

可再生能源渗透率的热力学定义及其分析

张俊礼, 沈 炯, 李益国, 葛 斌

(能源热转换及其过程测控教育部重点实验室(东南大学), 南京 210096)

摘 要: 提出基于热力学第一定律和第二定律的可再生能源渗透率定义, 分析2种定义的异同和优劣, 并研究能量产品占比变化对渗透率的影响。结果表明, 系统产出单一能量产品时2种定义可等同, 产出多种能量产品时, 2种定义的等同需满足严格条件。当存在差异时第一定律定义得到的渗透率对冷热产量的变化更为敏感, 且随着热电量比 θ_1 的增大, 电量占比 β_e 增幅对渗透率的影响呈下降趋势, 而热量占比 β_h 增幅的影响则呈上升趋势, 两者相交于 $\beta_e / \beta_h = \theta_1$ 点。2种定义相差较小时, 可采用第一定律定义, 相差较大时, 宜采用第二定律定义。

关键词: 可再生能源; 热力学; 炯; 渗透率; 冷热电

中图分类号: TK01+1

文献标识码: A

0 引 言

可再生能源具有节能、环保等突出优点, 是解决“能源紧缺、环境污染和气候变暖”三重难题的最佳途径之一^[1,2], 得到世界各国的高度重视和大力发展。数据统计表明^[3], 截至2016年底可再生能源已稳居全球电力生产的第2大来源, 占比达24.5%。我国的可再生能源同样增长迅速, 到2017年底, 全国可再生能源发电装机容量6.5亿kW, 发电量占全部发电量的比重达26.5%^[4]。随着可再生能源的广泛应用, 大到国家电网, 小到楼宇型微网, 均可看到可再生能源的身影。如何评价可再生能源在能源系统中的贡献已成为业内关注的课题^[5-8]。

渗透率是可再生能源在能源系统中渗透程度的衡量, 它的高低不仅可表征系统的节能能力和环保性能, 而且与系统的经济性密切相关^[9,10], 是评价可再生能源贡献的重要参数。但目前对该参数的定义仍较为模糊, 如将其定义为: 1) 装机容量占比^[11]; 2) 可再生能源发电装机容量占最大负荷的比例^[12,13]; 3) 可再生能源发电量占最大负荷的比例^[14]; 4) 可再生能源发电量占总发电量的比例^[15,16]等。渗透率定义的参差不一不仅给相关研究造成困扰, 也给政策法规的制定带来不利影响。而且, 能量输入端的多能互补和能量输出端的多负荷联供已成为当前能源

系统的主要发展态势^[17,18], 现有的仅基于电产品而忽略冷、热产品影响的渗透率定义已难以体现综合能源系统中可再生能源的真正贡献程度。为此, 本文开展以下工作: 1) 计入冷、热产品, 提出基于热力学第一定律和第二定律的渗透率定义; 2) 分析上述2种定义下的异同和各能量产品占比变化对渗透率的影响; 3) 讨论2种定义的优劣。

1 渗透率的热力学定义

能源的开发和利用历经开采、运输储存、转化、传输分配、消费等多个环节, 理论上任一环节的可再生能源渗透率均可独立定义和测算。由于能源开发利用的最终目的是满足终端用户的各类能量需求, 故以终端用户实际获得的能量来定义可再生能源渗透率更能表征可再生能源在其中的贡献, 即:

$$\lambda_{\text{end}} = \frac{\sum_{i=1}^N R_{\text{end},i}}{\sum_{i=1}^N R_{\text{end},i} + \sum_{i=1}^N U_{\text{end},i}} \quad (1)$$

式中, λ_{end} ——可再生能源终端渗透率; R_{end} ——终端用户获得的来自于可再生能源的能量, kW; U_{end} ——终端用户获得的来自于不可再生能源的能量, kW; N ——能量形式, 本文中仅考虑与人们日常生活密切相关的电、热、冷3种能量形式, 即

收稿日期: 2016-10-14

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(2242016R20006)

通信作者: 张俊礼(1979—), 男, 博士、讲师, 主要从事热力系统建模、控制和优化方面的研究。zjl_seu@seu.edu.cn

$N=3$; i ——第 i 种能量形式。

式(1)中终端用户获得的能量是可再生能源和不可再生能源混合后的形式, 不便于直接测算。终端用户所需的能量由各类能源经能量转化装置转化后, 通过电网、热网等能量网络传输分配而来。考虑到能量传输分配过程中不可避免存在能量损耗, 设 σ 表示能量损耗率, 将式(1)改写为:

$$\lambda_{\text{end}} = \frac{\sum_{i=1}^3 R_{\text{pro},i}(1-\sigma_{R,i})}{\sum_{i=1}^3 R_{\text{pro},i}(1-\sigma_{R,i}) + \sum_{i=1}^3 U_{\text{pro},i}(1-\sigma_{U,i})} \quad (2)$$

