

基于复杂网络的电-气-热综合能源系统健壮性分析

潘 华¹, 肖雨涵¹, 梁作放², 朱兆顺¹, 何 辉¹

(1. 上海电力大学 经济与管理学院, 上海 200090; 2. 国网山东省电力公司菏泽供电公司, 山东 菏泽 274000)

摘要:随着综合能源系统网络规模的不断扩大以及耦合程度的不断加强,对其结构的稳定性和运行的安全性提出了更加严格的要求,为此将复杂网络理论运用到综合能源系统的静态结构与健壮性分析中。利用NetworkX对系统进行网络拓扑建模并调用G.degree、nx.betweenness_centrality(G)、nx.average_clustering(G)等算法计算其网络特征参数,在此基础上进一步分析计算结果,研究综合能源系统的无标度与小世界等复杂网络特性。引入网络破碎度、连通因子、供能效率比3个分析指标,模拟系统受到7种不同模式的破坏,通过观察不同故障下电-气-热综合能源系统的网络破碎度、连通因子、供能效率比的变化曲线,综合分析系统在不同故障下的健壮性并对系统中的脆弱环节进行识别,研究成果为建设更可靠的大规模综合能源系统网络体系提供了参考和决策支持。

关键词:复杂网络;综合能源系统;小世界网络;无标度网络;健壮性

中图分类号:TM 761

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201908002

0 引言

能源是现代人类赖以生存的基础,随着新一轮能源革命的推进,多能源互补耦合的综合能源系统应运而生。相较于传统的电力网络,综合能源系统中交叉互联的各种能源使得系统运行和控制的复杂程度大幅增强,因此对系统的可靠、安全运行提出了更高的要求^[1]。能源安全直接关系到经济发展和社会民生,同时是关乎国家能源工业安全与稳定的重要因素之一^[2]。系统一旦出现重大故障,若能源装备故障预防与保护不当,将会导致事故发生,甚至将发展为大规模的能源供应链断裂事故^[3-4]。将复杂网络理论运用到综合能源系统的健壮性分析中,可以识别系统网络中的薄弱环节、评价系统的抗毁能力,为确保未来综合能源系统的安全、可靠运行提供保障。

目前已有学者对电力系统、天然气系统等单一能源系统的复杂网络静态特性与健壮性进行了相关的研究。以往的大量研究通过网络参数计算与分析表明了传统电力系统具有明显的小世界特性和无标度特性等复杂网络特性^[5-7]。文献[8]利用复杂网络理论对电力系统建模的可行性进行了论述,并讨论了复杂网络理论在电力系统中的应用思路,为电力系统的脆弱线路辨识提供了研究方法。文献[9]提出一种

基于图论与复杂网络理论的天然气管道网络系统的建模方法,并对天然气管网的脆弱性与鲁棒性进行了分析,研究表明可以通过控制、保护管网的脆弱点,提高管网的鲁棒性,从而控制和减少天然气管网系统的风险。以上研究将复杂网络理论较为成熟地运用于单一能源系统,但目前鲜有学者将其运用于综合能源系统的具体研究中。一些学者对复杂网络视角下的多能源互联系统进行了理论性研究,文献[10]提出从节点规模、网络拓扑结构和故障传播机制来看,多能源互联网络具有典型的复杂网络特征,并且有必要从复杂网络的角度分析耦合系统的健壮性问题;文献[11]建立了一种基于复杂混合网络的多能源互联网络模型,发现了具有不同节点能量分布与节点位置的相互关系;文献[12]提出了狭义多能源互联系统的优化控制框架,并分析了狭义能源互联网的脆弱性。以上文献都未提出相对具体的复杂网络视角下综合能源系统的建模或健壮性分析方法。

基于上述研究,综合能源系统可以归纳为电力系统、天然气系统等多能源系统彼此依赖而组成的耦合体,相较于文献[5-9]中具有无标度或者小世界网络特性的原单一能源系统,综合能源系统具有更庞大的节点规模、更复杂的网络拓扑结构以及更深远的故障传播机制,这些皆符合复杂网络的典型特征。同时随着综合能源系统网络规模的不断扩大以及耦合程度的不断加强,关键性节点发生故障将会对整个能源系统的安全稳定运行造成更大的影响,因此需要从复杂网络角度分析多能源耦合后综合能源系统的健壮性问题。

本文在总结当前基于复杂网络的单一能源系统构架与多能源互联网研究的基础上,提出在复杂网络视角下综合能源系统健壮性分析的模型与方法,并将

收稿日期:2019-03-19;修回日期:2019-05-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71601109);教育部人文社科基金资助项目(17YJCZH062);上海高校人文社科重点研究基地建设项目(WKJD15004)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (71601109), the MOE (Ministry Of Education in China) Project of Humanities and Social Sciences (17YJCZH062) and the Construction Project of Key Research Base of Humanities and Social Sciences in Shanghai Universities (WKJD15004)

其运用到电-气-热综合能源系统网络中。利用基于Python语言的NetworkX软件包对模型进行转化与计算,引入网络破碎度、连通因子和供能效率比这3个分析指标,根据不同的模拟故障下系统的受损情况综合分析综合能源系统的健壮性,识别系统中存在的潜在脆弱点,为综合能源系统大规模工程的实践奠定基础。

1 复杂网络特征研究

1.1 复杂网络特征参数

复杂网络通常由节点和边组成,其中节点是网络中的基本元素,边连接系统中的各节点,描述系统元素之间的相互关系。由此复杂网络可以简单表述为:

$$G_n = (N, E) \quad (1)$$

$$N = \{n_i\}, E = \{e_{jk}\} \quad (2)$$

其中, G_n 为复杂网络图; N 、 E 分别为网络中所有节点与边的集合; n_i 为节点 i ; e_{jk} 为连接节点 j 与节点 k 之间的边。

通过一些网络特征参数可以表征系统拓扑结构的各种特征,本文选取度数、介数等参数的同时,引入节点重要度的概念衡量电力系统网络、天然气网络、热力网络以及能源集线器元件的重要程度,通过平均最短距离、聚类系数、度分布等参数研究综合能源系统的网络复杂特性。

