

多能源热互补分布式能源系统的节能率评价方法

徐 聪^{1,2}, 刘泰秀^{1,2}, 隋 军^{1,2}, 刘启斌^{1,2}

(1. 中国科学院工程热物理研究所, 北京市 100190; 2. 中国科学院大学, 北京市 100049)

摘要: 多能源互补是分布式能源系统的重要发展方向, 相比于化石能源驱动的分布式能源系统, 其节能特性的评价方法研究尚有不足。针对多能源热互补分布式能源系统提出节能率的计算方法, 将系统输入的低品位非化石能源按其做功能力统一折合成燃料, 与输出相同产品的常规分产系统进行比较得到节能率。通过典型太阳能与燃料互补的分布式能源系统比较分析了3种节能率计算方法下, 可再生能源占比、不同形式能量输出比、热/热化学输入热的温度等参数对系统节能性的影响规律, 并以具体的热电联产案例验证了文中节能率计算方法的适用性。结果表明, 所提出的节能率计算方法能够更为合理地评价含有非化石能源的多能互补系统节能特性, 获得了节能率随可再生能源占比增大而增大, 随热互补太阳能集热温度升高而降低, 随热化学互补太阳能集热温度升高而先上升后下降的规律, 反映了根据能的品位合理利用非化石能源和提高多能互补技术先进性能能够改善系统的节能性能。

关键词: 分布式能源系统; 多能源互补; 热互补; 热化学互补; 节能率

0 引言

分布式能源系统以其能源利用率高、采用清洁能源污染物排放少、可靠性高等特点成为国家能源领域中长期发展的重要前沿技术之一^[1-3]。利用可再生能源是缓解化石能源危机, 实现节能减排的重要途径之一^[4], 但受其自身不稳定、不连续、能量密度低等特点的限制^[5], 单独依靠可再生能源供能技术尚不成熟。分布式能源系统靠近用户, 可集成度高, 为因地制宜地利用可再生能源提供了有效途径^[6]。可再生能源等以热的形式输入分布式能源系统中, 形成的多能源热互补分布式能源系统是多能源互补系统的重要形式, 包括热互补和热化学互补, 目前已得到广泛研究。地源热泵和分布式能源系统耦合节约了常规燃料量和污染物排放量, 通过系统集成提高了能源利用效率^[7-8]。文献[9]对太阳能辅助供热的冷热电联产系统进行能效、经济和环境性能分析, 与常规系统相比具有很大优势。金红光团队揭示了多能源互补的品位耦合机理, 针对燃料和聚光太阳能热化学互补开展了一系列研究^[10], 提出

了利用中低温太阳能分解甲醇生产合成气驱动的分布式能源系统, 分析太阳能净发电效率、炯效率、一次能源利用率等性能指标, 表明与分布式能源系统结合是可再生能源一种高效稳定的利用方式^[11-13]。

节能特性是评价分布式能源系统的重要指标之一, 国家已颁布了《分布式冷热电能源系统的节能率第1部分: 化石能源驱动系统》国家标准^[14], 明确了节能率的计算方法并规定了节能率限定值、准入值和先进值, 用以规范国内燃气分布式能源产业和技术的发展。然而, 多能源互补的分布式能源系统由于存在多种能量的输入, 其节能性评价具有复杂性, 且作为支撑的可再生能源转化等相关能效标准不完善, 使得其节能性评价尚未有统一的方法和指标。在以往的研究中, 多采用一次能源利用率, 可再生能源折合发电、制冷或供热效率等作为能效评价指标, 选择的参照系统难以统一。文献[15]将综合能效定义为系统输出总量与外界输入化石能源总量之比, 得到综合能效随可再生能源增加而增大的结论。文献[16]忽略其他输入能源, 将多能源互补系统的节能率定义局限于燃料节约率。上述方法未考虑可再生能源收集、转化的代价, 难以准确反映输入能源的实际情况。文献[17-18]将太阳能按辐照强度与镜场面积的乘积全部计入系统输入, 定义了总能源利用率指标。该类方法是按热力学第一定律处理输入的简单表达方法, 未考虑输入能源品质的不同, 难以

