

## 区域综合能源系统的能效定义及其相关性分析

刘晓鸥<sup>1</sup>, 葛少云<sup>2</sup>

(1. 中国能源建设集团天津电力设计院有限公司, 天津市 300400;

2. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津市 300072)

**摘要:** 首先,考虑多种能源的能级水平,将区域综合能源系统分为能源供应、能源转换、能源传输、能源存储和能源需求5个环节,提出了适用于评价区域综合能源系统能效的能源利用效率表达式。然后,通过对能源利用效率相关因素的理论分析,5个环节中可再生能源渗透率、能源转化设备效率和容量配置结构、冷/热/电负荷需求结构是影响综合能源系统能源利用效率的核心要素。最后,依托中国某地示范园区展开实例分析,算例结果表明能效表达式能够准确反映区域综合能源系统多能互补耦合和梯级利用的特色,并通过分析区域综合能源系统能效展示了合理配置能源转化设备和优化冷/热/电负荷需求结构的重要性的方法,与理论分析结果一致,说明了所提区域综合能源系统能源利用效率表达式的有效性。

**关键词:** 区域综合能源系统; 利用效率; 能级; 综合能流; 一次能源

### 0 引言

人类生存和社会发展的基础和动力是能源,它是关系到国计民生的基本战略。随着中国的迅速崛起,如何解决不可再生能源的日益匮乏以及令人堪忧的环境污染问题是中国目前面临的双重挑战。面对目前中国能源发展的挑战,综合能源系统通过冷/热/电多种能源系统的互补耦合和联合优化实现了可再生能源的充分消纳和不可再生能源的梯级利用<sup>[1-2]</sup>,为中国能源领域的发展提供了优质服务,其规模可分为跨区域级、区域级和用户级<sup>[3]</sup>。其中,区域级综合能源系统是其在地域分布与系统特性的具现形式,例如一个城市或园区,本文所指区域概念仅表示园区。区域综合能源系统关键在于将电能、燃气、生物质能、风/光等间歇式能源以及环境热能等多种类型能源<sup>[4]</sup>在能源“产-转-输-储-用”各个环节深度融合,通过能源互补耦合和联合优化,实现能源的梯级利用和充分消纳可再生能源,以高效清洁的方式满足用户的冷/热/电综合需求。

本文将区域综合能源系统视为能源供应环节、能源转换环节、能源传输环节、能源存储环节和能源需求环节有机统一的整体,系统内各个环节彼此作用且相互影响,保证了综合能源系统整体功能的实现。为了评估区域综合能源系统的整体性能水平,

提出合理的综合能源系统能效计算方法,探讨区域综合能源系统的综合能源利用效率水平与各个环节之间的关联关系,分析各个环节对区域综合能源系统能效的影响因素,是本文的研究重点。

现阶段有关能源利用效率评估均是基于热力学第一定律和第二定律展开研究的。其中,基于热力学第一定律的能效评估<sup>[5-7]</sup>,侧重于能量的“数量”,而忽略了能量的“质量”;基于热力学第二定律的能效评估<sup>[8-9]</sup>,仅对能量合理的利用在理论上给出了指导,评估结果在实际应用中受到技术条件限制较大的影响。除评估方法问题外,国内外对综合能源系统的研究多集中于规划设计和运行优化分析<sup>[10-13]</sup>,对综合能源系统性能评价相关的研究内容相对不充分,且大多是针对独立的能源系统展开的<sup>[14-15]</sup>,较少考虑各个能源系统间的互补耦合作用,不能全面描述综合能源系统和“产-转-输-储-用”各个环节之间的能流关系,而单独考虑某一能源系统或者某一环节的能效都不足以反映综合能源系统的能源利用效率,缺乏对综合能源系统的整体评估,分析缺乏完整性。

区域综合能源系统能效分析的目的在于有的放矢地提高非可再生能源的利用率和充分消纳可再生能源,而评估可再生能源的利用程度并无实际意义。因此,针对区域综合能源系统输入的多种异质能源,引入能源系数将外购电折算到发电侧消耗的一次能源,以充分评估区域综合能源系统对一次能

收稿日期: 2019-05-23; 修回日期: 2019-12-11。

上网日期: XXXX-XX-XX。

源的利用率;利用“能质系数”将不同能级的能源折算到同一能级水平<sup>[16-17]</sup>、对终端用户的冷/热需求进行等效电换算;将系统为满足终端用户纯电需求、热量需求和冷量需求的总量与输入区域综合能源系统的非可再生能源总量的比值,定义为本文的区域综合能源系统的能源利用效率。

基于给出的区域综合能源系统的能源利用效率定义,本文从能源供应环节、能源转换环节、能源传输环节、能源存储环节和能源需求环节提炼出适用于综合能源系统的能源利用效率的计算表达式,探讨综合能源系统的能源利用效率与各个环节的关联关系,并依托中国某地示范园区展开实例分析,说明本文所提区域综合能源系统能效计算表达式的有效性以及合理配置能源转化设备和优化冷/热/电负荷需求结构的重要性的方法。

### 1 区域综合能源系统分析

传统的能源系统对冷/热/电各单一能源系统进

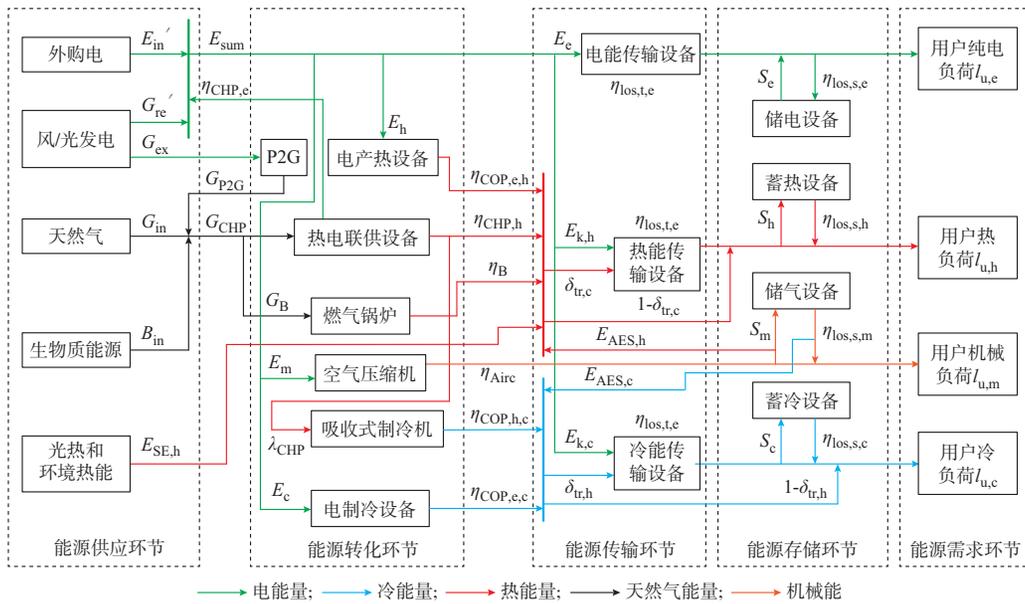


图1 综合能源系统冷-热-电能量流动图  
Fig. 1 Energy flow diagram of integrated energy system on cool-heat-electricity

图1中, $E_{in}'$ 为区域外购电量; $G_{re}'$ 为区域内太阳能和风能发电量; $G_{ex}$ 为区域内弃风弃光发电量; $G_{P2G}$ 为区域内电制气(P2G)设备利用区域内弃风弃光发电量生产燃气燃料量; $G_{in}$ 为区域消耗燃气燃料量; $B_{in}$ 为区域内生物质可再生能源燃料消耗量; $G_{CHP}$ 为热电联产设备消耗燃料量,典型的热电联产设备包括燃料电池、内燃机、燃气轮机、微燃机和汽轮机等; $G_B$ 为燃气锅炉消耗燃料量; $\eta_{CHP,e}$ 和 $\eta_{CHP,h}$ 分别为热电联产设备发电和产热的效率; $\lambda_{CHP}$ 为热电联产设备产热供给吸收式制冷机的比例; $\eta_B$ 为燃气锅炉