(1) 节点度数。

在综合能源系统无向网络拓扑图中,节点的度数是指与某节点相邻的节点数,那么节点 i 的度数 d_i 为:

$$d_i = \sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} e_{ij} \quad (3)$$

(2) 节点介数。

节点介数是测量节点中心性的标准方法之一,综合能源系统网络中的节点介数是指在网络中所有能源负荷节点与其他节点之间最短路径所经过的次数,则节点 i 的介数 b_i 为:

$$b_i = \sum_{\substack{j, k \in N \\ j \neq k}} n_{jk}(i) / n_{jk} \quad (4)$$

其中, n_{jk} 为节点 j 至节点 k 的最短路径数目; $n_{jk}(i)$ 为节点 j 至节点 k 同时通过节点 i 的最短路径数目。另外由节点介数可以拓展出边介数的概念,其可表述为与该边相连接的两节点间的最短路径数。

(3) 平均最短距离。

连接节点 i 和节点 j 之间通过最少的边数目被称为最短距离 d_{ij} ,则网络中所有节点之间最短距离的平均值即为平均最短距离,也称为平均距离 L ,如式(5)所示。

$$L = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{\substack{i, j \in N \\ i \neq j}} d_{ij} \quad (5)$$

其中, n 为节点总数。

(4) 聚类系数。

聚类系数表示一个网络中节点 i 与所有相邻节点的聚集程度。节点 i 的度数为 d_i 表明有 d_i 个节点与节点 i 相邻,那么 d_i 个相邻节点之间最多可能存在的边数为 $d_i(d_i+1)/2$,设其实际存在的边数为 x_i ,则节点 i 的聚类系数 C_i 为:

$$C_i = \frac{2x_i}{d_i(d_i+1)} \quad (6)$$

则网络的平均聚类系数 C 可以描述为:

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i \quad (7)$$

(5) 节点重要度。

在以往的节点重要性研究中通常采用节点度数衡量系统中各节点的重要程度,即认为与某节点连接的节点数越多,则其越重要,而实际上在很多情况下度数小的节点也可能具有较高的重要程度,因此本文引入了节点重要度这一概念来衡量综合能源系统中节点的重要程度^[13]。节点重要度示意图如图1所示。将图1(a)中与节点1相连的节点进行收缩,即将节点1—4收缩为1个节点(节点0),收缩结果如图1(b)所示,由此节点 i 的收缩过程可以描述为将该节点与其相连的节点合并为1个节点。

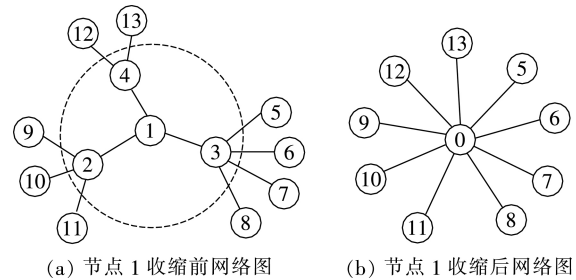


图1 节点重要度示意图

Fig.1 Schematic diagram of node importance degree

图1可以比较直观地反映节点1的度数虽然较低,但是具有较高的重要性。节点 i 的重要度 α_i 表示为:

$$\alpha_i = 1/(n'_i l_i) \quad (8)$$

其中, n'_i 、 l_i 分别为节点 i 收缩后的网络节点数与平均最短距离。

根据式(8)计算节点1—4的重要度,结果如表1所示。

对比表1中的计算结果可以明显看出,节点1的度数相较于其他节点而言最低,但其重要度最高,因此应对节点的重要性进行更加全面综合的考虑。

表1 节点重要度的计算结果
Table 1 Calculative results of node importance degree

节点	d_i	n_i	l_i	α_i	节点	d_i	n_i	l_i	α_i
1	3	10	1.80	0.056	3	5	8	2.36	0.053
2	4	9	2.39	0.046	4	3	10	2.49	0.041

1.2 复杂网络的小世界特性

小世界网络介于规则和随机网络之间,其具有较高聚类系数和较短平均距离长度的特点^[14]。由于在现实情况下出现完全规则或随机网络的可能性非常小,因此在复杂网络中小世界网络最贴近现实。由于小世界网络具有以上特点,因此其系统信息的传递速度快,并且少量改变几个连接就可以剧烈地改变网络的性能。判断网络是否具有小世界特性的判据如下:

$$\begin{cases} L \geq L_{\text{random}} \\ C \gg C_{\text{random}} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} L_{\text{random}} \approx \frac{\ln n}{\ln d} \\ C_{\text{random}} \approx d/n \end{cases} \quad (10)$$

其中, C_{random} 、 L_{random} 分别为与所研究的复杂网络节点数和平均度数相同的随机网络的聚类系数、平均最短距离; d 为所有节点的平均度数。

1.3 复杂网络的无标度特性

在复杂网络中节点的连接度没有明显的度,在整体上符合幂律分布^[15]。无标度并非没有标度,也非无标度均值,而是由于幂函数的曲线不会随其测量单位标度而变化,因此无标度表示为幂律度分布的标度具有不变性^[16-17]。无标度网络中存在少量度数很大的节点,度分布的数学表达式为:

$$P(K) = \frac{n_K}{n} \sim K^{-\gamma} \quad (11)$$

其中, $P(K)$ 为度分布; n_K 为度数是 K 的节点个数; γ 为幂函数系数。

2 基于复杂网络的综合能源系统网络建模

2.1 基于能源集线器的综合能源系统拓扑模型

研究综合能源系统的健壮性须根据综合能源的运行和结构特点构造一个完整的综合能源系统网络模型。本文所建立的电-气-热区域综合能源系统的拓扑结构中,主要利用能源集线器描述其能源耦合环节。能源集线器可实现电、气、冷、热等能源间的转换、存储、分配等功能^[18-19]。综合能源系统中的能源耦合密切且用户的能源需求种类多样,本文选取学术研究中应用较广泛的3种典型能源集线器作为综合能源系统的耦合元件,通过这3种典型的能源集线器能够实现大部分电、气、热能源系统的耦合^[1,20]。本文综合能源系统拓扑图中涉及的3种典型能源集线器如图2所示。图中, T 为变压器; AC 为空调系统; GF