收稿日期: 2017-09-27; 修回日期: 2017-10-31。

上网日期: 2017-12-29。

国家重点研发计划资助项目(2016YFB0901401); 国家自然科学基金资助项目(51236008); 北京市重点实验室资助项目。

准确体现可再生能源的利用过程对系统的影响。太阳能热化学发电系统中常用太阳能净发电效率评价^[19],然而其无法体现系统总体的节能特性。

综上所述,现阶段多能源热互补分布式能源系统在能效评价上仍存在以下问题:可再生能源等非化石能源输入计量不一致且不合理;节能率的研究开展较少,参比系统选择具有主观性;其他指标如太阳能净发电效率存在局限性,无法评价系统总体节能性能等问题。因此,本文将充分考虑非化石能源的特殊性,建立多能源热互补分布式能源系统的节能率计算方法,分析关键因素对节能率的影响规律,并以案例分析验证节能率计算方法的适用性。

1 节能率计算方法

多能源热互补分布式能源系统模型如图1所示。能源输入侧包括燃料、太阳热能、地热能或废热能等的其中一种或多种。燃料进入动力单元发电,或进入热化学互补单元反应生成合成气再进入动力单元发电,动力单元的余热被回收用于驱动制冷或制热单元,太阳热能、地热、废热等能源进入热/热化学互补单元,为燃料提供反应热或直接用于驱动制冷或制热单元。系统最终为用户输出电、冷、热。

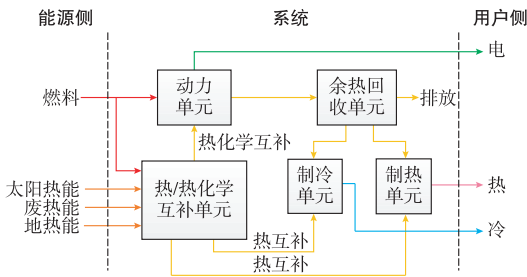


图1 多能源热互补分布式能源系统示意图
Fig.1 Schematic diagram of a distributed energy system with multi-energy thermal complementarity

节能率标准文献[14]中定义节能率如下:

$$\xi_{\text{CCHP}} = \frac{F_a - F_r}{F_a} \times 100\% \quad (1)$$

式中: ξ_{CCHP} 为分布式冷热电能源系统(以下简称系统)的节能率; F_r 为系统的报告期能耗; F_a 为系统的校准能耗。

F_a 按下式计算:

$$F_a = P e_{\text{ref,p}} + C e_{\text{ref,c}} + H e_{\text{ref,h}} \quad (2)$$

式中: P, C, H 分别为系统报告期净供电量、总供冷量、总供热量; $e_{\text{ref,p}}, e_{\text{ref,c}}, e_{\text{ref,h}}$ 分别为供电、供冷、供热能耗参照值。

文献[14]给出了能耗参照值的取值表。此标准仅适用于化石能源驱动的系统,但其节能率的意义

是广义的,即与分布式能源系统输出相同产品的参比系统总能耗与系统总能耗之差比上参比系统总能耗。对于多能源互补的分布式能源系统,是不同品质的多种能源输入且转换利用方式各异,如何计量系统能源输入总量成为关键问题。为方便与节能率标准对接,可将多能源互补系统的输入能源统一向燃料折合,定义 k 为折合系数。前文提及的两种做法分别是不考虑可再生能源的输入或按量直接与燃料相加^[15-18],即 $k=0$ 和 $k=1$ 。当 $k=0$ 时,认为可再生能源是“白得”的,系统的节能率随可再生能源的增加一定增加,此种方法仅适用于考察系统在燃料方面的节约情况,而不能反映多能源互补系统整体的节能情况,且无法反映出可再生能源收集、转化、利用技术对系统节能性的影响。当 $k=1$ 时,认为可再生能源和燃料完全等同,忽视了可再生能源由于能量密度低、不稳定等特性导致的收集和转化效率低,容易产生可再生能源在系统中占比越大,节能率越低的情况,不能真实反映可再生能源的利用对节能减排的作用。

在多能源热互补系统中,可再生能源如太阳能、地热能或废热能等是以较低品位的热能形式进入系统,因此问题转化为低品位热能如何向燃料折合。本文提出将低品位非化石能源按做功能力向燃料折合的思路。能的品位定义为某微元过程能量释放侧或接收侧释放或接收的焓与释放或接收的能量之比,定义式为^[20]:

$$A = \frac{dE}{dH} \quad (3)$$

式中: A 为能的品位; dE 为微元过程接收或释放的焓; dH 为微元过程接收或释放的能量。

由此得出功的品位为1。同时,燃料化学能的品位通常也很高,如常用燃料煤、天然气、甲醇、合成气等燃料燃烧时的品位一般都在0.9~1范围内^[21-23],因此为方便计算,本文将燃料化学能的品位近似认为是1。物理能(热)的品位被认为是释放或接收热量的热源温度所对应的卡诺循环效率^[20],因此按本文计算方法,热互补系统输入热能的折合系数 k 为输入热能的卡诺循环效率。卡诺循环效率的定义式为:

$$\eta_c = 1 - \frac{T_0}{T} \quad (4)$$

式中: η_c 为卡诺循环效率; T_0 为环境温度; T 为以热的形式输入系统的低品位非化石能源的温度。

根据热能品位的定义,如500℃热能的 η_c 为0.61,80℃热能的 η_c 为0.16,实现了低品位热能向

燃料的折合,方便与化石能源系统的节能率标准对接和实际应用。

本文针对多能源热互补分布式能源系统,提出将系统输入的低品位非化石能源,如可再生能源、废热能等,根据其品位按做功能力折合成燃料的方法计量,并与系统输入燃料相加,作为系统的总能耗。进一步,可按照现有化石能源驱动的分布式能源系统节能率标准,计算得到与现有分产技术相比的节能率,具体方法如下:

$$\xi_{\text{MCCHP1}} = \frac{Q_a - Q_r}{Q_a} \times 100\% \quad (5)$$

式中: ξ_{MCCHP1} 为本文提出的多能源热互补分布式能源系统的节能率; Q_r 为多能源热互补分布式能源系统的能耗, Q_a 为参比系统能耗,单位均为 kJ。

系统能耗 Q_r 为:

$$Q_r = \sum_i Q_{f,i} + \sum_j Q_{nf,j} \eta_{nf,j} \quad (6)$$

$$\eta_{nf,j} = 1 - \frac{T_0}{T_{nf,j}} \quad (7)$$

式中: $Q_{f,i}$ 为某种燃料的总发热量,单位为 kJ; $Q_{nf,j}$ 为以热的形式输入系统的某种低品位非化石能源的能量,单位为 kJ, $T_{nf,j}$ 为其输入温度,单位为 K, $\eta_{nf,j}$ 为该温度下的卡诺循环效率。

参比系统能耗 Q_a 为:

$$Q_a = \frac{P}{\eta_{e,\text{ref}}} + \frac{C}{\eta_{re,\text{ref}} \eta_{e,\text{ref}}} + \frac{H}{\eta_{b,\text{ref}}} \quad (8)$$

式中: $\eta_{e,\text{ref}}$ 、 $\eta_{re,\text{ref}}$ 、 $\eta_{b,\text{ref}}$ 分别为参比系统的供电效率、制冷系数、供热效率。

P 、 C 、 H 以实测数据或设计值为准,如数据缺乏,可以按以下方法计算:

$$P = \sum_i Q_{f,i} \eta_{ef,i} + \sum_j Q_{nf,j} f_j \eta_{enf,j} \quad (9)$$

$$C = \sum_k Q_{c,k} \eta_{re,k} \quad (10)$$

$$H = \sum_l Q_{h,l} \eta_{b,l} \quad (11)$$

式中: $\eta_{ef,i}$ 为某种常规燃料驱动的动力机组发电效率; f_j 为某种非化石能源的热化学转换效率; $\eta_{enf,j}$ 为其转化成燃料驱动的动力机组的发电效率; $Q_{c,k}$ 为某股输入制冷单元的驱动热量,单位为 kJ, $\eta_{re,k}$ 为其对应的制冷系数; $Q_{h,l}$ 为某股输入制热单元的驱动热量,单位为 kJ, $\eta_{b,l}$ 为其对应的制热效率。

将式(6)至式(11)代入式(5),得到多能源热互补分布式能源系统的节能率计算公式如式(12)所示。以往研究中所采取的两种节能率计算方法下的节能率分别以 ξ_{MCCHP2} ($k=1$) 和 ξ_{MCCHP3} ($k=0$) 表示,

计算公式分别如式(13)和式(14)所示。

$$\xi_{\text{MCCHP1}} = 1 - \frac{\sum_i Q_{f,i} + \sum_j Q_{nf,j} \left(1 - \frac{T_0}{T_{nf,j}}\right)}{\frac{\sum_i Q_{f,i} \eta_{ef,i} + \sum_j Q_{nf,j} f_j \eta_{enf,j}}{\eta_{e,\text{ref}}} + \frac{\sum_k Q_{c,k} \eta_{re,k} + \sum_l Q_{h,l} \eta_{b,l}}{\eta_{re,\text{ref}} \eta_{e,\text{ref}} + \eta_{b,\text{ref}}}} \quad (12)$$