行独立的规划和运行,无法实现能源的梯级利用和互补耦合,造成了能源极大的浪费和消耗。冷/热/电多种能源系统在能源供应环节、能源转换环节、能源传输环节、能源存储环节和能源需求环节的耦合互补和协同运行是区域综合能源系统的特色。电力、燃气及可再生能源等多种能源通过区域综合能源系统转化为用户需求的电力和冷/热量,使得实现多种能源的综合利用成为可能,图1详细描绘了区域综合能源系统内部各种能源流产生、转换、传输和存储的全过程,完整实现了多元能源之间的耦合优化和良好互动。考虑到能源转化设备的多样性,图1仅给出了基本的综合能源系统冷-热-电能量流动,考虑各种复杂的综合能源系统的能源转化规律本质是相似的,故各种典型的综合能源系统的能量流均可由基本的综合能源系统冷-热-电能量流动图组合叠加来描述。

产热效率; $\eta_{Airc}$ 为空气压缩机效率; $E_{SE,h}$ 为区域内太阳能产热量,包括太阳能热水器等多种利用方式; $E_{sum}$ 为区域总电力需求; $E_e, E_m, E_h, E_c, E_{k,h}, E_{k,c}$ 分别为纯电负荷、电制机械能负荷、电制热负荷、电制冷负荷及热网和冷网电驱动水泵电负荷; $\eta_{COP,e,h}, \eta_{COP,e,c}, \eta_{COP,h,c}$ 分别为电制热、电制冷和热制冷效率; $\eta_{los,t,e}, \eta_{los,t,h}, \eta_{los,t,c}$ 分别为电能、热能和冷能传输效率; $\delta_{tr,c}$ 和 $\delta_{tr,h}$ 分别为用户侧制冷量占总能源转换环节制冷量的比例和用户侧制热量占总能源转换环节制热量的比例; $S_e, S_h, S_c, S_m$ 分别为储电、蓄热、蓄冷

和压缩空气存储设备总容量;  $\eta_{\text{los},s,e}$ ,  $\eta_{\text{los},s,h}$ ,  $\eta_{\text{los},s,c}$ ,  $\eta_{\text{los},s,m}$  分别为储电、蓄热、蓄冷和压缩空气存储设备效率;  $E_{\text{AES},h}$  和  $E_{\text{AES},c}$  分别为压缩空气储能相变过程的压缩环节产生的热能和膨胀环节产生的冷能;  $l_{u,e}$ ,  $l_{u,h}$ ,  $l_{u,c}$ ,  $l_{u,m}$  分别为用户纯电负荷、热负荷、冷负荷和机械负荷需求。

图1中的P2G设备可以消纳弃风弃光和低谷电量,由于弃风弃光本身的特点,P2G设备消纳弃风弃光<sup>[18]</sup>,能充分发挥风能和太阳能尚有的效用,有助于提升系统的整体能效;P2G设备消纳低谷电量有助于平滑负荷曲线,但就本文研究的系统能效而言,考虑到P2G设备存在能源转换损耗,其消纳低谷电量后再利用过程中的损耗不利于提高系统的整体效率,因此,文中未考虑P2G消纳低谷电量的作用。

储能方式多种多样,压缩空气储能也是其中一种,通过空气压缩机将空气压缩后存储起来,然后再利用压缩空气驱动机械设备做功<sup>[19-20]</sup>。因此,空气压缩机属于将电能转化为机械能的设备,其输入是电能,输出是机械能。针对目前区域级综合能源系统中,燃机发电需要机械能驱动机组透平做功和含有大量机械装卸臂等设备需要机械能驱动的现状,在图1中的能源“供-转-输-储-用”环节中引入了机械负荷需求,能源转换环节增加空气压缩机,储能环节增加压缩空气储能,由于压缩空气储能一般就地利用,所以不考虑其能源传输环节,空气压缩储能相变过程中的压缩环节产生的热能、膨胀环节产生的冷能也采用就地利用的方式,同样不考虑这部分冷/热能的传输损耗。

由于冷/热供给既包括集中供冷/热,也包括用户侧制冷/热,考虑到用户侧制冷/热和集中供冷/热的主要区别在于,前者是就地的源-荷平衡,后者是通过能源传输网络的源-荷平衡<sup>[21-22]</sup>。因此,本文在能源转换环节出口增加了比例系数  $\delta_{\text{tr},c}$  和  $\delta_{\text{tr},h}$ 。其中,  $\delta_{\text{tr},c}$  和  $\delta_{\text{tr},h}$  这部分冷、热量无传输损耗;  $1 - \delta_{\text{tr},c}$  和  $1 - \delta_{\text{tr},h}$  分别表示集中制冷、热量占总能源转换环节制冷、热量的比例,这部分冷、热量通过能源传输网络到达用户侧,存在传输损耗;这样可以将用户侧制冷和制热统一到本文提出的能源供应环节、能源转换环节、能源传输环节、能源存储环节和能源需求环节研究框架中。

如图1所示,区域综合能源系统的组成部分可以分为能源供应环节、能源转化环节、能源传输环节、能源存储环节,最后输出能源需求环节所需的能量。能源供应环节包含来自电网的外购电能、本地接入的可再生能源以及燃气等不可再生能源;能源

转化环节通过各种能源转化设备实现不同能源的互补耦合和互换互动;能源传输环节主要任务是完成对不同能源的稳定传输及合理分配;能源存储环节则包括了电、冷、热和压缩空气蓄能装置,能够完成削峰填谷、平抑能源波动的任务,各个环节多样化的性能使得区域综合能源系统具有较好发展前景。

## 2 区域综合能源系统能效分析

区域综合能源系统能效分析涉及其各个能源系统的“产-输-配-用-储”环节,对区域综合能源系统能效进行分析,及时发现各个环节的缺陷和不足,有助于指导区域综合能源系统的建设和运行。由于目前尚无规范评估区域综合能源系统的能效,且现阶段已有的能效评估成果无法深入综合能源系统的“产-输-配-用-储”各个环节,导致采用不同的方法评估同样的方案得到差异较大的结果。为了解决上述问题,本章依托图1所示的区域综合能源系统,分别分析能源供应、能源转化、能源传输、能源存储和能源需求5个环节的能源利用效率,进而得出区域综合能源系统的能源利用效率。

### 2.1 能源供应环节

能源供应环节的研究对象是区域外购电和区域内能源。由图1可知,区域内能源有多种形式,例如风、光、生物质等可再生能源,燃气等化石能源和电力等二次能源形式。能源不仅有“数量”的概念,即能量的多少,还有“质量”的概念,即品位(能级)的高低或做功能力的大小。能源的高效利用不仅要从数量上考虑,还要从质量上考虑<sup>[17]</sup>。从合理能源供应的角度出发,将不同能源对外所能够做的功和其总能量的比值定义为不同能源的能质系数  $C_e$ ,其表达式为:

$$C_e = \frac{W_{e,avail}}{W_{e,total}} \quad (1)$$

式中:  $W_{e,avail}$  为该种能源中可以转化为功的部分;  $W_{e,total}$  为该种能源的总能量。

电能是最高品位的能源,能够全部转化为功,故其能质系数为1,将各种能源换算为等效电,能够将不同能源的品位联系起来,夏季参考温度为302.2 K,冬季参考温度为271.9 K,并由此可以计算出其他形式的能质系数,如附录A表A1所示。

能源供应环节的能源能质系数仅受能量的种类、形态和温度以及环境温度的影响,详细参数详见文献[16-17]。参照文献[16-17]中对能值系数概念的描述,能值系数是反映能源做功的能力,在标准外部环境下,能源的做功能力是一个固定值,不随转化设备的不同而发生变化。当设备种类及其所带负荷

发生变化时,对应设备的转化效率也会随之发生变化,最终导致在相同能源输入的情况下,能源输出产物不同和系统效率不同现象的发生。所以,系统效率发生变化是因为设备的转化效率导致的,而不是因为能源的能值系数,因为在标准外部环境下,能源的做功能力(即能值系数)是一个定值,发生变化的是设备的转化效率。因此,才需要充分利用综合能源系统互补的优势,在满足用户需求的情况下,选用转化效率高的设备对标准环境下做功能力为固定值的能源进行利用,提高系统的整体效率。

