,等.基于节点可靠性重要度评估的配网侧储能鲁棒规划方法[J].电网与清洁能源,2023, 39(2):33-39+45.
LIU Zhihong, SHAO Zhentong, CONG Peng, et al. A robust planning method for distribution-level energy storage based on nodal reliability importance assessment [J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(2): 33-39+45.
- [17] 王波,王红霞,朱丹蕾,等.基于统一潮流大数据的综合能源系统薄弱点辨识方法[J].电力系统自动化,2022,46 (7):85-93.
WANG Bo, WANG Hongxia, ZHU Danlei, et al. Identification method for weak nodes of integrated energy system based on big data of unified power flow [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(7): 85-93.
- [18] 王环.基于改进K-shell算法的复杂网络关键节点识别研究[D].上海:华东师范大学,2019.
WANG Huan. Research on vital nodes identification in complex network based on improved K-shell algorithm

- [D].Shanghai:East China Normal University,2019.
- [19] 何铭,邹艳丽,梁明月,等.基于多属性决策的电力网络关键节点识别[J].复杂系统与复杂性科学,2020,17(3):27-37.
HE Ming, ZOU Yanli, LIANG Mingyue, et al. Critical node identification of a power grid based on multi-attribute decision[J]. Complex Systems and Complexity Science,2020,17(3):27-37.
- [20] LIU B,LI Z,CHEN X,et al.Recognition and vulnerability analysis of key nodes in power grid based on complex network centrality[J].IEEE Transactions on Circuits and Systems II:Express Briefs,2018,65(3):346-350.
- [21] ZHU D R,WANG R,DUAN J D,et al.Comprehensive weight method based on game theory for identify critical transmission lines in power system[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2021, 124:106362.
- [22] 谢李为,李勇,罗隆福,等.基于复杂网络与运行因素的电网薄弱点辨识方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(4):83-91.
XIE Liwei, LI Yong, LUO Longfu, et al. A vulnerable points identification method based on complex network theory and an operation index[J]. Power System Protection and Control,2022,50(4):83-91.
- [23] 李维维,钱瞳,唐文虎,等.电—气综合能源系统的综合灵敏度指标构建方法和应用研究[J].全球能源互联网, 2022,5(2):118-126.
LI Weiwei, QIAN Tong, TANG Wenhui, et al. Research on construction method and application of composite sensitivity index for integrated electricity and natural gas systems[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022,5(2):118-126.
- [24] 苏洁莹,林楷东,张勇军,等.基于统一潮流建模及灵敏度分析的电—气网络相互作用机理[J].电力系统自动化,2020,44(2):43-52.
SU Jieying, LIN Kaidong, ZHANG Yongjun, et al. Interaction mechanism of electricity-gas network based on unified power flow modeling and sensitivity analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 43-52.
- [25] 王程,吴科宏,贾起越,等.基于显式差分的区域电—气综合能源系统动态能流计算方法[J].中国电机工程学报,2022,42(16):5775-5785+6155.
WANG Cheng, WU Kehong, JIA Qiyue, et al. An explicit difference based calculation method for dynamic energy flow of integrated electric-gas systems[J]. Proceedings of the CSEE,2022,42(16):5775-5785+6155.
- [26] 董文杰,李俊格,田志强,等.考虑精细模型的电—气综合能源系统优化运行方法[J].电测与仪表,2022,59(11):26-33.
DONG Wenjie, LI Junge, TIAN Zhiqiang, et al. Optimal operation method of electric-gas integrated energy system considering detailed model[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2022,59(11):26-33.
- [27] COELHO P M, PINHO C. Considerations about equations for steady state flow in natural gas pipelines[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering,2007,29(3):262-273.
- [28] OYANG B,QU L,YUAN Z C,et al.Study on steady-state power flow optimization of cold-heat-electricity integrated energy system[C]//2020 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC).Chengdu,China. IEEE,2020:1391-1396.
- [29] 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.
- [30] 刘育杰.电—气—热—冷综合能源系统多能潮流计算[D].长春:吉林大学,2021.
LIU Yujie. Multi energy power flow calculation of electricity-gas-heat-cooling integrated energy system[D]. Changchun:Jilin University,2021.
- [31] 陈彬彬,孙宏斌,吴文传,等.综合能源系统分析的统一能路理论(三):稳态与动态潮流计算[J].中国电机工程学报,2020,40(15):4820-4831.
CHEN Binbin, SUN Hongbin, WU Wenchuan, et al. Energy circuit theory of integrated energy system analysis(III):steady and dynamic energy flow calculation [J].Proceedings of the CSEE,2020,40(15):4820-4831.