$$\xi_{\text{MCCHP2}} = 1 - \frac{\sum_i Q_{f,i} + \sum_j Q_{nf,j}}{\frac{\sum_i Q_{f,i} \eta_{ef,i} + \sum_j Q_{nf,j} f_j \eta_{enf,j}}{\eta_{e,\text{ref}}} + \frac{\sum_k Q_{c,k} \eta_{re,k} + \sum_l Q_{h,l} \eta_{b,l}}{\eta_{re,\text{ref}} \eta_{e,\text{ref}} + \eta_{b,\text{ref}}}} \quad (13)$$

$$\xi_{\text{MCCHP3}} = 1 - \frac{\sum_i Q_{f,i} \cdot \frac{1}{\eta_{e,\text{ref}}}}{\frac{\sum_i Q_{f,i} \eta_{ef,i} + \sum_j Q_{nf,j} f_j \eta_{enf,j}}{\eta_{e,\text{ref}}} + \frac{\sum_k Q_{c,k} \eta_{re,k} + \sum_l Q_{h,l} \eta_{b,l}}{\eta_{re,\text{ref}} \eta_{e,\text{ref}} + \eta_{b,\text{ref}}}} \quad (14)$$

2 节能率计算方法比较及影响因素分析

由上述计算方法可知,节能率和燃料输入量、非化石能源输入量及其品位,系统内部能量转化利用方式及效率,不同形式能量输出比例,参比系统性能等有关。鉴于对化石能源驱动系统的节能率影响因素研究已有很多,为突出多能源互补系统的特点,比较各节能率计算方法对于分析多能源热互补系统的适用性,本文主要研究引入可再生能源等低品位非化石能源在3种计算方法下对节能率的影响规律。

以典型太阳能和燃料热/热化学互补分布式能源系统为例,为方便分析,定义以下几个参数: R 为太阳能投射到聚光集热器上的总能量占其与燃料总发热量之和的比例(以下简称太阳能占比); x 为太阳能中用于热化学互补的份额,则 $1-x$ 为用于热互补的份额; T_1 为热化学互补集热温度; T_2 为热互补集热温度; f 为太阳能热化学转换效率; r_c 和 r_h 分别为系统输出冷电比和热电比。假设热化学发电动力机组和常规燃料动力机组发电效率相同均为

η_{ef} 。热化学发电不能满足用户电负荷时增加常规燃料动力机组,系统不能满足用户冷负荷或热负荷时增加直燃锅炉提供补充热源。将以上参数代入式(12)至式(14)中,可得3种计算方法的节能率计算公式如下:

$$\xi_{MCCHP1} = 1 - \frac{1 + \frac{R}{1-R}x \left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) + \frac{R}{1-R}(1-x) \left(1 - \frac{T_0}{T_2}\right)}{\left(\frac{1}{\eta_{e,ref}} + \frac{r_c}{\eta_{re,ref}} + \frac{r_h}{\eta_{b,ref}}\right) \left(\eta_{ef} + \frac{R}{1-R}xf\eta_{ef}\right)} \quad (15)$$

$$\xi_{MCCHP2} = 1 - \frac{1 + \frac{R}{1-R}}{\left(\frac{1}{\eta_{e,ref}} + \frac{r_c}{\eta_{re,ref}} + \frac{r_h}{\eta_{b,ref}}\right) \left(\eta_{ef} + \frac{R}{1-R}xf\eta_{ef}\right)} \quad (16)$$

$$\xi_{MCCHP3} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{1}{\eta_{e,ref}} + \frac{r_c}{\eta_{re,ref}} + \frac{r_h}{\eta_{b,ref}}\right) \left(\eta_{ef} + \frac{R}{1-R}xf\eta_{ef}\right)} \quad (17)$$

参比系统性能根据化石能源驱动系统的节能率标准换算取定 $\eta_{e,ref}$ 为 38%, $\eta_{re,ref}$ 为 4, $\eta_{b,ref}$ 为 83.4%。为重点分析太阳能的引入对系统节能率的影响,确定系统其他参数如附录 A 表 A1 所示。

2.1 太阳能占比

系统输入可再生能源占比对节能率的影响值得研究,系统输出电冷热的比例对节能率也有影响。 $r_c=1, r_h=1$ 和 $r_c=0, r_h=2$ 两种情况下,节能率随太阳能占比 R 的变化如图 2 所示。