综合能源系统能源供应环节示意图如图2所示。图中 $G_{re}$ 为区域内太阳能和风能最大发电量,包括光伏发电、光热发电和风力发电等多种利用方式; $E_k$ 为电驱动水泵电负荷。

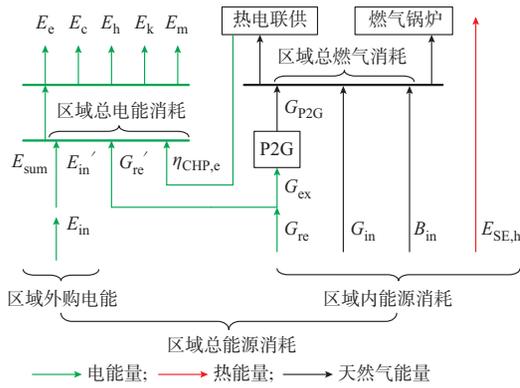


图2 综合能源系统能源供应环节示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of energy supply link for integrated energy system

由图2可知,区域总的电能平衡方程和区域外购电平衡方程,分别如下所示:

$$E_{sum} = E_e + E_m + E_h + E_c + E_k \quad (2)$$

$$E_{in}' = E_{sum} - G_{CHP} \eta_{CHP,e} - G_{re}' \quad (3)$$

区域外购电能可根据其来源划分为燃煤发电、燃气发电及可再生能源发电等。将区域外购电进一步折算为发电侧对应的一次能源,以充分评估区域综合能源系统对一次能源的利用水平。因此,区域外购电折算成一次能源消耗量 $E_{in}$ 的方程如下所示:

$$E_{in} = E_{in}' \sigma_e = E_{in}' \sum_l \frac{\beta_l \gamma_l C_{e,l}}{\eta_l} \quad (4)$$

式中: $\sigma_e$ 为外购电一次能源消耗量折算系数;下标 $l$ 表示外购电能量来源,可能来自于可再生能源、煤炭和燃气发电, $l \in L = \{\text{res, coal, gas}\}$ ;  $\beta_l$ 为外购电中不同一次能源来源的构成比例,  $\sum \beta_l = 1$ ;  $\gamma_l$ 为能源系数,  $\gamma = \{0, 1\}$ ,如果仅关心非可再生能源消耗量,可再生能源系数 $\gamma_{res}$ 取0,其余系数 $\gamma_{gas}$ 和 $\gamma_{coal}$ 取1,若关心一次能源总消耗量,则能源系数均取1;  $\eta_l$ 为外购电能量来源设备的发电效率;  $C_{e,l}$ 为外购电能来源的

能质系数。

区域内能源包括可再生能源发电和燃料(包括燃气、生物质能源和P2G利用弃风弃光发电量生产的燃气),与外购电共同满足后续各个环节的能源需求,区域燃料消耗平衡方程和可再生能源最大发电量方程如下所示:

$$G_{in} = G_{CHP} + G_B - B_{in} - G_{P2G} \quad (5)$$

$$G_{P2G} = G_{ex} \eta_{P2G} \quad (6)$$

$$G_{re} = G_{re}' + G_{ex} \quad (7)$$

式中: $\eta_{P2G}$ 为P2G设备生产燃气的效率。

结合图1和能质系数的概念,可以得到区域内一次能源消耗量 $E_{prim}$ 表达式如下所示:

$$E_{prim} = \frac{\gamma_{sw} C_{e,sw} G_{re}}{\eta_{sw}} + \gamma_G C_{e,G} G_{in} + \gamma_B C_{e,B} B_{in} + \frac{\gamma_{SE} C_{e,SE} E_{SE,h}}{\eta_{SE}} \quad (8)$$

式中: $\gamma_{sw}$ ,  $\gamma_G$ ,  $\gamma_B$ ,  $\gamma_{SE}$ 分别为风/光发电、电能、生物质、太阳能和环境能制热的能源系数;  $C_{e,sw}$ 为风/光发电的能质系数;  $\eta_{sw}$ 为风/光发电设备效率;  $C_{e,B}$ 为生物质的能质系数;  $C_{e,SE}$ 为太阳能和环境能制热的能质系数;  $\eta_{SE}$ 为光热设备效率。当可再生能源的能源系数取0,非可再生能源的能源系数取1时,可以得到区域非可再生能源的消耗量;当可再生能源的能源系数取1,非可再生能源的能源系数取0时,可以得到区域可再生能源的消耗量;当能源系数均取1时,可得区域一次能源的总消耗量。

## 2.2 能源转换环节

能源转换环节的研究对象是冷/热/电多个能源系统的整体性能,其重点集中于多元能源耦合互动。本节结合图3所示的综合能源系统能源转换环节示意图,给出综合能源系统的能源转换环节效率的计算方法。多能联供设备会影响系统整体灵活性,是影响其整体效率的关键因素<sup>[23]</sup>。文中分别考虑了热电联供设备和热电联供+吸收式制冷构成的多能联供设备,并设定了分配系数 $\lambda_{CHP}$ ,其是热电联产设备产热供给吸收式制冷机的比例。

能源转换环节纯电输出 $E_{c,out,e}$ 的表达式为:

$$E_{c,out,e} = E_e + E_{k,c} + E_{k,h} \quad (9)$$

能源转换环节冷能输出 $E_{c,out,c}$ 的表达式为:

$$E_{c,out,c} = C_{e,c} (G_{CHP} \eta_{CHP,h} \lambda_{CHP} \eta_{COP,h,c} + E_c \eta_{COP,e,c} + E_{AES,c}) \quad (10)$$

式中: $C_{e,c}$ 为冷负荷的能质系数。

能源转换环节热能输出 $E_{c,out,h}$ 的表达式为:

$$E_{c,out,h} = C_{e,h} [E_h \eta_{COP,e,h} + G_{CHP} \eta_{CHP,h} (1 - \lambda_{CHP}) + G_B \eta_B + E_{SE,h} + E_{AES,h}] \quad (11)$$

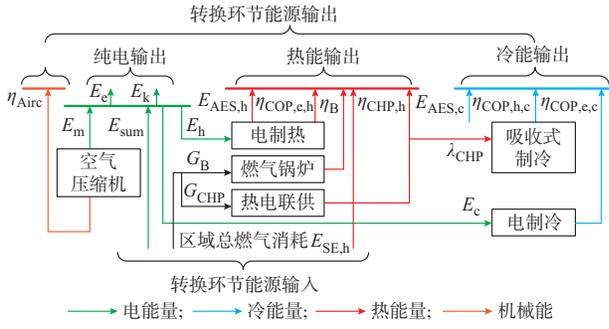


图3 综合能源系统能源转换环节示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of energy conversion link of integrated energy system

式中： $C_{e,h}$ 为热负荷的能质系数。

能源转换环节机械能输出 $E_{c,out,m}$ 的表达式如式(12)所示,结合式(1)可以定义为压缩空气有效能和绝对能的比值,相关参数的计算可以参考文献[24]。

$$E_{c,out,m} = C_{e,air} E_m \eta_{Airc} \quad (12)$$

式中： $C_{e,air}$ 为压缩空气的能质系数。

电制冷设备供冷所占总供冷量比例 $\lambda_c$ 和电制热设备供热所占总供热量比例 $\lambda_h$ 的表达式分别为：

$$\lambda_c = \frac{C_{e,c} E_c \eta_{COP,e,c}}{E_{c,out,c}} \quad (13)$$

$$\lambda_h = \frac{C_{e,h} E_h \eta_{COP,e,h}}{E_{c,out,h}} \quad (14)$$

综合方程式(10)至式(14),可以得到燃料设备供冷和供热量平衡方程,其表达式为：

$$G_{CHP} \eta_{CHP,h} + G_B \eta_B = (1 - \lambda_c) E_{c,out,c} C_{e,c}^{-1} \eta_{COP,h,c}^{-1} + (1 - \lambda_h) E_{c,out,h} C_{e,h}^{-1} - E_{AES,c} - E_{SE,h} - E_{AES,h} \quad (15)$$

