

面向多能协同园区的能源综合利用率指标

薛屹洵¹, 郭庆来¹, 孙宏斌¹, 沈欣炜², 汤磊³

(1. 清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084;

2. 清华-伯克利深圳学院, 广东 深圳 518000; 3. 北京清大高科系统控制有限公司, 北京 102208)

摘要: 考虑综合能源系统多能流特性及可再生能源接入影响, 提出适用于多能协同园区能效评估的能源综合利用率指标。该指标可综合反映园区对可再生能源的消纳率及不可再生能源的利用水平, 体现综合能源系统低碳、高效的核心特点。分析比较了所提指标与其他能效指标的区别, 讨论了不同目标对调度策略的影响。算例结果表明, 相比于传统一次能源利用率的直接推广, 该指标能更准确地体现园区多能联供、能量梯级利用的优势。同时, 通过适当调整电价, 成本最低与能源综合利用率最高的调度结果将趋于一致, 反映了为促进可再生能源消纳, 减少非可再生一次能源耗量, 合理定价的必要性。

关键词: 综合能源系统; 多能协同园区; 能源综合利用率; 能效评估; 可再生能源

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.06.016

0 引言

能源是人类赖以生存和发展的基础, 是关系到国家安全稳定、国民经济发展的根本战略资源。近年来, 我国在能源领域发展迅速, 但仍面临严峻挑战。在源侧, 2015 年我国平均弃风率达到 15%, 西北部分地区平均弃光率则高达 30%, 弃风弃光问题严重。在用能侧, 2011 年中国单位 GDP 是世界平均水平的 2.5 倍, 能源利用效率低下成为阻碍中国经济转型的重要问题^[1]。随着中央提出推动我国能源生产与消费革命, 促进可再生能源消纳、提升社会用能效率, 成为我国能源发展的当务之急。

面对当今能源发展的诸多问题, 综合能源系统成为适应我国能源领域变革、确保社会用能安全和长治久安的必经之路。根据地理因素, 综合能源系统可分为跨区级、园区级和用户级^[2]。其中, 多能协同园区是其在地域分布与功能实现的具体体现。目前, 综合能源系统在我国迅速发展, 建立了一系列园区级示范工程, 如天津中新生态城、上海崇明岛、上海迪士尼度假区等。综合能源系统已成为国际学术界关注的新焦点, 而多能协同园区亦成为产业界的又一前沿发展方向与重要课题^[3]。

综合能源系统的核心在于其将多种类型能源的源、网、荷深度融合, 通过多能互补协同及能量梯级利用, 促进可再生能源的消纳, 实现能源的清洁高效供给^[4]。然而, 如何在规划、运行等阶段合理地应用与评估其低碳、高效的核心特点, 体现其相对于传统分

供能源系统的优势, 是多能协同园区在进一步工程实践中亟需解决的问题。而应对这一问题, 提出合理评价多能协同园区能效水平, 同时能体现其低碳、高效核心特征, 有助于园区消纳可再生能源并减少非可再生能源消耗的指标, 正是本文所要解决的。

目前, 有关能效评估指标的研究可分为基于热力学第一定律和热力学第二定律 2 类, 且多为“效率”指标, 即数值介于 0 与 1 之间。一次能源利用率是基于热力学第一定律的典型指标, 其侧重于能量的数量。Sun^[5]等人通过一次能源利用率分析比较冷热电联供 (CCHP) 系统与分供系统在能源利用方面的优势, 结果表明 CCHP 系统的一次能源利用率比分供系统高 35%。Santo^[6]以一次能源利用率最高为优化目标, 分析了以内燃机作为驱动装置的 CCHP 系统的运行情况, 并预测出基于 2 种不同运行模式下系统的指标特性。除一次能源利用率外, Hui Li^[7]等人将一次能源节约率这一指标作为评价指标来对比分析 CCHP 系统和分供系统的一次能源利用情况, 这一方法主要是通过分供系统的对比来反映联供的节能优势。但一次能源节约率为相对性指标, 其通过比较分供与 CCHP 一次能源耗量的差异以评估联供的能效, 受分供参考系统参数的影响较大。