为燃气锅炉; C 为压缩机; HE 为换热器; H 为电加热器; MT 为微型燃气轮机; P_e 、 P_g 、 P_h 分别为电力、天然气、热力输入; L_e 、 L_g 、 L_h 分别为电力、天然气、热力输出。

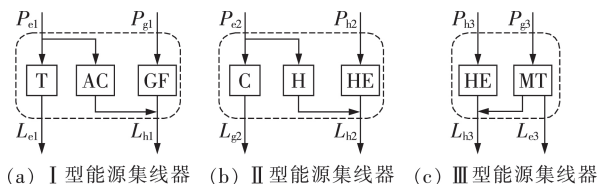


图2 3种典型的能源集线器
Fig.2 Three typical energy hubs

在 I 型能源集线器中, L_{h1} 既可由燃气锅炉供应,也可通过空调系统转化而来; II 型能源集线器中的电加热器将电能与热能进行转换,再通过压缩机供给天然气系统能量; III 型能源集线器通过微型燃气轮机使天然气可以为电力系统提供能量,同时微型燃气轮机亦是负荷。电力系统(IEEE 30 节点系统)、天然气系统(改进低压配气 18 节点系统)以及热网元件可通过以上 3 种典型的能源集线器为耦合环节对各单能源系统进行交互,形成基于能源集线器的电-气-热综合能源网络模型,网络模型如附录中的图 A1 所示。图 A1 中的电力系统、天然气系统以及热网元件通过能源集线器达到了完全耦合的形式,在这种方式下能源系统可以灵活地优化配置并且形成能源相互支撑的模式。

2.2 综合能源系统复杂网络模型

电力系统有着数量庞大的点和边,其网络呈现高度的复杂性,通过能源集线器将电力系统与天然气系统、热网元件相耦合的综合能源系统将呈现更高的复杂性。在复杂网络视角下研究综合能源系统,需将综合能源系统网络模型简化为复杂网络图。

基于复杂网络的综合能源系统建模通常只考虑系统结构与关系这 2 个因素,因此本文构建的网络拓扑模型为静态模型,其简化原则可以简单描述为:可将发电机、气源、热源、电/气/热负荷和能源集线器包含的元器件等简化为节点,将输电线、输气管道和热网供/回水管道等支路简化为边,其中由于热网管道中供水或回水管道的任意 1 条发生故障,都将导致供水、回水线路失效,因此将供水、回水管道简化为 1 条边。假设输电线的电压等级和各种特性参数相同,各天然气及热网管段的长度、管径、设计压力、管段的相对粗糙率均一致,因此设定边皆为权重是 1 的无向边^[21-22]。在基于 Python 语言的 NetworkX 软件包中进行编程,将综合能源网络模型图抽象成复杂网络模型图,通过调用 $G.degree$ 、 $nx.betweenness_centrality(G)$ 、 $nx.average_clustering(G)$ 和 $nx.average_shortest_path_length(G)$ 等算法计算度数、介数、平均聚类系数和平均最短距离等复杂网络特征参数。通过 NetworkX 将

附录中图A1所示电-气-热综合能源系统的拓扑图简化为复杂网络模型图,如图3所示。

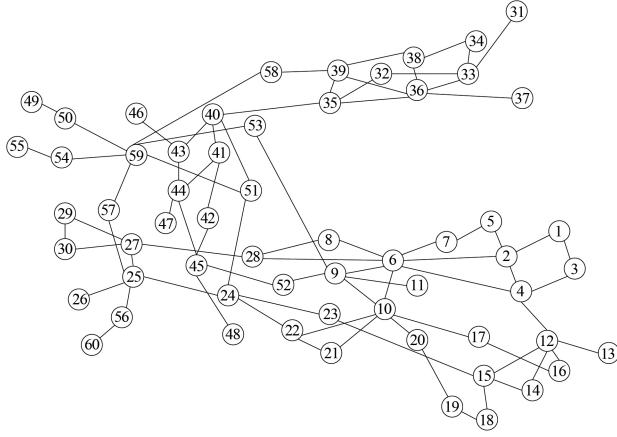


图3 电-气-热综合能源系统的复杂网络模型图

Fig.3 Complex network model of electricity-gas-heat integrated energy system

3 健壮性分析

3.1 健壮性分析指标

健壮性也被称为鲁棒性或抗毁性,其可以表述为系统在受到破坏时依旧保持原有功能的能力,本文通过引入网络破碎度、连通因子、供能效率比这3个评价指标对综合能源系统进行健壮性分析。

(1) 网络破碎度。

当综合能源系统网络受到破坏或干扰后,可能导致网络结构分裂,分裂越严重意味着网络越破碎,系统瘫痪的可能性就越高,而健壮性就越差^[23]。网络破碎度可以通过最大连通子图的规模来衡量,即用受到破坏后网络中最大联通子图所包含的节点数占原始网络所包含节点数目的比例表示,如式(12)所示。

$$S = N_{\max} / N_{os} \quad (12)$$

其中, $N_{\max}$ 为受破坏后网络中最大联通子图所包含的节点数; N_{os} 为原始网络的总节点数。

(2) 连通因子。

当综合能源系统网络受到破坏时,其会破碎成多个子网络即子图(包括孤立的节点),网络受到破坏前系统网络的子图个数为 m ,受破坏后网络破碎成 m' 个子图,则连通因子 τ 可表示为:

$$\tau = m/m' \quad (13)$$

连通因子 τ 的变化范围为 $(0, 1]$, τ 的数值越小,表明网络的破碎程度越大,此时网络的健壮性越差。

(3) 供能效率比。

供能效率是指综合能源系统网络在满足一定条件下的整体供能效率。将供能节点与能量需求节点之间最短路径倒数的均值作为系统的供能效率,系统中供能节点到能量需求节点的距离越近,则传输效率越高^[22,24],本文将其定义如下:

$$E_p = \frac{1}{N_G + N_W + N_S + N_R} \sum_{i \in S_G, S_W, S_S, S_R} \sum_{j \in S_D} \frac{1}{d_{ij}} \quad (14)$$