综合式(9)至式(11),可以得到能源转换环节的能量输出 $E_{c,out}$ 的表达式为：

$$E_{c,out} = E_{c,out,e} + E_{c,out,c} + E_{c,out,h} + E_{c,out,m} \quad (16)$$

从图1中可以看出能源转换环节的能量输入 $E_{c,in}$ ,即区域外购电折算成一次能源消耗量 $E_{in}$ 与区域内一次能源消耗量 $E_{prim}$ 之和,因此综合能源系统能源转换环节效率 $\eta_{conv}$ 表达式为：

$$\eta_{conv} = \frac{E_{c,out}}{E_{c,in}} = \frac{E_{c,out}}{E_{in} + E_{prim}} \quad (17)$$

### 2.3 能源传输环节

本节结合图4所示的综合能源系统能源传输环节示意图,给出综合能源系统的能源传输环节效率的计算方法。

能源传输环节的研究对象是冷/热/电多个能源系统的传输损耗,电能的传输是借助配电线路和变压器完成的,电能在线路传输和变压器升降压的过程中总会存在能量的损耗。取电能的平均传输效率

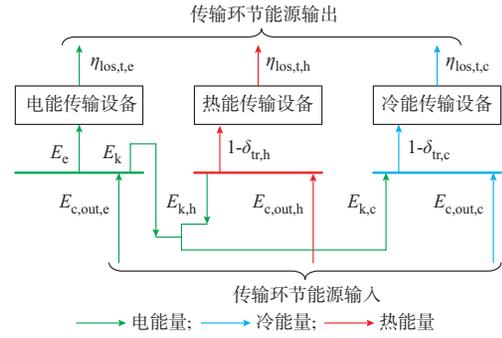


图4 综合能源系统能源传输环节示意图  
Fig. 4 Schematic diagram of energy transmission link for integrated energy system

对电能的传输环节进行简化,即 $\eta_{los,t,e}$ 表示电能的平均传输效率,因此电能传输设备输出 $E_{tr,out,e}$ 的表达式为：

$$E_{tr,out,e} = E_e \eta_{los,t,e} = (E_{c,out,e} - E_k) \eta_{los,t,e} \quad (18)$$

由于冷能传输系统和热能传输系统类似,下面以热能传输系统为例,分析热能和冷能传输设备输出。将热能传输系统分为水力传输系统和热力传输系统两部分。在热能的传输过程中,热水管道起到了载体的作用,由于管道的阻力作用,需要安装水泵增加水压以满足维持正常水循环的节点压力要求<sup>[25]</sup>。因此,水力传输系统的损耗主要由水泵来补偿,水泵消耗的总电能 $E_k$ 的表达式为：

$$E_k = E_{k,c} + E_{k,h} \quad (19)$$

热能在热水管道传输的过程中会存在热损耗, $\eta_{los,t,h}$ 表示热能的传输效率,若热能传输中存在换热器,则还需要考虑换热器的火用损耗 $E_{D,k,h}$ <sup>[26]</sup>。因此热能传输设备输出 $E_{tr,out,h}$ 的表达式为：

$$E_{tr,out,h} = E_{c,out,h} \eta_{los,t,h} (1 - \delta_{tr,h}) - E_{D,k,h} \quad (20)$$

同理, $\eta_{los,t,c}$ 表示冷能的传输效率,若冷能传输中存在换热器,则还需要考虑换热器的火用损耗 $E_{D,k,c}$ <sup>[26]</sup>。因此冷能传输设备输出 $E_{tr,out,c}$ 的表达式为：

$$E_{tr,out,c} = E_{c,out,c} \eta_{los,t,c} (1 - \delta_{tr,c}) - E_{D,k,c} \quad (21)$$

综合式(18)至式(21),可以得到能源传输环节效率 $\eta_{tran}$ 的表达式为：

$$\eta_{tran} = \frac{E_{tr,out,e} + E_{tr,out,h} + E_{tr,out,c}}{E_{c,out,e} + E_{c,out,h} + E_{c,out,c}} \quad (22)$$

### 2.4 能源存储环节

本节结合图5所示的综合能源系统能源存储和需求环节示意图,给出综合能源系统的能源存储环节效率的计算方法。

区域综合能源系统的储能环节集成冷/热/电多种储能技术,多样化的性能不仅能削峰填谷和平抑功率波动,而且能为多种能源的互补耦合提供更加

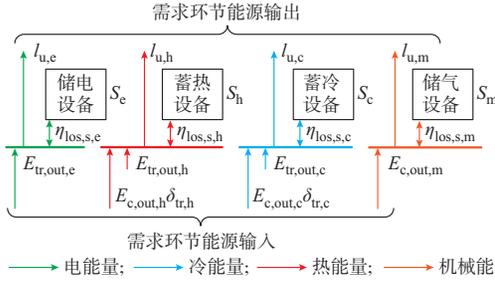


图5 综合能源系统能源存储和需求环节示意图  
Fig. 5 Schematic diagram of energy storage and demand links of integrated energy system

灵活的方式,以实现可再生能源产能的充分消纳和系统运行成本的降低,其重要性日益增强且具有广阔的发展前景。压缩空气储能效率的计算可以参照文献[27]。能源存储环节效率  $\eta_{stor}$  的表达式为:

$$\eta_{stor} = (S_e \eta_{los,s,e} + C_{e,h} S_h \eta_{los,s,h} + C_{e,c} S_c \eta_{los,s,c} + C_{e,air} S_m \eta_{los,s,m}) (S_e + C_{e,h} S_h + C_{e,c} S_c + C_{e,air} S_m)^{-1} \quad (23)$$

## 2.5 能源需求环节

综合考虑图3至图5中能源转换环节输出、能源传输和存储环节损耗等因素,用户纯电需求  $l_{u,e}$ 、热量需求  $l_{u,h}$ 、冷量需求  $l_{u,c}$  和机械能需求  $l_{u,m}$  可分别用式(24)至式(27)表示。

$$l_{u,e} = \frac{1}{\eta_{los,t,e}} [E_{c,out,e} - E_k - E_{tr,out,e} (1 - \eta_{los,t,e})] - S_e (1 - \eta_{los,s,e}) \quad (24)$$

$$l_{u,h} = \frac{1}{\eta_{los,t,h}} [E_{c,out,h} - E_{tr,out,h} (1 - \eta_{los,t,h})] - C_{e,h} S_h (1 - \eta_{los,s,h}) \quad (25)$$

$$l_{u,c} = \frac{1}{\eta_{los,t,c}} [E_{c,out,c} - E_{tr,out,c} (1 - \eta_{los,t,c})] - C_{e,c} S_c (1 - \eta_{los,s,c}) \quad (26)$$

$$l_{u,m} = E_{c,out,m} - C_{e,air} S_m (1 - \eta_{los,s,m}) \quad (27)$$

## 2.6 综合能源利用效率定义

结合区域综合能源系统的综合能源利用方式<sup>[28-30]</sup>,综合能源利用效率  $\eta_{RIES}$  的定义是用户纯电需求、热量需求、冷量需求和机械能需求的总量与非可再生能源输入量的比值,其计算公式为:

$$\eta_{RIES} = \frac{l_{u,e} + l_{u,h} + l_{u,c} + l_{u,m}}{G_{in} C_{e,G} + E_{in}} \quad (28)$$

根据综合能源系统的能源供应环节、转换环节、传输环节、存储环节和需求环节方程对式(28)进行变形,则综合能效  $\eta_{RIES}$  的表达式为:

$$\eta_{RIES} = \frac{1 + \lambda_{c/e} + \lambda_{h/e}}{Q_E} - T - S \quad (29)$$

$$Q_E = G_E (1 + \lambda_{B/CHP}) C_{e,G} + (\lambda_h \lambda_{h/e} \eta_{COP,e,h}^{-1} + \lambda_c \lambda_{c/e} \eta_{COP,e,c}^{-1} + 1 - G_E \eta_{CHP,e}) \sigma_e - E_{SE0} \quad (30)$$

$$G_E = [(1 - \lambda_c) \lambda_{c/e} (C_{e,c} \eta_{COP,h,c})^{-1} + (1 - \lambda_h) \lambda_{h/e} \cdot C_{e,h}^{-1} - E_{SE0} - E_{AES}] (\lambda_{B/CHP} \eta_B + \eta_{CHP,h})^{-1} \quad (31)$$