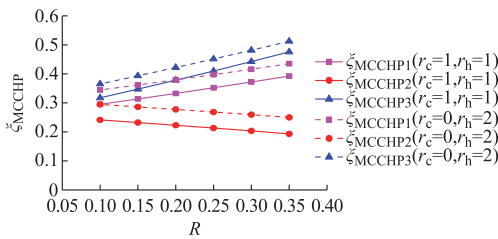


图 2 太阳能占比对节能率的影响
Fig.2 Influence of solar proportion on energy saving ratio

由图 2 可知,当其他条件一定时, ξ_{MCCHP2} 随 R 的增加而下降,是由于把低品位的太阳能完全按照高品位的燃料作为系统能源输入量,导致可再生能源的引入反而引起系统节能性能下降的不恰当结论。 ξ_{MCCHP3} 随 R 的增加显著上升且始终保持很高,说明完全忽略可再生能源的输入价值,不考虑其收集、转化的代价,难以准确反映输入能源的实际情

况。本文计算方法下的节能率介于前两者之间,随 R 的增加 ξ_{MCCHP1} 上升趋势较缓,综合考虑了可再生能源的品质较低和转化利用的代价,更符合客观实际。由输出冷电比、热电比不同情况对比可知,当系统输出冷和热的总和与输出电的比例(r_c+r_h)一定时,输出热的比例越大,系统节能率越大,是由于参比系统制冷能耗要低于制热能耗,因此输出更多热时参比系统会更耗能,从而分布式能源系统更节能。

2.2 太阳能热互补集热温度

太阳能集热温度是太阳能热互补能量转化利用过程的重要影响因素。当 R 分别为 0.2 和 0.3 时,以槽式太阳能集热器为例,在集热器其他影响参数选定时,集热温度 T_2 对太阳能集热效率 η_{c1c2} 和系统节能率的影响结果如图 3、图 4 所示。

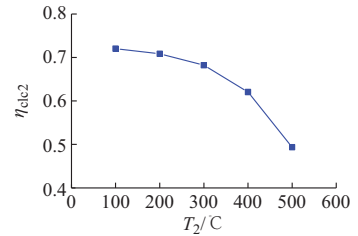


图 3 集热温度对集热效率的影响
Fig.3 Influence of heat collecting temperature on heat collecting efficiency

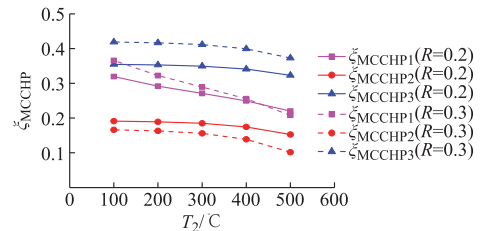


图 4 热互补集热温度对节能率的影响
Fig.4 Influence of thermal complementary heat collecting temperature on energy saving ratio

由图 3 可知,随着 T_2 的升高, η_{c1c2} 明显下降,因为集热温度越高,集热器的热损失越大。 η_{c1c2} 的下降导致输入相同太阳能时,其中可被利用的热能下降,因此在图 4 中,3 种计算方法下的节能率均下降。以往计算方法由于将太阳能全部计入或完全忽略, ξ_{MCCHP2} 和 ξ_{MCCHP3} 受 T_2 的影响很小,温度升高 400 °C,节能率降低不足 5%。而本文提出的计算方法将太阳能根据品位按做功能力折算,因此 T_2 越高,太阳能所折合成的燃料量越大,系统总能耗越大,节能率下降明显。

该方法不仅体现出不同集热温度下集热效率本身的差异,更能体现出热互补利用的本质,是由较高

品位的热能向较低品位的热能转化,输入和输出的品位差越大,系统越不节能,揭示了能量品位匹配对系统节能性的重要影响。由于热化学互补的份额 x 不变,当 R 越大时,节能率受集热温度影响越明显。当 T_2 超过 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 时, ξ_{MCCHP1} 已不再随 R 的增加而增大,因为集热温度较高时太阳能根据品位所能折合成的燃料量较多,而热互补供热效率此时却较低,引入太阳能得到的收益不足以弥补输入的太阳能所折合成燃料的代价,没有实现高品位能量的高效利用。该结果说明多能源互补系统不是一味追求提高可再生能源的输入比例,更应根据能的品位对可再生能源进行温度对口,梯级利用。

2.3 太阳能热化学集热温度

与热互补过程类似,太阳能集热温度同样是太阳能热化学互补过程的重要影响因素,且集热温度不仅会影响集热效率,进而还会影响热化学转换效率。为突出重点,仅考虑太阳能热化学发电系统驱动的联产系统,热化学转换效率 f 和节能率随太阳能热化学集热温度 T_1 变化的结果如图 5、图 6 所示,其中热化学反应过程采用 Aspen 软件 Gibbs 反应器模拟。