其中, S_G, S_W, S_S, S_R, S_D 分别为发电机、气源、储气、热源、负荷节点集合; N_G, N_W, N_S, N_R 分别为发电机、气源、储气、热源节点数。

本文引入供能效率比来反映综合能源系统网络受到破坏后能量整体传输的变化情况,如式(15)所示。

$$e = E_p / E_0 \quad (15)$$

其中, e 为系统的供能效率比,当系统未受到破坏时 $e = 1$; E_0 为系统受破坏前的供能效率; E_p 为系统受到破坏后的供能效率。

3.2 健壮性分析破坏策略

在以往对复杂网络理论的分析中,大多学者已经不再严格地区分健壮性与脆弱性,对综合能源系统网络进行健壮性分析的目的是识别网络在遭受到不同的破坏时系统的变化状态、脆弱节点以及连接线路,以防范风险^[25]。传统的网络破坏策略按对象可以分为破坏节点和破坏线路,按破坏方式可以分为随机破坏和蓄意破坏。其中随机破坏模拟的是来自于自然界的破坏,例如自然灾害等,因此其破坏顺序不受人为控制;而蓄意破坏模拟的是来自系统敌对方或者恐怖势力的破坏,进行蓄意破坏时攻击者将从最重要的元器件或线路开始,按重要程度由高到低对系统进行破坏,攻击者对节点、边的重要程度的判定方式有所不同,导致破坏顺序也有所不同。因此本文采用一组随机和蓄意的模拟破坏模式来观察综合能源系统网络结构的变化情况,并以此衡量综合能源系统网络的健壮性,因此将破坏策略细分如下。

(1) 随机破坏网络节点:在网络中随机选取占全网节点总数相同比例的节点进行随机破坏。

(2) 优先破坏网络中度数较高的节点:对网络中所有节点按照度数从高到低进行排序,依次对其进行破坏,对于度数相同的节点,又分为随机破坏与优先破坏重要度最高节点2种顺序。

(3) 优先破坏网络中重要度较高的节点:根据1.1节介绍的方法对网络中所有节点的重要度进行计算并排序,按照重要度由高到低的顺序对节点进行破坏。

(4) 优先破坏网络中介数较高的节点:对网络中所有节点的介数进行计算并排序,按照节点介数由高到低的顺序对节点进行破坏。

(5) 随机破坏网络边:在网络中随机选取占有全网节点总数相同比例的边进行随机破坏。

(6) 优先破坏网络中介数较高的边:对网络中所有边的介数进行计算排序,按照边介数由高到低的顺序对边进行破坏。

需要说明的是,本文中的网络破坏是突破设备本身的安保措施后对综合能源系统进行的物理破坏,破坏者如何突破设备本身的安保措施本文不予考虑;一般情况下,系统节点或线路在遭受破坏后因损坏而彻底退出网络,但在计算系统供能效率时,由于节点或边的退出,原网络将被分解成若干个子网络,造成无法计算最短距离,在该情况下可将受到破坏的边或与受破坏节点相连边的权重设置为100来模拟其受到破坏的状态;此外,无论是对节点或是对边的破坏,后一次破坏都是基于前一次破坏情况下进行的深入破坏。破坏算法的流程图如图4所示。

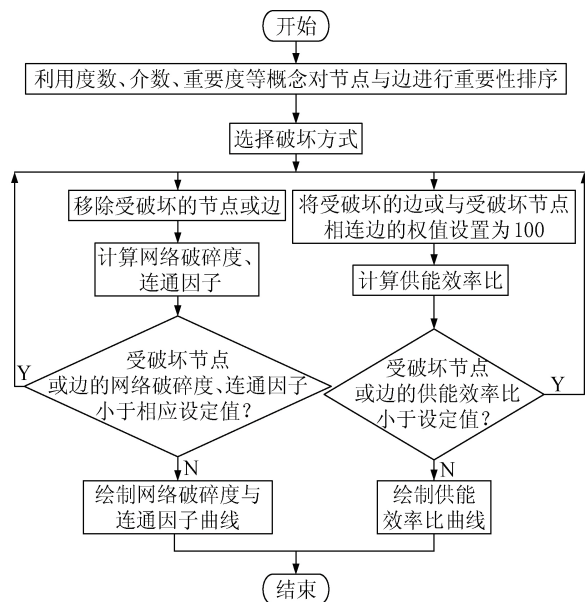


图4 破坏算法的流程图

Fig.4 Flowchart of attack algorithm

4 算例分析

4.1 电-气-热综合能源系统网络结构分析

在前文所建立的电-气-热综合能源系统复杂网络模型的基础上,首先对其网络结构进行分析。选取网络中30%的节点与29%的边进行分析,利用NetworkX调用算法计算该综合能源系统中各节点与边的参数并对其进行排序,按度数从高到低的顺序选取排在前30%的节点(度数相同的节点随机排列),如表2所示。

表2 电-气-热综合能源系统的节点度数

Table 2 Node degree of electricity-gas-heat integrated energy system

节点	度数	节点	度数	节点	度数
6	7	36	5	33	4
10	6	2	4	35	4
59	6	4	4	39	4
9	5	15	4	40	4
12	5	24	4	44	4
25	5	27	4	45	4

综合能源系统网络节点的度分布曲线如图5所示,双对数坐标下的累积度分布曲线如图6所示。由图5可以很直观地看出,综合能源系统网络中大部分节点的度数较低,只有极少数节点具有高度数,符合无标度特性;由图6可以看出,双对数坐标下的累积度分布曲线的后半部分基本呈现线性,亦符合无标度特性。