式中:  $Q_E$  为区域综合能源系统消耗的非可再生能源总量与能源传输环节纯电输入的比值,并利用下述的相关参数对  $Q_E$  方程进行变形;  $G_E$  为热电联产设备消耗的燃料量与能源传输环节纯电输入的比值,并利用式(15)对  $G_E$  方程进行变形;  $T$  为冷/热/电传输系统的能量损失与能源传输环节纯电输入的比值;  $S$  为冷/热/电蓄能设备充放过程中的能量损失与能源传输环节纯电输入的比值;  $\lambda_{B/CHP}$  为系统中锅炉与热电联产设备消耗燃料量的比值;  $\lambda_{c/e}$  为能源转换环节冷能输出与能源传输环节纯电输入的比值;  $\lambda_{h/e}$  为能源转换环节热能输出与能源传输环节纯电输入的比值;  $E_{SE0}$  为区域可再生能源产热量折合成一次能源后与能源传输环节纯电输入的比值。

1) 定义综合能源系统传输和存储参数 ( $T, S$ ), 描述综合能源利用效率  $\eta_{RIES}$  与能源传输和存储环节的关系。  $T$  和  $S$  的表达式分别为:

$$T = [E_k + E_{tr,out,e} (1 - \eta_{los,t,e}) \eta_{los,t,e}^{-1} + E_{tr,out,h} \cdot (1 - \eta_{los,t,h}) \eta_{los,t,h}^{-1} + E_{tr,out,c} (1 - \eta_{los,t,c}) \eta_{los,t,c}^{-1}] \cdot (Q_E E_e)^{-1} \quad (32)$$

$$S = [S_e (1 - \eta_{los,s,e}) + C_{e,h} S_h (1 - \eta_{los,s,h}) + C_{e,c} S_c (1 - \eta_{los,s,c})] (Q_E E_e)^{-1} \quad (33)$$

2) 定义可再生能源参数 ( $G_0', E_{SE0}, G_{ex}, B_{in}$ ), 描述综合能源利用效率  $\eta_{RIES}$  与能源供应环节的关系。其中,  $G_0'$  为区域可再生能源发电量折合成一次能源后与能源传输环节纯电输入的比值, 方程如下所示:

$$G_0' = \frac{\sigma_e G_{re}'}{E_e} \quad (34)$$

$$E_{SE0} = \frac{E_{SE,h}}{E_e} \quad (35)$$

3) 定义能源转化设备效率参数 ( $\eta_{CHP,e}, \eta_{CHP,c}, \eta_B, \eta_{Airc}, \eta_{COP,e,h}, \eta_{COP,e,c}, \eta_{COP,h,c}$ ) 和能源转换设备结构参数 ( $\lambda_{B/CHP}, \lambda_c, \lambda_h$ ), 描述综合能源利用效率  $\eta_{RIES}$  与能源转换环节的关系。其中,  $\lambda_{B/CHP}$  的表达式为:

$$\lambda_{B/CHP} = \frac{G_B}{G_{CHP}} \quad (36)$$

4) 定义冷/热/电负荷结构参数 ( $\lambda_{c/e}, \lambda_{h/e}$ ), 描述综合能源利用效率  $\eta_{RIES}$  与能源需求环节的关系。其中,  $\lambda_{c/e}$  和  $\lambda_{h/e}$  的表达式分别为:

$$\lambda_{c/e} = \frac{E_{c,out,c}}{E_e} \quad (37)$$

$$\lambda_{h/e} = \frac{E_{c, out, h}}{E_e} \quad (38)$$

### 3 影响综合能源系统能效的相关因素分析

#### 3.1 能源传输和存储环节

从式(29)可以看出,综合能源利用效率与能源传输环节和能源存储环节之间具有明确的关联关系,即传输环节和存储环节效率越高,综合能源利用率越高,因此,为了便于后续分析综合能源利用效率与能源供应环节、能源转换环节和能源需求环节之间的关系,在下面的影响综合能源利用效率的相关因素分析中,假设综合能源系统传输和存储参数( $T, S$ )均是零。

$E_{AES}$ 表示区域压缩空气储能相变产热/制冷量与能源传输环节纯电输入的比值,其表达式为:

$$E_{AES} = \frac{E_{AES, h} + E_{AES, c}}{E_e} \quad (39)$$

根据式(29)综合能源利用效率定义,对 $E_{AES}$ 求偏导,可以得到:

$$\frac{\partial \eta_{RIES}}{\partial E_{AES}} = (1 + \lambda_{c/e} + \lambda_{h/e}) [(1 + \lambda_{B/CHP}) \cdot$$

$$C_{e, G} - \sigma_e \eta_{CHP, e}] [Q_E^2 (\lambda_{B/CHP} \eta_B + \eta_{CHP, h})]^{-1}$$

因为 $\partial \eta_{RIES} / \partial E_{AES}$ 恒大于0,所以综合能源利用效率与区域压缩空气储能相变产热/制冷量正相关,即区域压缩空气储能相变产热/制冷量越高,综合能源利用效率也越高。

#### 3.2 能源供应环节

本节分析能源供应环节对综合能源利用效率的影响。

$$\frac{\partial \eta_{RIES}}{\partial G_0'} = \frac{1 + \lambda_{c/e} + \lambda_{h/e}}{Q_E^2} \quad (41)$$

$$\frac{\partial \eta_{RIES}}{\partial E_{SE0}} = (1 + \lambda_{c/e} + \lambda_{h/e}) [(1 + \lambda_{B/CHP}) C_{e, G} -$$

$$\sigma_e \eta_{CHP, e}] [Q_E^2 (\lambda_{B/CHP} \eta_B + \eta_{CHP, h})]^{-1}$$

$$\frac{\partial \eta_{RIES}}{\partial B_{in}} = (1 + \lambda_{c/e} + \lambda_{h/e}) G_{CHP}^{-1} G_E [1 + (1 + \lambda_{B/CHP}) \cdot$$

$$\eta_B C_{e, G} (\lambda_{B/CHP} \eta_B + \eta_{CHP, h})^{-1}] Q_E^{-2} \quad (43)$$

$$\frac{\partial \eta_{RIES}}{\partial G_{ex}} = (1 + \lambda_{c/e} + \lambda_{h/e}) \eta_{P2G} G_{CHP}^{-1} G_E [1 + \eta_B C_{e, G} \cdot$$

$$(1 + \lambda_{B/CHP}) (\lambda_{B/CHP} \eta_B + \eta_{CHP, h})^{-1}] Q_E^{-2} \quad (44)$$

根据式(29)综合能源利用效率定义,分别对可再生能源参数( $G_0', E_{SE0}, G_{ex}, B_{in}$ )求偏导,综合方程式(5)和式(6)有 $G_{in} = G_{CHP} + G_B - B_{in} - G_{ex} \eta_{P2G}$ ,将其代入 $1 + \lambda_{B/CHP}$ 中,可以得到上述方程式。

因为 $\partial \eta_{RIES} / \partial G_0', \partial \eta_{RIES} / \partial E_{SE0}, \partial \eta_{RIES} / \partial G_{ex}, \partial \eta_{RIES} / \partial B_{in}$ 恒大于0,所以综合能源利用效率与可再生能源渗透率正相关,即可再生能源渗透率越高,综合能源利用效率也越高。

#### 3.3 能源转换环节

##### 3.3.1 设备效率参数

本节分析设备效率参数对综合能源利用效率的影响。根据式(29)综合能源利用效率定义,分别对能源转换技术效率参数( $\eta_{CHP, e}, \eta_{CHP, c}, \eta_B, \eta_{Air}, \eta_{COP, e, h}, \eta_{COP, e, c}, \eta_{COP, h, c}$ )求偏导,可以得到 $\partial \eta_{RIES} / \partial \eta_{CHP, e}, \partial \eta_{RIES} / \partial \eta_{CHP, c}, \partial \eta_{RIES} / \partial \eta_B, \partial \eta_{RIES} / \partial \eta_{Air}, \partial \eta_{RIES} / \partial \eta_{COP, e, h}, \partial \eta_{RIES} / \partial \eta_{COP, e, c}, \partial \eta_{RIES} / \partial \eta_{COP, h, c}$ 均大于0,则综合能源利用效率与设备效率正相关,即设备效率越高,综合能源利用效率也越高。