除第一定律外, 焓效率是基于热力学第二定律的能效评估指标, 其侧重于不同能量转化为寂态的最大做功能力。Ebmhimi^[8]等人选取焓效率为评价指标, 分析了住宅建筑 CCHP 系统中各环节的焓损失。Huangfu^[9]人等则重点分析了微型 CCHP 系统的一次能源利用率和焓效率, 并得出结论采用高效燃气轮机对 CCHP 的优化运行起到重要的作用。焓效率忽视了熵的作用, 且结果受参考系影响很大, 目前研究也多集中于 CCHP 系统。

收稿日期: 2017-03-28; 修回日期: 2017-05-07

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2016YFB0901300); 国家自然科学基金资助项目 (51537006)

Project supported by the National Key R&D Program of China (2016YFB0901300) and the National Natural Science Foundation of China (51537006)

除指标所固有的问题外,上述能效指标主要是针对 CCHP 系统的评估。而针对多能协同园区,其能效评估存在一系列新的问题:(1)与 CCHP 不同,综合能源园区的能流关系复杂,其能量输入不再限于燃气、煤炭等一次能源;(2)热泵、电制冷机等能效比(COP)超过 1 的设备的广泛应用使得“效率”评估必须考虑空气中热能等能量的输入,而考虑空气中热能的利用程度并无实际意义;(3)综合能源系统能效评估的意义在于指导其提高可再生能源的消纳率、降低非可再生能源的利用量,因此仅仅细化传统一次能源利用率以反映对一次能源的利用效率缺乏实际意义。

针对上述问题,本文分析了传统能效评估方法存在的问题,考虑园区级综合能量系统多能流特征及可再生能源接入的影响,提出了适用于园区能效评估的能源综合利用率指标。该指标并非一次能源利用率的细化或简单推广,其在考虑园区多能流特性的同时,引入了能源不可再生系数,并将外购电依照渗透率折算为对应的一次能源。该指标反映了园区对于不可再生能源的利用率和对可再生能源的消纳水平。相对于传统指标,本文的创新之处在于:(1)传统指标仅适用于 CCHP 设备,本文提出了适用于园区能效评估的能源综合利用率指标;(2)区别于传统指标,所提指标综合反映了园区对于可再生能源的消纳率及不可再生能源的利用水平,从而可促进园区的低碳、高效供能;算例中进一步验证了所提指标在多能协同园区不同运行模式下的有效性,并以优化调度为工具探讨了不同目标函数对调度策略的影响,以及为提升园区能源综合利用率,合理定价的必要性。

1 多能协同园区能效评估

现有的评估指标仅适用于 CCHP 设备,未考虑到多能协同园区多能流特性及其能效评估的实际意义。针对这一问题,本文旨在从第三方的角度出发,考虑综合能源系统的多能流特性,提出合理评价多能协同园区的能效水平,同时能体现其低碳、高效核心特征,有助于园区消纳可再生能源并减少非可再生能源消耗的指标。

对于多能协同园区,其输入输出能流组成如图 1 所示。其中,输出能量为冷、热、电负荷,输入能量包含来自电网的外购电能、本地接入的可再生能源以及煤炭或天然气等能源。进一步,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。因此,该园区接入的可再生能源包含两部分:一部分通过电网接入,另一部分为本地可再生能源,不通过大电网直接接入。

结合图 1,以 T 为评估周期,将多能协同园区能量输入按是否来自外部电网分为购电能量 $E_{\text{grid},T}$ 与

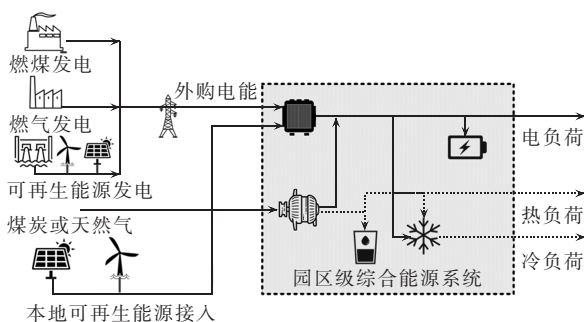


图 1 多能协同园区能流输入输出组成

Fig.1 Input and output energy flows of park-level multi-energy cooperation

他能量 $E_{\text{other},T}$ 两部分。考虑到可再生能源接入的影响及园区多能流特性,提出能源综合利用率指标,其定义如下:

$$\eta = \frac{P_{L,T} + C_{L,T} + Q_{L,T}}{E_{\text{grid},T} + E_{\text{other},T}} \quad (1)$$

$$P_{L,T} = \int_0^T P_L(t) dt \quad (2)$$

$$C_{L,T} = \int_0^T C_L(t) dt \quad (3)$$

$$Q_{L,T} = \int_0^T Q_L(t) dt \quad (4)$$

$$E_{\text{grid},T} = \int_0^T \left(\xi_{\text{re}} v_{\text{re}}(t) + \frac{\xi_{\text{coal}} v_{\text{coal}}(t)}{\lambda_{\text{coal}}} + \frac{\xi_{\text{gas}} v_{\text{gas}}(t)}{\lambda_{\text{gas}}} \right) P_{\text{buy}}(t) dt \quad (5)$$

$$E_{\text{other},T} = \int_0^T (\xi_{\text{re}} P_{\text{re}}(t) + F_{\text{coal}}(t) + F_{\text{gas}}(t)) dt \quad (6)$$

其中, η 为园区能源综合利用率; $P_{L,T}$ 、 $C_{L,T}$ 、 $Q_{L,T}$ 分别为园区在 T 时段内的供电、供冷与供热量,单位为 kJ; $P_L(t)$ 、 $C_L(t)$ 、 $Q_L(t)$ 为 t 时刻园区电、冷、热负荷功率,单位为 kW;下标 re、coal、gas 分别表示能量来源为可再生能源、煤炭、天然气,下同; ξ 为能源不可再生系数,对于可再生能源该值为 0,不可再生能源为 1; $v(t)$ 为 t 时刻外购电中不同一次能源来源的渗透率; λ 为相应机组发电效率; $P_{\text{buy}}(t)$ 为 t 时刻园区购入电网电能功率,单位为 kW; $P_{\text{re}}(t)$ 为 t 时刻园区不经电网所接入的可再生能源功率,单位为 kW; $F(t)$ 为所消耗相应燃料的低位热值,单位为 kJ。

由式(1)可知,该指标着眼于整体评价园区对一次能源中不可再生部分的利用情况,其不考虑园区内部能流转换关系。如园区供电可能具有外购电能、CCHP 发电等多种来源,供冷量与供热量同理。

考虑到能效评估主要是针对煤、天然气等不可再生能源,对仅由可再生能源供能的系统进行能效评估并无实际意义。因此本文定义了能源不可再生系数 ξ 来描述能源的不可再生程度,将外购电网电能 $E_{\text{grid},T}$ 根据其来源按渗透率细分为可再生能源电能、燃气发电、燃煤发电,并将各部分按照对应机组发电效率折

算到发电侧。

由式(1)~(6)可知:(1)对于多能协同园区,在一定负荷下,其一次能源综合利用率越高,则对应的非可再生一次能源耗量越低,两者具有一致性;(2)对于高比例可再生能源渗透的综合能源系统,随着其可再生能源消纳量的增加,在负荷一定的情况下,其所消耗的非可再生一次能源也会相应降低,从而使其能源综合利用率提高,即该指标可反映园区对于可再生能源的消纳水平。

综合以上分析,与传统指标不同,该指标考虑综合能源系统多能流特性及可再生能源接入的影响,综合反映了园区对非可再生一次能源的利用水平及对可再生能源的消纳率,可体现综合能源系统低碳、高效的核心特征,为综合能源园区规划、调度方案的确定与评估提供参考。

2 对能源综合利用率的讨论

2.1 能源综合利用率与其他能效指标的比较

现有能效评估指标依据其计算原理可分为 3 类:第 1 类指标依据热力学第一定律,以能量守恒关系进行计算,包括一次能源利用率、一次能源节约率及本文所提出的能源综合利用率;第 2 类指标依据热力学第二定律,以焓来描述不同能量的质量,主要为焓效率;第 3 类指标结合热力学第一定律与第二定律,将焓与熵结合,含 PURPA 效率等。以坐标图形式进行示意,评价指标机理架构如图 2 所示。