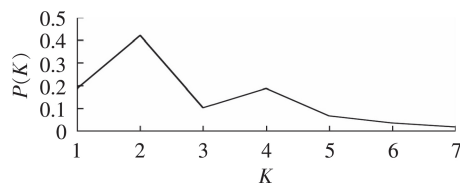


图5 度分布曲线

Fig.5 Degree distribution curve

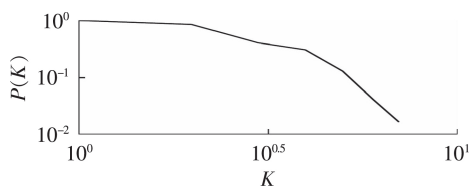


图6 累积度分布曲线

Fig.6 Cumulative degree distribution curve

电-气-热综合能源系统网络的平均度数、平均聚类系数和平均最短距离分别为2.7、0.1307、4.6921。

与本文算例中综合能源系统网络具有相同节点与边数的随机网络的平均最短距离与聚类系数为:

$$\begin{cases} L_{\text{random}} \approx \frac{\ln n}{\ln d} = \frac{\ln 60}{\ln 2.7} = 4.122 \\ C_{\text{random}} \approx \frac{d}{n} = \frac{2.7}{60} = 0.045 \end{cases}$$

根据小世界判据,即 $L \geq L_{\text{random}}$ 、 $C \gg C_{\text{random}}$,可知该综合能源系统网络的平均最短距离大于其对应的随机网络的平均最短距离,而其聚类系数为相对应的随机网络最短距离的2倍,因此可以认为该综合能源系统网络基本符合小世界特性,即与其所对应的随机网络更具有小世界特性。

根据上文所介绍的方法计算节点重要度,并由高到低进行排序,排序前30%的节点重要度如表3所示。

表3 电-气-热综合能源系统的节点重要度

Table 3 Node importance degree of electricity-gas-heat integrated energy system

节点	重要度	节点	重要度	节点	重要度
59	4.425×10^{-3}	51	4.237×10^{-3}	53	4.009×10^{-3}
6	4.419×10^{-3}	36	4.149×10^{-3}	33	4.008×10^{-3}
9	4.375×10^{-3}	25	4.084×10^{-3}	4	3.993×10^{-3}
24	4.300×10^{-3}	39	4.083×10^{-3}	15	3.971×10^{-3}
10	4.258×10^{-3}	35	4.054×10^{-3}	45	3.961×10^{-3}
40	4.238×10^{-3}	12	4.010×10^{-3}	58	3.935×10^{-3}

在重要度排序前30%的18个节点中有8个节点为能源集线器元件或与能源集线器相连,占比约为45%,说明能源集线器元件或与能源集线器相关联的节点对于综合能源系统网络有着较为重要的地位。

通过调用节点介数与边介数算法对网络进行计算,并按照由高到低的顺序进行排序,选取介数排序前30%的节点和排序前20%的边,分别如表4、表5所示,为后续网络健壮性分析提供数据基础。

表4 电-气-热综合能源系统的节点介数

Table 4 Node betweenness of electricity-gas-heat integrated energy system

节点	介数	节点	介数	节点	介数
59	0.288 0	25	0.170 7	52	0.104 6
9	0.281 2	10	0.154 0	45	0.104 0
6	0.258 3	53	0.153 4	27	0.103 7
24	0.240 2	35	0.124 1	23	0.093 3
40	0.224 0	58	0.121 9	15	0.091 1
51	0.222 6	39	0.114 7	36	0.089 3

表5 电-气-热综合能源系统边介数

Table 5 Edge betweenness of electricity-gas-heat integrated energy system

边	介数	边	介数	边	介数
40-51	0.193 1	23-24	0.115 5	22-24	0.084 3
24-51	0.191 2	45-52	0.109 2	9-10	0.082 5
6-9	0.169 5	24-25	0.106 8	51-59	0.079 3
9-53	0.165 3	15-23	0.098 3	6-28	0.077 5
35-40	0.138 4	4-6	0.092 4	28-27	0.076 0
9-52	0.126 4	27-25	0.092 3	40-41	0.067 5

4.2 电-气-热综合能源系统网络健壮性分析

根据第3节介绍的健壮性分析破坏策略与分析指标,对算例中的综合能源系统复杂网络模型进行健壮性分析。在4.1节中已对综合能源系统网络的各节点与边的参数进行了计算,并选取较重要的节点与边对其进行排序。通过依次移除这些节点和边来模拟随机与蓄意破坏顺序,计算在不同的故障下综合能源系统网络的破碎度、连通因子、系统供能效率比。

以破坏程度即受破坏节点或边的数量占节点或边总数的比值为横坐标绘制综合能源系统网络在7种不同故障模式下逐个破坏18个节点和22条边后的网络破碎度指标函数曲线、连通因子指标函数曲线和系统供能效率比函数曲线,分别如图7—9所示。

通过对比图7—9所示不同破坏策略下的网络破碎度、连通因子与供能效率比曲线可得如下结论。

(1)在电-气-热综合能源系统网络中,相较于能源元器件或负荷节点受到破坏,当线路或管道受破坏时表现出更强的健壮性。

当节点破坏程度为20%时,随机破坏网络节点策略下的网络破碎度为0.717,连通因子为0.167,供能效率比为44.77%;相同的破坏程度下,随机破坏边策略下的网络破碎度为0.933,连通因子为0.333,供

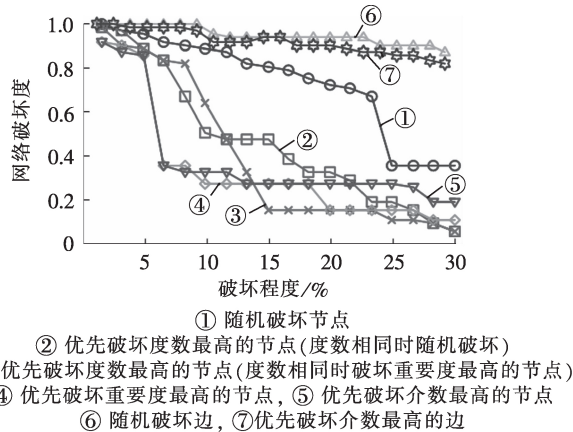


图7 不同破坏策略下综合能源系统的网络破碎度
Fig.7 Network fragmentation degree of integrated energy system under different attack strategies