##### 3.3.2 能源转换设备结构参数

利用式(29)分别对能源转换设备结构参数( $\lambda_{B/CHP}, \lambda_c, \lambda_h$ )求偏导,可以得到如下方程式:

$$\frac{\partial \eta_{RIES}}{\partial \lambda_{B/CHP}} = G_E (C_{e, G} \eta_{CHP, h} - C_{e, G} \eta_B + \sigma_e \eta_B \eta_{CHP, e}) \cdot$$

$$(1 + \lambda_{c/e} + \lambda_{h/e}) [(\lambda_{B/CHP} \eta_B + \eta_{CHP, h}) Q_E^2]^{-1} \quad (45)$$

当燃气锅炉热效率 $\eta_B < \eta_{CHP, h} C_{e, G} / (\sigma_e \eta_{CHP, e} - C_{e, G})$ 时,有 $\partial \eta_{RIES} / \partial \lambda_{B/CHP} > 0$ ,则 $\eta_{RIES}$ 随着 $\lambda_{B/CHP}$ 的增加而降低,即为提高综合能源利用效率,应增加热电厂设备的配置容量。

$$\frac{\partial \eta_{RIES}}{\partial \lambda_c} = -\lambda_{c/e} \{ \lambda_{B/CHP} (\sigma_e \eta_B \eta_{COP, h, c} - C_{e, G} \eta_{COP, e, c}) \cdot$$

$$[C_{e, G} \eta_{COP, e, c} - (\eta_{CHP, h} + \eta_{CHP, e}) \eta_{COP, h, c} \sigma_e] \cdot$$

$$(1 + \lambda_{c/e} + \lambda_{h/e}) [(\eta_{CHP, h} + \lambda_{B/CHP} \eta_B) \cdot$$

$$\eta_{COP, e, c} \eta_{COP, h, c} Q_E^2]^{-1} \quad (46)$$

当 $\partial \eta_{RIES} / \partial \lambda_c > 0$ 时, $\eta_{RIES}$ 随着 $\lambda_c$ 的增大而提高,即为提高综合能源利用效率,应增加电制冷设备的配置容量;当 $\partial \eta_{RIES} / \partial \lambda_c < 0$ 时, $\eta_{RIES}$ 随着 $\lambda_c$ 的增大而降低,即为提高综合能源利用效率,应增加吸收式制冷设备的配置容量。

$$\frac{\partial \eta_{RIES}}{\partial \lambda_h} = \lambda_{h/e} [ \lambda_{B/CHP} (C_{e, G} \eta_{COP, e, h} - \sigma_e \eta_B) + \eta_{COP, e, h} \cdot$$

$$C_{e, G} - \sigma_e (\eta_{CHP, e} \eta_{COP, e, h} + \eta_{CHP, h}) ] (1 +$$

$$\lambda_{c/e} + \lambda_{h/e}) [(\lambda_{B/CHP} \eta_B + \eta_{CHP, h}) \eta_{COP, e, h} Q_E^2]^{-1} \quad (47)$$

当 $\partial \eta_{RIES} / \partial \lambda_h > 0$ 时, $\eta_{RIES}$ 随着 $\lambda_h$ 的增大而提高,即为提高综合能源利用效率,应增加电制热设备的配置容量;当 $\partial \eta_{RIES} / \partial \lambda_h < 0$ 时, $\eta_{RIES}$ 随着 $\lambda_h$ 的增大而降低,即为提高综合能源利用效率,应增加燃气制热

设备的配置容量,燃气锅炉与热电联产设备的比例参照 $\partial\eta_{RIES}/\partial\lambda_{B/CHP}$ 进行配比。

### 3.4 能源需求环节

利用式(29)分别对“冷/热/电”负荷结构参数( $\lambda_{c/e}, \lambda_{h/e}$ )求偏导,可以得到如下方程式:

$$\frac{\partial\eta_{RIES}}{\partial\lambda_{c/e}} = [Q_E - C_E(1 + \lambda_{c/e} + \lambda_{h/e})] Q_E^{-2} \quad (48)$$

$$C_E = [(1 - \lambda_c)(1 + \lambda_{B/CHP})C_{e,G} - \sigma_e\eta_{CHP,e}] C_{e,c}^{-1} \cdot [\eta_{COP,h,c}(\lambda_{B/CHP}\eta_B + \eta_{CHP,h})]^{-1} + \lambda_c\sigma_e\eta_{COP,e,c}^{-1} \quad (49)$$

由式(29)可知,  $\eta_{RIES} < 1$ , 则  $Q_E > 1 + \lambda_{c/e} + \lambda_{h/e}$ 。同时, 对式(49)变形可知,  $C_E = (M_{htc}C_{e,G} + M_{etc}\sigma_e)/O_c \approx 1(M_{htc}$ 为热制冷燃料消耗量,  $M_{etc}$ 为电制冷电能消耗量,  $O_c$ 为能源转换环节冷能输出), 则可知  $Q_E > C_E(1 + \lambda_{c/e} + \lambda_{h/e})$ 。因此, 恒有  $\partial\eta_{RIES}/\partial\lambda_{c/e} > 0$ , 即  $\eta_{RIES}$  随着  $\lambda_{c/e}$  的增大而提高。

$$\frac{\partial\eta_{RIES}}{\partial\lambda_{h/e}} = [Q_E - H_E(1 + \lambda_{c/e} + \lambda_{h/e})] Q_E^{-2} \quad (50)$$

$$H_E = [(1 - \lambda_h)(1 + \lambda_{B/CHP})C_{e,G} - \sigma_e\eta_{CHP,e}] C_{e,h}^{-1} \cdot (\lambda_{B/CHP}\eta_B + \eta_{CHP,h})^{-1} + \lambda_h\sigma_e\eta_{COP,e,h}^{-1} \quad (51)$$

同理, 对式(51)变形可知,  $H_E = (M_{gh}C_{e,G} + M_{eth}\sigma_e)/O_h \approx 1(M_{gh}$ 为燃气制热燃料消耗量,  $M_{eth}$ 为电制热电能消耗量,  $O_h$ 能源转换环节热能输出), 则可知  $Q_E > H_E(1 + \lambda_{c/e} + \lambda_{h/e})$ 。因此, 恒有  $\partial\eta_{RIES}/\partial\lambda_{h/e} > 0$ , 即  $\eta_{RIES}$  随着  $\lambda_{h/e}$  的增大而提高。

## 4 算例分析

以中国某地示范园区实际数据为例进行分析。该园区依照时间顺序, 逐步开展 I 期、II 期和 III 期建设, 每期建设区域均由工业区和住宅区 2 类负荷构成, 各区域均有相同的“冷/热/电”负荷需求。

I 期建设时间较早, 采用传统供能方式满足区域内的多元负荷需求, 即园区所需电能均来自于外购电、供冷和供热需求分别依靠燃气锅炉和电制冷机来满足; II 期和 III 期采用多种能源互补耦合的供能方式, 通过热电联供设备和吸收式制冷机实现能量的梯级利用, 同时区域内还建设了电制热、分布式光伏等可再生能源发电以及冷/热/电蓄能装置, 满足区域内的多元负荷需求, 且第 III 期区域建设更注重能源转化设备结构的优化, 其能量流动如图 1 所示。整个园区 3 期建设区域各供能设备安装容量如表 1 所示。

园区夏季和冬季典型工作日和节假日冷/热/电负荷数据和分布式光伏输出功率数据如图 6 所示。

园区内有较多的恒温车间, 因此节假日期间的

表 1 区域能源设备参数信息

设备名称	建设区域设备装机容量/MW			设备转换效率
	I 期	II 期	III 期	
热电联产机组	0	4.0	6.0	发电:0.35 制热:0.40
燃气锅炉	12.5	5.5	2.8	0.905
电制热	0	5.7	7.8	4.000
电制冷	21.5	16.5	14.0	4.500
吸收式制冷	0	4.0	6.0	1.280
分布式光伏	0	9.0	12.0	