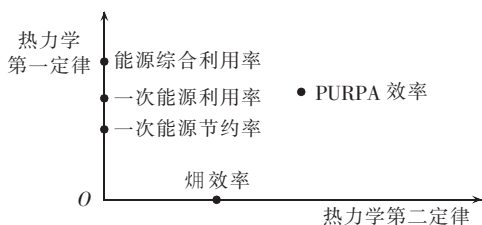


图 2 评价指标机理架构

Fig.2 Architecture of evaluation index mechanism

2.1.1 不同类别指标对比

基于热力学第一定律的各类指标着眼于能量守恒,从能量数量角度进行能效评估,其评估结果范围一般为 0~100%。而基于热力学第二定律的各类指标着眼于能量品质,从焓的角度评估能量传递与转换过程中质量的损失。燃料焓与电焓约等于其本身能量,而对热与冷,热量焓 E_{xQ} 和冷量焓 E_{xC} 的计算方法^[6]如下:

$$E_{xQ} = \left(1 - \frac{T_{e0}}{T_e}\right) Q_H \quad (7)$$

$$E_{xC} = \left(\frac{T_{e0}}{T_e} - 1\right) Q_C \quad (8)$$

其中, T_{e0} 、 T_e 分别为参考环境寂态温度与工质本身温

度; Q_H 、 Q_C 为工质中的热力学能。

焓描述了系统达到热力学寂态所能做出的最大有效功。结合式(7)、(8)可知,冷、热焓受参考的环境寂态温度影响极大,其焓值远小于电焓与燃料焓。由于冷、热的低焓值特点,一般 CCHP 的焓效率在 50% 以下。

结合以上分析,基于热力学第一定律与基于热力学第二定律的 2 类指标着眼点不同,因此不具备可比性。而考虑到焓效率评估侧重于做功能力,与园区冷、热的实际用途并不符合,且其受参考系影响较大,因此目前的能效评估中较多地采用了第 1 类指标。

2.1.2 基于热力学第一定律的指标对比

在各类能效指标中,应用最为广泛的是基于热力学定律的一次能源利用率、一次能源节约率等指标。本文提出的能源综合利用率也属于这一类指标。

一次能源节约率为相对性指标,其通过比较分供与 CCHP 一次能源耗量的差异以评估联供的能效。对于多能协同园区,由于其运行方式多样,可能仅以 CCHP 供能,也可能分别以燃气锅炉供热、电制冷机供冷,即其可能包含分供与联供等多种运行模式,因此该相对性指标无法适用。一次能源利用率为 CCHP 供能量与输入一次能源量的直接比值,未考虑园区综合能源系统的多能流特性。该指标可直接推广至园区能效评估,但其无法体现可再生能源接入产生的能效影响。

由式(1)~(6)知,能源综合利用率在考虑园区多能流特性的同时引入能源不可再生系数,可评估不同类型、不同运行方式下的园区综合能源系统。

2.2 能源综合利用率与经济性指标的比较

实际中园区运行常以经济性来评估,即评估园区在一定周期内的总运行成本,其计算表达如下:

$$C_{\text{total}} = C_{\text{Ele}} + C_{\text{LNG}} \quad (9)$$

$$C_{\text{LNG}} = r_{\text{LNG}} (V_{\text{GT}} + V_{\text{B}}) \quad (10)$$

$$V_{\text{GT}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_{\text{GT}}} (F_{\text{GT},i,t} / V_{\text{LH}}) \quad (11)$$

$$V_{\text{B}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_{\text{B}}} (F_{\text{B},i,t} / V_{\text{LH}}) \quad (12)$$

其中, C_{total} 、 C_{Ele} 、 C_{LNG} 分别为园区总运行成本、总外购电费用、总购气费用; r_{LNG} 为单位体积燃气价格; V_{GT} 、 V_{B} 分别为总燃气发电机耗气量和总燃气锅炉耗气量; N_{GT} 、 N_{B} 分别为燃气发电机、燃气锅炉的数目; V_{LH} 为单位燃气的低位热值。

将(1)~(6)与式(9)~(12)进行对比可发现,园区运行成本与其购电量、煤耗及气耗量正相关,而能源综合利用率则与其购入的不可再生电能、煤耗及气耗量负相关,因此低运行成本与高能源综合利用率具有一定的一致性。