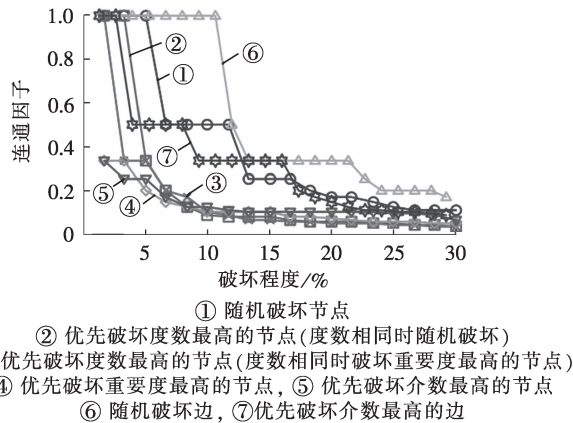


图8 不同破坏策略下综合能源系统的连通因子
Fig.8 Connectivity factor of integrated energy system under different attack strategies

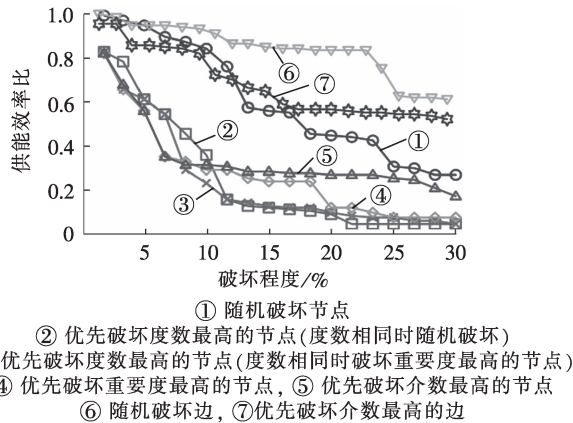


图9 不同破坏策略下综合能源系统的供能效率比
Fig.9 Energy supply efficiency ratio of integrated energy system under different attack strategies

能效率比为83.33%。从图7—9中可看出,对于蓄意破坏,当破坏程度相同时,节点受破坏时的各指标值也明显低于边受破坏时的各指标值。同时也可以较直观地看出,相较于破坏边,破坏节点时各指标曲线下降得更快,性能指标衰减得更大,这也说明破坏元

器件或负荷比破坏线路或管道对综合能源系统网络性能的影响更大。这是因为:当网络中的节点受到破坏时,必然会牵连到网络中的边甚至影响到多条线路;而当系统网络中的线路或管道受到破坏时,不一定会影响到网络节点。

(2)当电-气-热综合能源系统网络受到随机破坏时表现出比受到蓄意破坏时更强的健壮性。

由图7可直观发现,随机移除节点与边时的指标曲线比其他策略下的指标曲线下降得更为缓慢,当30%的节点遭受破坏时,随机破坏策略下的网络破碎度下降了65%,而其余蓄意破坏策略下的网络破碎度皆下降了85%以上;当节点破坏程度约为10%时,蓄意破坏策略下的网络性能急剧下降,而随机破坏策略下的网络性能的下降趋势较为平缓。

从图8中可以明显地看出,当蓄意破坏系统重要度、介数最高的节点时,系统的连通因子数值迅速下降到0.333,而当节点受到程度为5%的随机破坏与边受到程度为10.67%的随机破坏前,连通因子的值未发生变化,同时对比相同破坏程度范围内图7中的网络破碎度曲线,发现其变化趋势也相对较平缓。这主要是因为:当综合能源系统网络受到随机破坏时,其破坏程度未能导致系统立刻发生破裂,即不会产生新的能源孤岛,这时的网络连通因子将在一定的范围内保持不变,而图7中网络破碎度相关曲线没有发生变化的主要原因是破坏的元器件或线路不在最大连通子图内,即上一次故障后形成的能源孤岛,因此未对最大连通子图内的系统运行产生太大的影响。

以上结论反映了本文所建立的电-气-热综合能源系统具有复杂网络“无标度性”的特征。

(3)从系统网络破碎度与供能效率比来看,优先破坏度数最高的节点与破坏重要度最高的节点对系统产生的损害最大;从连通因子来看,优先破坏重要度最高的节点与破坏介数最高的节点对系统产生的损害最大。

由图8可知,当优先破坏重要度最高与介数最高的节点时,系统连通因子都降为0.333,这意味着综合能源系统立刻破裂为3个子系统,因此容易产生孤岛效应,严重影响综合能源系统的运行。对比随机破坏节点与优先破坏重要度最高的节点策略下的网络破碎度曲线(图7)和供能效率比曲线(图9)可发现,在节点度数相同的情况下,优先破坏重要度最高的节点策略下的网络破碎度急剧下降,而随机破坏策略下的曲线下降较为平缓。由图9中曲线②、③可看出,当破坏程度高于13.33%后,节点度数相同的情况下出现随机破坏策略(破坏到发电机节点2后)下的供能效率比低于优先破坏重要度最高的节点策略(破坏到负荷节点24后)下的供能效率比的情况,由此说明对于供能传输效率而言,重要度不能完全评价节点的重

要性,还应综合考虑是否为能源供应点等重要因素对节点进行综合评判。

5 结论

本文在复杂网络理论视角下建立了电-气-热综合能源系统网络模型,并利用NetworkX对系统进行网络拓扑建模与特征参数计算,通过进一步的数据分析表明:本文所建立的综合能源系统网络模型具有无标度网络特性的同时较为接近小世界网络,符合复杂网络特性。引入了网络破碎度、连通因子、供能效率比3个分析指标对电-气-热综合能源系统在7种不同破坏策略下进行了健壮性分析,通过分析发现基于复杂网络的电-气-热综合能源系统在面对边破坏与随机破坏时表现出相对较强的健壮性,面对各种蓄意节点破坏时也表现出了不同等级的健壮性。通过对比发现:从系统网络破碎度与供能效率比来看,优先破坏度数最高的节点与优先破坏重要度最高的节点对系统产生的损害最大;从连通因子来看,优先破坏重要度最高的节点与优先破坏介数最高的节点对系统产生的损害最大。

节点重要度等网络特征参数的引入解决了度数相同的情况下无法对节点进行合理排序的问题,同时证明了在综合能源系统中耦合元器件或与耦合元器件相关联节点对于系统健壮性起到较为重要的作用。但就供能效率而言,虽然一些供能点具有较低的度数和重要度,但其对供能效率具有重要的作用,因此应综合考虑。