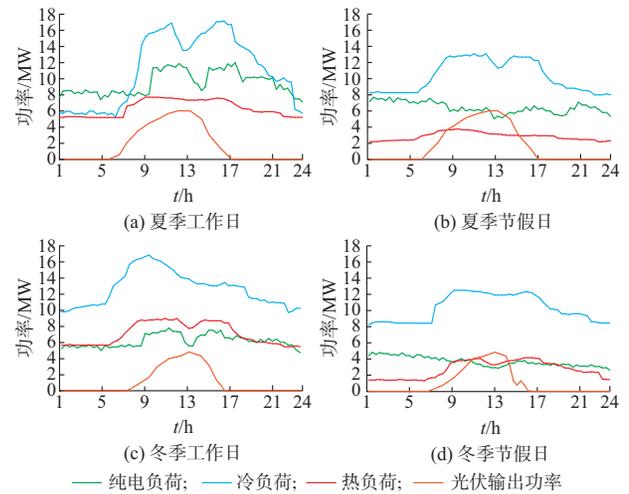


图 6 冷/热/电负荷及光伏发电功率曲线  
Fig. 6 Curves of generation power for cool/heat/electrical load and photovoltaic

冷负荷不会大幅降低; 园区内热负荷主要包括生活热负荷和烘干工艺热负荷, 因此节假日期间的热负荷降幅较大; 园区节假日电负荷主要包括 24 h 生产负荷和生活用电负荷, 因此节假日电负荷较工作日电负荷平缓。

### 4.1 园区能效计算结果

利用本文提出的综合能源系统的综合能源利用效率方程, 比较 I 期、II 期和 III 期建设区域的能效差异。假设热电联供系统的配置容量等于其运行功率, 以一天为评估周期, 不同建设区域的综合能源利用效率如表 2 所示。

表 2 不同建设区域的综合能源利用效率对比  
Table 2 Comparison of utilization efficiency for comprehensive energy in different construction areas

名称	夏季典型日综合能源利用效率		冬季典型日综合能源利用效率	
	工作日	节假日	工作日	节假日
I 期	0.549	0.521	0.592	0.546
II 期	0.652	0.601	0.679	0.645
III 期	0.725	0.668	0.755	0.718

由表2可知,采用多种能源互补耦合供能方式的Ⅱ期和Ⅲ期建设区域能效高于采用传统供能方式的Ⅰ期建设区域能效,该结果表明综合供能方式对能源的利用效率更高,体现了其在能量梯级利用方面的优势,与实际情况一致,说明了本文提出的综合能源系统的综合能源利用效率计算方法的有效性。下面将分别从能源供应环节、能源转换环节和能源需求环节对能效的结果进行分析。

#### 4.2 能源供应环节

在能源供应环节,主要分析可再生能源渗透率因素对园区能效结果的影响。

由表2可知,加装分布式光伏发电的Ⅱ期和Ⅲ期建设区域能效高于无分布式光伏发电的Ⅰ期建

设区域能效;由表1和图2可以计算得到,Ⅱ建设区域可再生能源资源渗透率达到19%,Ⅲ建设区域可再生能源渗透率达到25.3%,说明随着分布式光伏等可再生能源渗透率的增加,Ⅲ期建设区域能效要高于Ⅱ期建设区域能效,即可再生能源渗透率的增加有利于提高综合能源系统的综合能源利用效率。

#### 4.3 能源转换环节

在能源转换环节,包括设备效率和能源转换设备结构因素,其中设备效率与园区能效之间的关系明确,因此本节主要分析能源转换设备结构因素对园区能效结果的影响,

根据表1可以计算得到Ⅰ期、Ⅱ期和Ⅲ期的 $\lambda_{B/CHP}$ , $\lambda_{c/e}$ , $\lambda_{h/e}$ 分别如表3所示。

表3 不同建设区域的能源转化设备结构参数

Table 3 Structural parameters of energy conversion equipment in different construction areas

名称	$\lambda_{B/CHP}$	夏季 $\lambda_{c/e}$		夏季 $\lambda_{h/e}$		冬季 $\lambda_{c/e}$		冬季 $\lambda_{h/e}$	
		工作日	节假日	工作日	节假日	工作日	节假日	工作日	节假日
Ⅰ期									
Ⅱ期	0.60	1.61	1.18	0.67	0.45	2.8	2.05	1.14	0.74
Ⅲ期	0.21								

根据表3计算得到, $\partial\eta_{RIES}/\partial\lambda_h > 0$ 且 $\partial\eta_{RIES}/\partial\lambda_c < 0$ 。由3.3节的相关结论可知: $\eta_{RIES}$ 随着 $\lambda_h$ 的增大而提高,即为了提高综合能源利用效率应多配置电制热设备; $\eta_{RIES}$ 随着 $\lambda_c$ 的增大而降低,即为了提高综合能源利用效率应多配置吸收式制冷设备。由表1和表2可知:Ⅰ期、Ⅱ期和Ⅲ期3个建设区域的能源利用效率随着电制热设备配置容量的增加而提高;同样随着吸收式制冷设备配置容量的增加而提高,理论分析结果与实际情况一致。

通过式(45)计算可知, $\eta_{CHP,i}C_{e,G} - \eta_B C_{e,G} + \sigma_e \eta_B \eta_{CHP,e} = 0.545 > 0$ 。由3.3节的相关结论可知, $\eta_{RIES}$ 随着 $\lambda_{B/CHP}$ 的增加而降低,为提高综合能源利用效率应尽量多配置热电联产设备。由表3可知,Ⅱ期的 $\lambda_{B/CHP}$ 大于Ⅲ期的 $\lambda_{B/CHP}$ ,与表1中Ⅲ期比Ⅱ期配置了更多的热电联产设备实际情况一致。且随着热电联产设备配置容量的增加,由表2可知,与Ⅱ期建设区域的能源利用效率相比,Ⅲ期建设区域的能源利用效率也随之提高,说明该园区建设区域增加了热电联产设备的容量,减少了燃气锅炉配置容量的合理性。

#### 4.4 能源需求环节

在能源需求环节,主要分析“冷/热/电”负荷结构因素对园区能效结果的影响。

结合表3,有夏季和冬季工作日的 $\lambda_{c/e}$ 和 $\lambda_{h/e}$ 参数均分别大于对应季节节假日的 $\lambda_{c/e}$ 和 $\lambda_{h/e}$ 参数,通过

3.3节的理论分析可知:随着冷电需求比和热电需求比的增加,综合能源系统的综合能源利用效率也随之提高;与表2中Ⅰ期、Ⅱ期和Ⅲ期建设区域的夏季和冬季工作日能源利用效率均分别大于其夏季和冬季节假日能源利用效率的实际情况一致。

## 5 结语

1)通过多种能源系统的耦合,分析了区域综合能源系统的冷-热-电能量供应、转换、传输、存储和需求环节,并详细描述了上述5个环节的能源利用效率;强调了能源的高效利用不仅要从“数量”上考虑,还要从“质量”上考虑;提出了考虑“能质系数”的区域综合能源利用效率计算表达式,该表达式既可以计算区域综合能源系统某一时间点上的能效,又可以计算区域综合能源系统某一段时间范围内的能效。

2)区域综合能源系统的能源利用效率由区域现状决定,其中能源供应环节、能源转换环节、能源传输环节、能源存储环节及能源需求环节均影响综合能源系统的能源利用效率。特别是,能源供应环节、能源输储环节和能源需求环节与综合能源系统的能源利用效率关系明确,可再生能源渗透率越高、冷电需求比和热电需求比越大、输储环节效率越高,综合能源系统的能源利用效率越高。

3)通过对影响区域综合能源系统的能源利用效

率的相关因素分析,可以有针对性地改善区域综合能源系统的能源供应环节、能源转换环节、能源输储环节及能源需求环节的能效,从而提高区域综合能源系统的整体能效,并可以指导综合能源系统中能源转化设备的优化配置。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