3 算例分析

以上海某园区实际数据为例进行分析。该园区由商业区、工业区、住宅区 3 类负荷区域组成,各区域均有冷、热、电负荷需求。园区负荷由临近的 2 个能源站供给,每个能源站均配置 CCHP 装置、燃气锅炉与电制冷机,同时园区内建设有风机、光伏等可再生能源,能源站设备能流如图 3 所示。各设备模型参考文献[10],参数如表 1 所示。根据协议,该园区仅能向电网购电,其电能反送受阻。

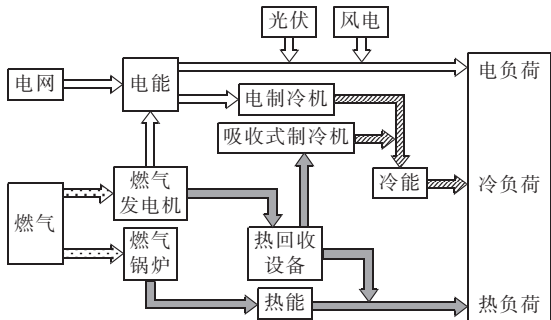


图 3 能源站设备能流图

Fig.3 Energy flows of devices in energy station

表 1 能源站主要设备参数与数值

Table 1 Parameters of main devices in energy station

设备名称	参数	数值	
		能源站 1	能源站 2
燃气发电机	额定功率 P_{GEN}/MW	2.1	1.1
	切机系数 φ_{cut}	0.3	0.25
	效率系数 a_p	0.406	0.349
	效率系数 b_p	-145.4	-488.3
	效率系数 c_h	0.556	0.406
	效率系数 d_h	-442.3	-462.4
热回收装置	额定功率 Q_{REN}/MW	2	1.1
	热回收效率 η_{REN}	0.85	0.82
吸收式制冷机	额定功率 C_{ACN}/MW	2.1	1.2
	制冷系数 COP_{AC}	1.3	1.25
燃气锅炉	额定功率 Q_{BN}/MW	2	0.9
	锅炉蒸汽效率 η_{BN}	0.916	0.882
电制冷机	额定功率 C_{ECN}/MW	3	1.3
	制冷系数 COP_{EC}	4.2	4.9

冷、热、电负荷参考该区域夏、冬季典型负荷数据,风电、光伏出力分别按照两季节预测值进行计算,具体数据分别如图 4、图 5 所示。该区域电网可再生电能渗透率取为 0.25。

夏季气温高,日照时间长、强度大,对冷负荷需求较大,热负荷相对较小。但工业及商业负荷的需求依然存在一定热负荷。

冬季气温低,日照时间、强度都较夏季低,热负荷需求大,冷负荷低。同时冬季光伏出力也比夏季低。

3.1 算例 1

由上文知,能源综合利用率与烟效率等其他类指标并无可比性,且一次能源节约率无法适用于多能

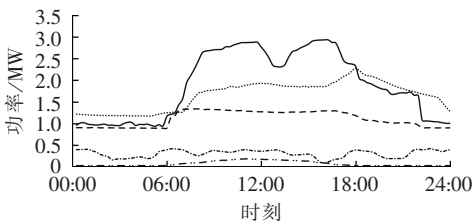


图 4 夏季冷热电负荷及风电、光伏预测值

Fig.4 Typical heat,cooling and power loads and predicted wind and solar power outputs for summer

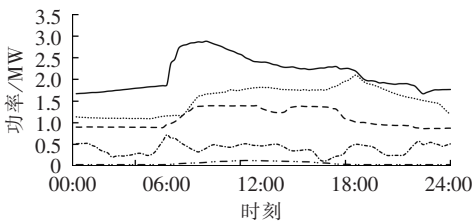


图 5 冬季冷热电负荷及风电、光伏预测值

Fig.5 Typical heat,cooling and power loads and predicted wind and solar power outputs for winter