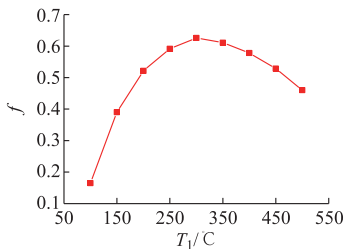


图 5 集热温度对热化学转换效率的影响
Fig.5 Influence of heat collecting temperature on thermal to chemical transforming efficiency

与热互补不同,虽然随着 T_1 升高,集热效率一直下降,但热化学反应随反应温度的升高燃料转化率会升高,获得的合成气燃料热值越大。当 T_1 过低时,燃料几乎没有实现转化,因此即便此时集热效率较高, f 仍很小,因此 f 在集热效率和热化学反应均随温度变化的双重作用下,呈现先上升后下降

的趋势。而当 T_1 超过 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 时,燃料基本实现全部转化,此后 f 主要受集热效率影响。由于分析对象是热化学发电系统余热回收利用的联产系统,因此 ξ_{MCCHP2} 和 ξ_{MCCHP3} 随 T_1 的变化完全取决于 f 随 T_1 的变化,如图 6 所示。

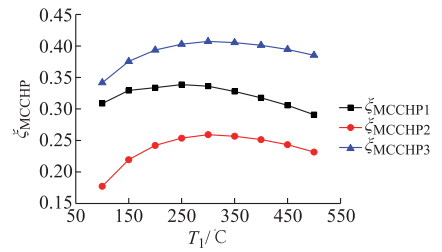


图 6 热化学互补集热温度对节能率的影响
Fig.6 Influence of thermochemical complementary heat collecting temperature on energy saving ratio

ξ_{MCCHP1} 和 f 随 T_1 的变化规律并不完全相同,分别在 $250\text{ }^\circ\text{C}$ 附近和 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 附近达到最高值,而且分别在 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 达到最小值。这是由于本文提出的节能率计算方法考虑了所输入可再生能源在质上有所区别,考虑到了可再生能源收集、转化的代价,技术的难易程度对系统节能性的影响,是从系统层面出发的整体评价,而非单一衡量某项能源转化过程的优劣,因此适合作为系统节能性优化的评价指标。

3 案例分析

为了进一步阐述所提出的节能率计算方法,以及分析不同互补系统节能率的差异,本文选取 3 类分布式能源系统向某用户供能,分别为:太阳能热化学发电与太阳能供热方案、甲醇直燃发电与太阳能供热方案、甲醇直燃发电与供热方案。

各系统流程示意图分别见附录 B 图 B1、图 B2、图 B3。上述方案中选取的用户负荷及系统参数见附录 B 表 B1。

在给定的用户电、热负荷下,对上述 3 种方案分别进行能量平衡分析,并基于所提的节能率计算方法进行性能评价分析。系统能量分析结果见表 1。

表 1 能量分析结果
Table 1 Energy analysis results

方案	电输出/ kW	热输出/ kW	太阳能投入 量(热化学)/ kW	太阳能投入 折算量 (热化学)/ kW	太阳能投入 量(供热)/ kW	太阳能投入 折算量 (供热)/ kW	输入甲醇 燃料量/ kW	系统能量 总输入 (无折算)/ kW	系统能量 总输入 (折算)/ kW	节能率 (不折算)/ %	节能率 (折算)/ %
1	600	1 300	375.46	161.48	872.68	210.87	1 514.27	2 762.42	1 886.64	11.62	39.64
2	600	1 300	0	0	872.68	210.87	1 818.18	2 690.86	2 029.05	13.91	35.09
3	600	1 300	0	0	0	0	2 547.12	2 547.12	2 547.12	18.51	18.51

通过表 1 结果分析可得,如果不考虑太阳能与化石能源之间的品质差异,直接把太阳能按量作为系统能源输入,则方案 1 的节能率最低,方案 3 的节能率最高,所计算得出的节能率数值并不能客观反映出系统供能技术的先进性。根据本文节能率计算方法得出节能率由高到低分别是方案 1,2,3,表明该多能源互补系统设计合理,较传统分布式能源系统具有更高的节能性,且热化学互补方式实现了可再生能源品位的提升,使得系统更节能,该结果与实际系统的先进程度相一致,对多能源热互补分布式能源系统评价具有更加客观的指导意义。

4 结语

针对目前多能源热互补分布式能源系统节能性评价存在的问题,本文提出将低品位非化石能源按做功能力折合成燃料的节能率计算方法,并对可再生能源占比、不同形式能量输出比例、热/热化学互补温度等关键因素对系统节能率的影响规律进行分析,对比了 3 种节能率计算方法的结果,结论如下。