## 参 考 文 献

- [1] 吴建中. 欧洲综合能源系统发展的驱动与现状[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 1-7.  
WU Jianzhong. Drivers and state-of-the-art of integrated energy systems in Europe[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 1-7.
- [2] 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.
- [3] 刘涤尘, 彭思成, 廖清芬, 等. 面向能源互联网的未來综合配电系统形态展望[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3023-3034.  
LIU Dichen, PENG Sicheng, LIAO Qingfen, et al. Outlook of future integrated distribution system morphology orienting to energy internet[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3023-3034.
- [4] 李洋, 吴鸣, 周海明, 等. 基于全能流模型的区域多能源系统若干问题探讨[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2230-2237.  
LI Yang, WU Ming, ZHOU Haiming, et al. Study on some key problems related to regional multienergy system based on universal flow model[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2230-2237.
- [5] LI H, FU L, GENG K, et al. Energy utilization evaluation of CCHP systems[J]. Energy & Buildings, 2006, 38(3): 253-257.
- [6] SANTO D B E. Energy and exergy efficiency of a building internal combustion engine trigeneration system under two different operational strategies[J]. Energy & Buildings, 2012, 53: 28-38.
- [7] SUN Z G, WANG R Z, SUN W Z. Energetic efficiency of a gas-engine-driven cooling and heating system[J]. Applied Thermal Engineering, 2004, 24(5): 941-947.
- [8] HUANGFU Y, WU J Y, WANG R Z, et al. Evaluation and analysis of novel micro-scale combined cooling, heating and power (MCCHP) system[J]. Energy Conversion & Management, 2007, 48(5): 1703-1709.
- [9] EBRAHIMI M, KESHAVARZ A, JAMALI A. Energy and exergy analyses of a micro-steam CCHP cycle for a residential building[J]. Energy & Buildings, 2012, 45(1): 202-210.
- [10] 张心洁, 葛少云, 刘洪, 等. 智能配电网综合评估体系与方法[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 40-46.  
ZHANG Xinjie, GE Shaoyun, LIU Hong, et al. Comprehensive assessment system and method of smart distribution grid[J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 40-46.
- [11] 陈璨, 吴文传, 张伯明, 等. 基于多场景技术的有源配电网可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34): 67-73.  
CHEN Can, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. An active distribution system reliability evaluation method based on multiple scenarios technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(34): 67-73.
- [12] 江柳铨. 基于多能源互补的分布式冷热联供系统的数学建模及优化运行研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.  
JIANG Xushuo. Optimized operation research and mathematical model of distributed cooling and heating combined supply system based on multi-energy complementary[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [13] 张涛, 朱彤, 高乃平, 等. 分布式冷热电能源系统优化设计及多指标综合评价方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3706-3713.  
ZHANG Tao, ZHU Tong, GAO Naiping, et al. Optimization design and multi-criteria comprehensive evaluation method of combined cooling heating and power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3706-3713.
- [14] KRAUSE T, ANDERSSON G, FROHLICH K, et al. Multiple-energy carriers: modeling of production, delivery, and consumption[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 15-27.
- [15] 李虎祥. 基于能质系数的热电联产系统能量分析及优化改造研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.  
LI Huxiang. The CHP system energy analysis and optimized reconstruction research based on energy quality character[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [16] 江亿, 刘晓华, 薛志峰, 等. 能源转换系统评价指标的研究[J]. 中国能源, 2004, 26(3): 27-31.  
JIANG Yi, LIU Xiaohua, XUE Zhifeng, et al. Research on evaluation index of energy conversion system[J]. Energy of China, 2004, 26(3): 27-31.
- [17] 江亿, 刘兰斌, 杨秀. 能源统计中不同类型能源核算方法的探讨[J]. 中国能源, 2006, 28(6): 5-8.  
JIANG Yi, LIU Lanbin, YANG Xiu. Discussion on different energy accounting methods in energy statistics[J]. Energy of China, 2006, 28(6): 5-8.
- [18] GE Shaoyun, LIU Xiaou, LIU Hong, et al. Research on unit commitment optimization of high permeability wind power generation and P2G[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2018, 10(3): 034702.
- [19] 徐玉杰, 陈海生, 刘佳, 等. 风光互补的压缩空气储能与发电一体化系统特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(20): 88-97.  
XU Yujie, CHEN Haisheng, LIU Jia, et al. Performance analysis on an integrated system of compressed air energy storage and electricity production with wind-solar complementary method[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(20): 88-97.
- [20] 刘佳, 夏红德, 陈海生, 等. 新型液化空气储能技术及其在风电领域的应用[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(12): 1993-1996.  
LIU Jia, XIA Hongde, CHEN Haisheng, et al. A novel energy storage technology based on liquid air and ITS application in

- wind power[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(12): 1993-1996.
- [21] 高滢,王芃,薛友,等.计及需求侧管理的电-气集成能源系统协同规划[J].电力系统自动化,2018,42(13):3-11.  
GAO Ying, WANG Peng, XUE You, et al. Collaborative planning of integrated electricity-gas energy systems considering demand side management [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 3-11.
- [22] 吴界辰,艾欣,胡俊杰,等.计及不确定因素的需求侧灵活性资源优化调度[J].电力系统自动化,2019,43(14):73-80.  
WU Jiechen, AI Xin, HU Junjie, et al. Optimal dispatch of flexible resource on demand side considering uncertainties [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14): 73-80.
- [23] 袁寿其,施卫东,刘厚林.泵理论与技术[M].北京:机械工业出版社,2014.  
YUAN Shouqi, SHI Weidong, LIU Houlin. Pump theory and technology[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2014.
- [24] 蔡茂林.现代气动技术理论与实践第四讲:压缩空气的能量[J].液压气动与密封,2007,27(5):54-59.  
CAI Maolin. Modern pneumatic technology theory and practice & lecture 4: energy of compressed air [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2007, 27(5): 54-59.
- [25] 方志民,金建新.换热器的火用损耗分析[J].浙江工业大学学报,2004,32(2):208-212.  
FANG Zhimin, JIN Jianxin. Study on exergy destruction of heat exchangers [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2004, 32(2): 208-212.
- [26] 杨科,张远,李雪梅,等.先进绝热压缩空气储能的冷热电输出特性研究[J].热能动力工程,2013,28(2):134-138.  
YANG Ke, ZHANG Yuan, LI Xuemei, et al. Research on the cooling, heating and power output characteristics of advanced adiabatic compressed air energy storage [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2013, 28(2): 134-138.
- [27] 高霞,胡燕,冯连勇.不同能源统计加总方法的比较[J].中国能源,2011,33(9):21-26.  
GAO Xia, HU Yan, FENG Lianyong. Comparison of different energy statistics sum methods[J]. China Energy, 2011, 33(9): 21-26.
- [28] 薛志峰,刘晓华,付林,等.一种评价能源利用方式的新方法[J].太阳能学报,2006,27(4):349-355.  
XUE Zhifeng, LIU Xiaohua, FU Lin, et al. A new method for evaluating energy utilization methods [J]. Journal of Solar Energy, 2006, 27(4): 349-355.
- [29] 朱明善.工程热力学[M].北京:清华大学出版社,2011.  
ZHU Mingshan. Engineering thermodynamics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.
- [30] 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.
- 刘晓鸥(1985—),男,通信作者,博士,主要研究方向:综合能源系统仿真与建模。E-mail:liuxiaooou126@126.com  
葛少云(1964—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:城市电网规划、电力系统运行优化及配电系统自动化等。E-mail:syge@tju.edu.cn

(编辑 孔丽蓓)

## Definition and Correlation Analysis on Energy Utilization Efficiency of Regional Integrated Energy System

LIU Xiaou<sup>1</sup>, GE Shaoyun<sup>2</sup>

(1. China Energy Engineering Group Tianjin Electric Power Design Institute Co., Ltd., Tianjin 300400, China;

2. Key Laboratory of the Ministry of Education on Smart Power Grids (Tianjin University), Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Firstly, considering the different energy levels of multi-energy, the regional integrated energy system (RIES) is divided into five parts: energy supply, energy conversion, energy transmission, energy storage and energy demand, and an expression of energy utilization efficiency (EUE) for evaluation of RIES is proposed. Then, through the theoretical analysis of EUE related factors, penetration of renewable energy, efficiency of energy conversion equipment and capacity allocation structure, demand structure of cool/heat/electricity load in five parts of RIES are the core elements, which affect the EUE of RIES. Finally, a case study of demonstration district in China is given to show that the energy efficiency expression can accurately reflect the characteristics of multi-energy complementary coupling and gradient utilization of RIES. By analyzing the EUE of RIES, the importance and method of reasonably allocating energy conversion equipment and optimizing the demand structure of cool/heat/electricity load are demonstrated, which is consistent with the theoretical analysis. The validity of the proposed EUE of RIES is illustrated.

**Key words:** regional integrated energy system; utilization efficiency; energy level; comprehensive energy flow; primary energy