协同园区。因此该算例将传统的一次能源利用率细化推广应用于多能协同园区,利用其比较分供与联供系统的能效差异,并与文中提出的一次综合利用率的评估结果进行比较。其中,分供模式是指园区按照传统的冷、热、电单独供应方式供能,即电能外购,燃气锅炉供热,电制冷机制冷;联供模式是多能耦合互补的供能方式,通过余热锅炉再利用燃气轮机产生的高品位废热,同时结合燃气锅炉等装置保证负荷的用能需求。为准确比较 2 类指标的差异,此时不考虑风电、光伏等新能源。

联供模式运行状态参考该园区当前“以热定电”模式运行数据,以 24 h 为评估周期,不同模式下的日能源综合利用率及一次能源利用率计算结果见表 2。

表 2 联供与分供模式能效对比

Table 2 Comparison of energy efficiency between joint supply and separate supply

季节	模式	一次能源利用率	能源综合利用率
夏季典型日	分供模式	1.2348	0.7175
	联供模式	0.7820	0.7550
冬季典型日	分供模式	1.1137	0.6679
	联供模式	0.7409	0.7246

由表 2 可知,在冬季与夏季典型日,一次能源利用率与本文提出的能源综合利用率对分供、联供系统的评估结果完全相反。其原因在于多能协同园区的能源输入除燃料外还包括电能等二次能源,若将这部分

能量按传统一次能源利用率的形式在分母简单求和,则该指标无法体现出联供模式运行下能量梯级利用的优势,得出分供能效高于联供的结果。

而能源综合利用率将输入园区的电能折算为发电侧对应的一次能源,以充分评估园区对一次能源的利用水平。其评估结果为联供能效高于分供,该结果反映了多能联合供应通过不同品位的能量梯级利用可以实现能量的充分利用,与实际相符。进而说明:相比于传统一次能源利用率的直接推广,本文提出的能源综合利用率指标能够反映联供与分供的差异,体现多能联供梯级利用的优势。

3.2 算例 2

为分析不同目标函数对调度策略的影响,结合上文中对该指标与经济关系分析,分别以日运行成本最低和能源综合利用率最高为目标函数对该园区在夏季典型日进行优化调度。约束条件包括设备出力约束、负荷平衡约束、爬坡约束^[11-12]等。

比较不同目标函数下的各时段外购电功率及 CCHP 出力,结果如图 6—8 所示。其中成本最低表示

以运行成本最低为目标函数,能效最高表示目标函数为能源综合利用率最大。

该园区夏季典型日全天的新能源消纳率、能源综合利用率及日运行成本如表 3 所示。

表 3 不同目标下园区运行指标对比			
Table 3 Comparison of park-level operating indexes between two objective functions			
目标	新能源消纳率/%	日能源综合利用率/%	园区日运行成本/元
成本最低	99.59	79.77	46 162
能效最高	99.64	83.40	47 620

由图 6—8 可知,以能源综合利用率最高为目标函数时,园区外购电功率近于 0,燃气锅炉出力也基本为 0,园区负荷通过 CCHP 供给。而以运行成本最低为目标时,在电价谷值段会大量外购电能,造成的热能缺额以燃气锅炉来补充;而在电价平端、峰值段两者优化调度的结果基本一致。

这一结果差异是由于在电价谷值段,从电网购电成本低于燃气发电机发电,因此以成本最优为目标会出现该时段电能的大量购入。但由于电网中可再生能源电能渗透率仅占 25%,且燃煤发电效率本身远低于 CCHP 机组,因此从节能角度会优先采用 CCHP 发电。在电价平端、峰值段两者结果一致则是该时段电价较高的结果。图 9 给出了不同谷值电价下分别以成本最低和能效最高为目标的外购电网电量。

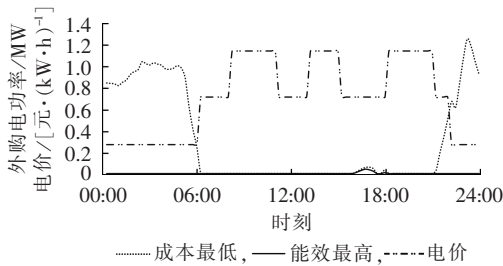


图 6 不同目标函数下外购电功率
Fig.6 Electric power purchase for different objective functions

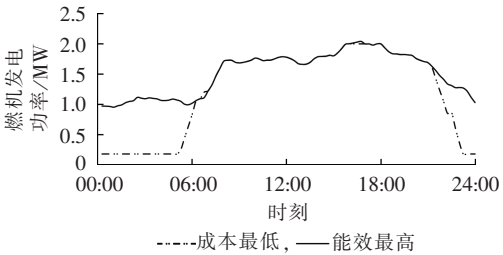


图 7 不同目标函数下燃气发电功率
Fig.7 Power generation of gas turbine for different objective functions