1) 低品位非化石能源按量全部计入能源输入或全部舍弃的方法存在不合理性或局限性。前者可能得出随可再生能源占比增大节能率减小的不适当结论;后者无法体现可再生能源的转化利用和技术先进性带来的节能效果,因此也无法反映客观实际。

2) 本文提出的节能率计算方法能够反映低品位非化石能源收集、转化过程对系统节能性的影响,且折合成燃料后便于与现有化石能源驱动的分布式能源系统节能率国家标准对接,进而通过与传统参比系统进行比较,评价多能源热互补系统的节能特性,便于工程实际应用。

3) 根据本文节能率计算方法,在发电、制冷空调和采暖的一般需求情况下,系统节能率随可再生能源占比提高而提高,随热互补输入热温度的升高而降低,减小热互补利用过程输入和产出的品位差能够有效提高节能性;随热化学互补输入热温度的升高,系统节能率先上升后下降,反映了为获得更多节能收益,在提高技术先进性的同时应考虑可再生能源的品质,收集、转化技术的难易程度,从而对多能源热互补系统进行优化设计。

通过具体案例,对比了不同节能率计算方法下 3 类热电联产系统的节能效果,验证了本文节能率计算方法的适用性。本文研究提出的节能率评价方法,对多能源热互补分布式能源系统的节能性评价具有指导意义,但不适用于可再生能源等以非热形式输入的其他多能源互补系统,如风电、光伏等。更广泛的多能源互补系统的节能性评价尚有待于拓展研究。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 金红光,郑丹星,徐建中.分布式冷热电联产系统装置及应用[M].北京:中国电力出版社,2008:7-10.
- [2] 中华人民共和国国务院.国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)[R].2006.
- [3] 王雁凌,李蓓,崔航.天然气分布式能源站综合价值分析[J].电力系统自动化,2016,40(1):136-141. DOI: 10.7500/AEPS20150521003.
WANG Yanling, LI Bei, CUI Hang. Comprehensive value analysis for gas distributed energy station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 136-141. DOI: 10.7500/AEPS20150521003.
- [4] 王康达,张保会.远方集中式与就地分布式光伏供电经济性比较[J].电力系统自动化,2017,41(16):179-186. DOI: 10.7500/AEPS20161104004.
WANG Kangda, ZHANG Baohui. Economy comparison of distant ground photovoltaic stations and distributed photovoltaic stations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 179-186. DOI: 10.7500/AEPS20161104004.
- [5] 康重庆,姚良忠.高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J].电力系统自动化,2017,41(9):2-11. DOI: 10.7500/AEPS20170120004.
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2-11. DOI: 10.7500/AEPS20170120004.
- [6] 王进,李欣然,杨洪明,等.与电力系统协同区域型分布式冷热电联供能源系统集成方案[J].电力系统自动化,2014,38(16):16-21. DOI: 10.7500/AEPS20130523006.
WANG Jin, LI Xinran, YANG Hongming, et al. An integration scheme for DES/CCHP coordinated with power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16): 16-21. DOI: 10.7500/AEPS20130523006.
- [7] 郭畅.基于天然气和地源热泵综合利用的分布式能源耦合系统研究[D].济南:山东建筑大学,2014.
- [8] 康书硕,李洪强,蔡博,等.分布式能源系统与地源热泵耦合的系统研究[J].工程热物理学报,2013,34(5):817-821.
KANG Shushuo, LI Hongqiang, CAI Bo, et al. Research on the system of distributed energy system coupling with ground source heat pump[J]. Journal Engineering Thermophysics, 2013, 34(5): 817-821.
- [9] FANI M, SADREDDIN A. Solar assisted CCHP system, energetic, economic and environmental analysis, case study: educational office buildings[J]. Energy and Buildings, 2017, 136: 100-109.
- [10] 金红光,隋军,徐聪,等.多能源互补的分布式冷热电联产系统理论与方法研究[J].中国电机工程学报,2016,36(12):3150-3160.
JIN Hongguang, SUI Jun, XU Cong, et al. Research on theory and method of multi-energy complementary distributed CCHP system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3150-3160.
- [11] HONG Hui, JIN Hongguang, JI Jun, et al. Solar thermal power cycle with integration of methanol decomposition and