复杂网络理论为分析综合能源系统网络结构提供了新的方法和研究角度,将复杂网络理论应用于能源系统领域,加强了能源系统与数学、系统科学等基础学科之间的交叉渗透,具有重要的理论意义和实际价值。

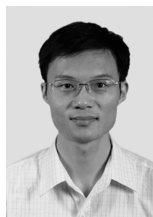
附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 彭克,张聪,徐丙垠,等. 多能协同综合能源系统示范工程现状与展望[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):3-10.
PENG Ke, ZHANG Cong, XU Bingyin, et al. Status and prospect of pilot projects of integrated energy system with multi-energy collaboration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 3-10.
- [2] 王琪鑫,刘涤尘,吴军,等. 计及用户行为分析的多能协同综合能源系统供需双侧综合优化[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):179-185.
WANG Qixin, LIU Dichen, WU Jun, et al. Comprehensive optimization including user behavior analysis for supply and demand sides of IES-MEC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 179-185.
- [3] 余晓丹,徐宪东,陈硕翼,等. 综合能源系统与能源互联网简述[J]. 电工技术学报,2016,31(1):1-13.
YU Xiaodan, XU Xiandong, CHEN Shuoyi, et al. A brief re-

- view to integrated energy system and energy internet[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 1-13.
- [4] 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.
- [5] 苏慧玲, 李扬. 基于电力系统复杂网络特征的线路脆弱性风险分析[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 101-107.
SU Huiling, LI Yang. Line vulnerability risk analysis based on complex network characteristics of power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 101-107.
- [6] 孟仲伟, 鲁宗相, 宋靖雁. 中美电网的小世界拓扑模型比较分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(15): 21-24, 29.
MENG Zhongwei, LU Zongxiang, SONG Jingyan. Comparison analysis of the small-world topological model of Chinese and American power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(15): 21-24, 29.
- [7] 李彬, 张洁, 陈宋宋, 等. 基于复杂网络的电力通信网扩容保护策略[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1974-1980.
LI Bin, ZHANG Jie, CHEN Songsong, et al. Expansion strategy of power communication network survivability based on complex network[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1974-1980.
- [8] 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.
- [9] 李瀛龙. 天然气管网的脆弱性和鲁棒性研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
LI Yinglong. Study on vulnerability and robustness of natural gas pipeline network[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [10] 丁一, 江艺宝, 宋永华, 等. 能源互联网风险评估研究综述(一): 物理层面[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3806-3817.
DING Yi, JIANG Yibao, SONG Yonghua, et al. Review of risk assessment for energy internet, part I: physical level[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3806-3817.
- [11] 张效坤, 孙宏斌. 基于复杂混合网络的能源互联网拓扑模型[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2079-2084.
ZHANG Xiaokun, SUN Hongbin. Energy Internet topology model based on hybrid complex network[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2079-2084.
- [12] 孙秋野, 王冰玉, 黄博南, 等. 狭义能源互联网优化控制框架及实现[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(18): 4571-4580.
SUN Qiuye, WANG Bingyu, HUANG Bonan, et al. The optimization control and implementation for the special energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(18): 4571-4580.
- [13] LIU Y, GU X P. Skeleton-network reconfiguration based on topological characteristics of scale-free networks and discrete particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 1267-1274.
- [14] VARDI Y, ZHANG C H. Measures of network vulnerability[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2007, 14(5): 313-316.
- [15] 陈庆华. 无标度网络[M]. 上海: 上海大学出版社, 2010: 32-33.
- [16] 曹一家, 陈彦如, 曹丽华, 等. 复杂系统理论在电力系统中的应用研究展望[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19): 1-9, 178.
CAO Yijia, CHEN Yanru, CAO Lihua, et al. Prospects of studies on application of complex system theory in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19): 1-9, 178.
- [17] BARABASI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999(286): 509-512.
- [18] 郝然, 艾芊, 朱宇超, 等. 基于能源集线器的区域综合能源系统分层优化调度[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 171-178.
HAO Ran, AI Qian, ZHU Yuchao, et al. Hierarchical optimal dispatch based on energy hub for regional integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 171-178.
- [19] 贾宏杰, 王丹, 徐宪东, 等. 区域综合能源系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 198-207.
JIA Hongjie, WANG Dan, XU Xiandong, et al. Research on some key problems related to integrated energy systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 198-207.
- [20] MOEINI-AGHTAIE M, ABBASPOUR A, FOTUHI-FIRUZABAD M, et al. A decomposed solution to multiple-energy carriers optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2): 707-716.
- [21] 刘剑, 李兴源, 王成, 等. 计及抗毁性的输电线路关键性综合评价[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(12): 121-127.
LIU Jian, LI Xingyuan, WANG Cheng, et al. Comprehensive assessment of criticality for transmission line considering invulnerability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 121-127.
- [22] 杨楠. 基于复杂网络理论的天然气管网复杂性和鲁棒性研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2017.
YANG Nan. Research on the complexity and robustness of natural gas pipeline network based on complex network theory[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2017.
- [23] 彭澎, 程诗奋, 刘希亮, 等. 全球海洋运输网络健壮性评估[J]. 地理学报, 2017, 72(12): 2241-2251.
PENG Peng, CHENG Shifen, LIU Xiliang, et al. The robustness evaluation of global maritime transportation networks[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(12): 2241-2251.
- [24] 朱国威, 王先培, 贺瑞娟, 等. 基于重要度评价矩阵的电网关键节点辨识[J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3347-3353.
ZHU Guowei, WANG Xianpei, HE Ruijuan, et al. Identification of vital node in power grid based on importance evaluation matrix[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3347-3353.
- [25] DONG X S, NYBERG T R, HAMALAINEN P, et al. Vulnerability analysis of smart grid based on complex network theory[C]//2015 5th International Conference on Information Science and Technology(ICIST). Changsha, China: IEEE, 2015: 525-529.