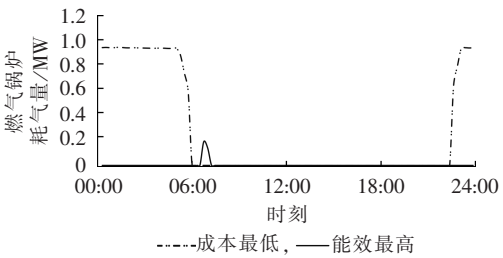


图 8 不同目标函数下燃气锅炉耗气量
Fig.8 Gas consumption of gas boiler for different objective functions

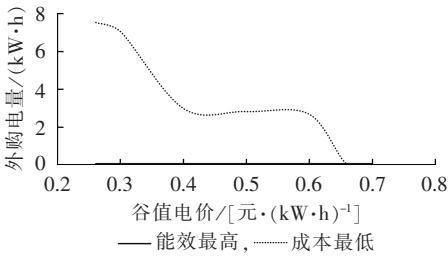


图 9 外购电量与谷值电价关系
Fig.9 Curve of electric power purchase vs. valley price

由图 9 可知,以能效最高为目标的调度结果不受谷值电价影响。而以成本最低为目标时,随谷值电价的提高,购入电网电量会逐渐减少。当谷值电价达到 0.66 元/(kW·h)以上后,能效最高与成本最低的外购电量达到一致。这主要是因为园区的能源综合利用率与电价无关,而当谷值电价逐渐提高,以成本最低为目标下园区会倾向于选择更为经济的 CCHP 发电,趋向于能效最高。由于在实际中常以成本最低为目标,这一结果说明了通过电网合理定价,成本最低与能效最高可以趋于一致,反映了合理定价的必要性。

为进一步分析两指标的关系,改变外购电中可再生能源的渗透率,比较不同情况下能效最优调度结果的差异,如图 10 所示。

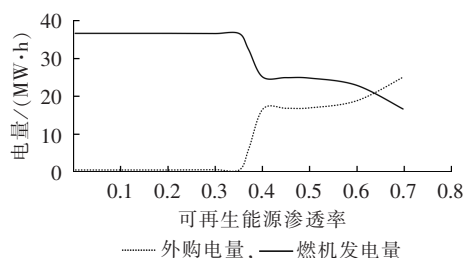


图 10 燃气发电量、外购电量与可再生能源渗透率关系

Fig.10 Curves of gas-turbine power generation and electric power purchase vs. renewable energy penetration rate

由图 10 可知,以能效最优为目标的优化调度结果与外购电能中可再生能源渗透率密切相关。当该渗透率达到 0.35 时,由于供应相同负荷 CCHP 所消耗的不可再生能源与购电基本一致,因此随着电网中可再生能源电能渗透率的进一步增大,相对于本地 CCHP 发电,电网中的电能更为清洁,因此园区会购入更多的电网电能,其更多的负荷将由可再生能源供应。

4 结论

a. 本文分析了传统能效评估方法存在的问题,考虑园区级综合能量系统多能流特点及可再生能源接入影响,提出了适用于多能协同园区能效评估的能源综合利用率指标。建立了能效评估指标体系,分析比较了所提指标与其他能效指标的区别与联系,讨论了其与经济性指标的一致性。

b. 本文结合上海某园区的实际数据进行了算例分析。算例 1 表明,相比于传统一次能源利用率的直接推广,所提指标能够更加准确地体现园区多能联供、能量梯级利用的优势,有效评估园区在不同运行模式下的能效;算例 2 表明,基于所提指标的优化调度与基于成本最低的调度策略在除电价谷值时段外具有一致性,且其一致性受电网中可再生能源渗透率影响。而通过适当调整谷值电价,成本最低与能源综合利用率最高的调度结果将趋于一致,反映了为促进可再生能源消纳,减少非可再生一次能源耗量,合理定价的必要性。