- middle-temperature solar thermal energy[J]. *Solar Energy*, 2005, 78(1): 49-58.
- [12] XU Da, LIU Qibin, LEI Jing, et al. Performance of a combined cooling heating and power system with mid-and-low temperature solar thermal energy and methanol decomposition integration[J]. *Energy Procedia*, 2015, 61: 1364-1367.
- [13] LIU Taixiu, LIU Qibin, XU Da, et al. Performance investigation of a new distributed energy system integrated a solar thermochemical process with chemical recuperation[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 119: 387-395.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 分布式冷热电能源系统的节能率第 1 部分: 化石能源驱动系统: GB/T 33757.1—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [15] 黄子硕, 于航, 彭震伟. 多能互补分布式能源系统的能效水平及其影响因素[J]. *暖通空调*, 2017, 47(4): 23-28. HUANG Zishuo, YU Hang, PENG Zhenwei. Energy efficiency analysis of distributed multi-energy system [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2017, 47(4): 23-28.
- [16] 周崇波, 颜喜, 程雪山. 基于微网多能源互补分布式能源站的节能分析[J]. *节能*, 2016, 35(4): 69-71. ZHOU Chongbo, YAN Xi, CHENG Xueshan. Energy-saving analysis of multi-energy complementary distributed energy station based on micro-network [J]. *Energy Conservation*, 2016, 35(4): 69-71.
- [17] 许达. 中低温太阳能与甲醇热化学互补的分布式能源系统集成[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- [18] CHANG Huawei, WAN Zhongmin, ZHENG Yao. Energy analysis of a hybrid PEMFC—solar energy residential micro-CCHP system combined with an organic Rankine cycle and vapor compression cycle [J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 142: 374-384.
- [19] SU Bosheng, HAN Wei, JIN Hongguang. Proposal and assessment of a novel integrated CCHP system with biogas steam reforming using solar energy[J]. *Applied Energy*, 2017, 206: 1-11.
- [20] 金红光, 林汝谋. 能的综合梯级利用与燃气轮机总能系统[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 67.
- [21] 金红光, 洪慧, 王宝群, 等. 化学能与物理能综合梯级利用原理[J]. *中国科学 E 辑: 工程科学 材料科学*, 2005, 35(3): 299-313. JIN Hongguang, HONG Hui, WANG Baoqun, et al. The principle of comprehensive cascade utilization of chemical and physical energy[J]. *Science in China Ser. E: Engineering & Materials Science*, 2005, 35(3): 299-313.
- [22] 洪慧. 燃料化学能与物理能综合梯级利用的热力循环[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2004.
- [23] 韩巍. 多能源互补的多功能能源系统及其集成机理[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006.

徐 聪(1989—), 女, 博士研究生, 主要研究方向: 分布式能源系统集成方法. E-mail: xucong@iet.cn

刘泰秀(1993—), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 太阳能热化学转换与利用技术. E-mail: liutaixiu@iet.cn

隋 军(1973—), 男, 通信作者, 博士, 研究员, 主要研究方向: 多能源互补的分布式能源系统. E-mail: suijun@iet.cn

(编辑 章黎)

Evaluation Method for Energy Saving Ratio of Distributed Energy System with Multi-energy Thermal Complementarity

XU Cong^{1,2}, LIU Taixiu^{1,2}, SUI Jun^{1,2}, LIU Qibin^{1,2}

(1. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Multi-energy complementarity is an important development direction of distributed energy system. Compared with fossil energy driven distributed energy system, the evaluation method of energy saving characteristics is still inadequate. The input non-fossil energy of low grade is converted into fuel according to the work ability, and the energy saving ratio is then obtained by comparing with the conventional sub-production system which has the same products. The effect of parameters such as the proportion of renewable energy, different energy output ratios and inputting heat temperature of thermal or thermochemical complementarity on the energy saving characteristics of the system is analyzed through a typical solar energy and fuel complementary distributed energy system, and a specific cogeneration case is studied to verify the applicability of the proposed calculation method of energy saving ratio. The results show that the evaluation method of energy saving ratio proposed can more reasonably evaluate the energy saving characteristics of multi-energy complementary system with non-fossil energy. The energy saving ratio increases with the increase of the renewable energy proportion and decreases with the increase of the solar collecting temperature of thermal complementarity. With the increase of the solar collecting temperature of thermochemical complementarity, the energy saving ratio rises first and then declines. The results reflect that rational use of non-fossil energy according to the energy grade and the performance improvement of multi-energy complementary technologies can improve the energy saving characteristics of the system.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2016YFB0901401), National Natural Science Foundation of China (No. 51236008) and Beijing Key Laboratory Project.

Key words: distributed energy system; multi-energy complementarity; thermal complementarity; thermochemical complementarity; energy saving ratio