作者简介:



潘 华

潘 华(1976—),男,上海人,副教授,硕士,主要研究方向为电力安全信息化与决策支持(E-mail: stevepan2005@126.com);
肖雨涵(1994—),男,福建三明人,硕士研究生,主要研究方向为综合能源系统安全、风险分析(E-mail: xiaoyuhan_hans@163.com);

梁作放(1992—),男,山东菏泽人,硕士,主要研究方向为综合能源系统优化运行(E-mail: liang-bkv5@163.com)。

Robustness analysis of electricity-gas-heat integrated energy system based on complex network

PAN Hua¹,XIAO Yuhua¹,LIANG Zuofang²,ZHU Zhaoshun¹,HE Hui¹

(1. School of Economics and Management,Shanghai University of Electric Power,Shanghai 200090,China;

2. State Grid Shandong Electric Power Company Heze Power Supply Company,Heze 274000,China)

Abstract: With the continuous expansion of the integrated energy system network scale and the strengthening of the coupling degree, more stringent requirements are put forward for the stability of its structure and the security of its operation. Therefore, the complex network theory is applied to the static structure and robustness analysis of the integrated energy system. NetworkX is used to build the network topology model of the system and its network characteristic parameters are calculated by G.degree, nx.betweenness centrality(G), nx.average_clustering(G) and other algorithms, based on the analysis of the calculative results, the complex network characteristics such as scale-free and small world of the integrated energy system are studied. Three analysis indexes of network fragmentation degree, connectivity factor and energy efficiency ratio are introduced to simulate seven different attack modes on the system. By observing the curves of the above three indexes of the electricity-gas-heat integrated energy system under different faults, the robustness of the system is comprehensively analyzed and the vulnerable links of the system are identified. The research results provide reference and decision support for building a more reliable network system for large-scale integrated energy system.

Key words: complex network; integrated energy system; small world network; scale-free network; robustness

(上接第85页 continued from page 85)

Operation feasible region analysis of advanced adiabatic compressed air energy storage under thermal-electric co-generation mode

BAI Jiayu¹,XUE Xiaodai¹,CHEN Laijun^{1,2},MEI Shengwei^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment,

Department of Electrical Engineering,Tsinghua University,Beijing 100084,China;

2. School of Qidi(TUS) Renewable Energy,Qinghai University,Xining 810036,China)

Abstract: AA-CAES(Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage), one of the large-scale clean energy storage technologies, has the thermal-electric co-generation and co-storage capacity, which can be used as an energy hub to connect to the integrated energy system, so as to improve the operation flexibility of system and promote the consumption of renewable energy. An operation feasible region characterization method is proposed, which can directly reflect the power constraint and energy storage state constraint of AA-CAES, providing a visual tool for understanding the thermoelectric coupling relationship of AA-CAES, analyzing the operation characteristics of thermal-electric co-generation mode, and evaluating the operation flexibility, energy supply ability and adjustable range of the system. On this basis, the shape and characteristics of operation feasible region are studied, the processing method of operation feasible region considering the variation of heating ratio and the influence of wide operating conditions are analyzed, and the application of operation feasible region as an analytical tool in the real-time dispatching is discussed. Taking a regional integrated energy system as an example, the validity and practicability of the proposed operation feasible region analysis method are verified.

Key words: advanced adiabatic compressed air energy storage; thermal-electric co-generation; operation feasible region; integrated energy system; thermoelectric coupling; visualization analysis

附 录

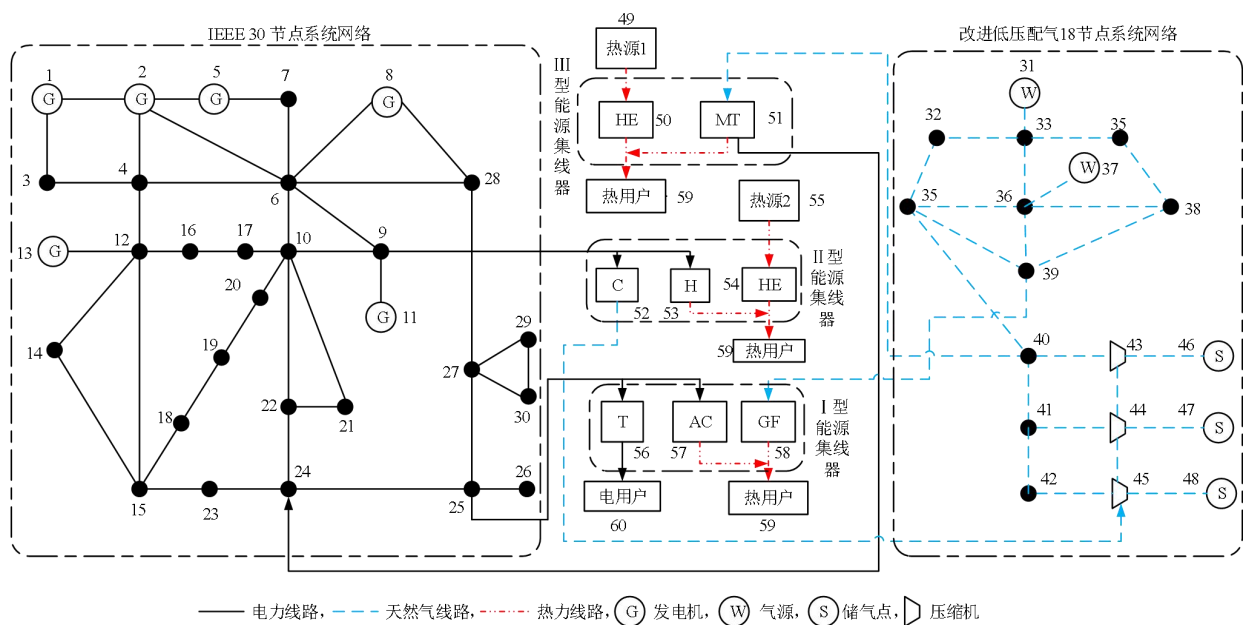


图 A1 基于能源集线器的电-气-热综合能源系统的拓扑结构

Fig.A1 Topology structure of electricity-gas-heat integrated energy system based on energy hub