参考文献:

- [1] 孙宏斌,郭庆来,潘昭光. 能源互联网:理念、架构与前沿展望[J]. 电力系统自动化,2015,39(19):1-8.
SUN Hongbin, GUO Qinglai, PAN Zhaoguang, et al. Energy internet: concept, architecture and frontier outlook[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 1-8.
- [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] 孙宏斌,潘昭光,郭庆来. 多能流能量管理研究:挑战与展望[J]. 电力系统自动化,2016,40(15):1-8.
SUN Hongbin, PAN Zhaoguang, GUO Qinglai. Energy management for multi-energy flow: challenges and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 1-8.
- [4] 王伟亮,王丹,贾宏杰,等. 能源互联网背景下的典型区域综合能源系统稳态分析研究综述[J]. 中国电机工程学报,2016,36(12):3292-3305.
WANG Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Review of steady-state analysis of typical regional integrated energy system under the background of the energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3292-3305.
- [5] 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.
- [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(53): 28-38.
- [7] LI H, FU L, GENG K, et al. Energy utilization evaluation of CCHP systems[J]. Energy & Buildings, 2006, 38(3): 253-257.
- [8] EBRAHIMI M, KESHAVERZ 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.
- [9] 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.
- [10] SHEN X, HAN Y, ZHU S, et al. Comprehensive power-supply planning for active distribution system considering cooling, heating and power load balance[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2015, 3(4): 485-493.
- [11] QIAO Z, GUO Q, SUN H, et al. An interval gas flow analysis in natural gas and electricity coupled networks considering the uncertainty of wind power[J]. Applied Energy, 2016, 103: 322-327.
- [12] FU X, SUN H, GUO Q, et al. Probabilistic power flow analysis considering the dependence between power and heat[J]. Applied Energy, 2017, 191: 582-592.

作者简介:



薛屹涛

薛屹涛(1993—),男,陕西安康人,博士研究生,主要研究方向为综合能源系统(E-mail: xueyx16@mails.tsinghua.edu.cn);

郭庆来(1979—),男,吉林吉林人,副教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为无功电压控制、电动汽车入网技术(E-mail: guoqinglai@tsinghua.edu.cn);

孙宏斌(1969—),男,浙江天台人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为智能电网、可再生能源和电动汽车接入电网、电力系统运行与控制(E-mail: shb@tsinghua.edu.cn);

沈欣炜(1988—),男,福建龙岩人,博士后,主要研究方向为能源互联网规划与运行、主动配电网等(E-mail: shenxw@tsinghua.edu.cn)。

Comprehensive energy utilization rate for park-level integrated energy system

XUE Yixun¹,GUO Qinglai¹,SUN Hongbin¹,SHEN Xinwei²,TANG Lei³

(1. Department of Electrical Engineering,Tsinghua University,Beijing 100084,China;

2. Tsinghua-Berkeley Shenzhen Insititute,Shenzhen 518000,China;

3. Beijing Qingda Gaoke System Control Company,Beijing 102208,China)

Abstract: With the consideration of the multiple energy flows of integrated energy system and the impact of renewable energy integration,an index named comprehensive energy utilization rate is put forward for the park-level integrated energy system,which comprehensively evaluates the renewable energy accommodation rate and the non-renewable energy utilization level of the park to reflect the low-carbon high-efficiency features of integrated energy system. The differences between the proposed index and other energy-efficiency indicators are analyzed and the impacts of different targets on the dispatch strategy are discussed. The results of case study show that,compared with the direct promotion of traditional energy utilization rate,the proposed index reflects more accurately the park-level advantages in multi-energy supply and cascaded energy utilization. Furthermore,the difference of dispatch results between the lowest cost objective and the highest energy utilization rate objective can be diminished by the appropriate adjustment of electricity price,which shows the reasonable pricing is necessary for promoting the renewable energy accommodation and reducing the non-renewable energy consumption.

Key words: integrated energy system; park-level multi-energy cooperation; comprehensive energy utilization rate; energy efficiency evaluation; renewable energy resources