式中, R_{pro} ——可再生能源经能量转化装置后的产能量, kW; U_{pro} ——不可再生能源经能量转化装置后的产能量, kW; $\sigma_{R,i}$ ——可再生能源在第 i 种能量网络的损耗率; $\sigma_{U,i}$ ——不可再生能源在第 i 种能量网络的损耗率。

可再生能源和不可再生能源在能量转化完成后往往采用同一热网、冷网或电网传输, 即 $\sigma_{R,i} = \sigma_{U,i}$, 且传输网络中的能量损耗要远小于能量传输总量, 即 $\sigma \ll 1$ 。因此, σ 对 λ_{end} 的影响可忽略, 即:

$$\lambda_{\text{end}} = \frac{\sum_{i=1}^3 R_{\text{pro},i}}{\sum_{i=1}^3 R_{\text{pro},i} + \sum_{i=1}^3 U_{\text{pro},i}} \quad (3)$$

根据式(3), 基于热力学第一定律和第二定律可分别得到可再生能源渗透率定义为:

$$\lambda_1 = \frac{ER_e + ER_h + ER_c}{(ER_e + EU_e) + (ER_h + EU_h) + (ER_c + EU_c)} \quad (4)$$

$$\lambda_2 = \frac{XR_e + XR_h + XR_c}{(XR_e + XU_e) + (XR_h + XU_h) + (XR_c + XU_c)} \quad (5)$$

式中, λ_1 ——第一定律定义下的渗透率; λ_2 ——第二定律定义下的渗透率; ER ——可再生能源产能量, kW; XR ——可再生能源产焓量, kW; EU ——不可再生能源产能量, kW; XU ——不可再生能源产焓量, kW; 下标: e 表示电能形式; h 表示热能形式; c 表示冷能形式。

作为比较, 给出基于装机容量的可再生能源渗透率定义:

$$\lambda_0 = \frac{CR_e + CR_h + CR_c}{(CR_e + CU_e) + (CR_h + CU_h) + (CR_c + CU_c)} \quad (6)$$

式中, λ_0 ——装机容量定义下的渗透率; CR ——可再生能源的总装机容量, kW; CU ——不可再生能源的总装机容量, kW。

与电产品较为单一的能量品质不同, 热产品和

冷产品需根据热、冷用户的要求提供相应品质的热和冷参数, 且其参数规格可能不唯一, 如热产品中存在供暖水和生活热水同时供应的情况。为此, 设系统产出热水流量为 D_j (kg/s), 下标 j 表示热产品规格, 其产水温度和回水温度分别为 T_{j1} 和 T_{j2} (K), 产水熵和回水熵分别为 s_{j1} 和 s_{j2} (kJ/(kg·K)), 由可再生能源产出的热水流量占比为 β_j ; 系统产出的冷水流量为 D_k (kg/s), 下标 k 表示冷产品规格, 其产出温度和回水温度分别为 T_{k1} 和 T_{k2} (K), 其产水熵和回水熵分别为 s_{k1} 和 s_{k2} (kJ/(kg·K)), 其中可再生能源产出的流量占比为 β_k 。忽略产出和回水之间的比热差异, 设热水和冷水的比定压热容分别为 c_{pj} 和 c_{pk} (如果热产品为蒸汽, 可在此基础上考虑汽化潜热的影响), kJ/(kg·K), 则有:

$$\begin{cases} ER_h = \sum_{j=1}^M D_j \beta_j c_{pj} (T_{j1} - T_{j2}) \\ EU_h = \sum_{j=1}^M D_j (1 - \beta_j) c_{pj} (T_{j1} - T_{j2}) \\ ER_c = \sum_{k=M+1}^L D_k \beta_k c_{pk} (T_{k2} - T_{k1}) \\ EU_c = \sum_{k=M+1}^L D_k (1 - \beta_k) c_{pk} (T_{k2} - T_{k1}) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} XR_h = \sum_{j=1}^M D_j \beta_j [c_{pj} (T_{j1} - T_{j2}) - T_a (s_{j1} - s_{j2})] \\ XU_h = \sum_{j=1}^M D_j (1 - \beta_j) [c_{pj} (T_{j1} - T_{j2}) - T_a (s_{j1} - s_{j2})] \\ XR_c = \sum_{k=M+1}^L D_k \beta_k [c_{pk} (T_{k2} - T_{k1}) - T_a (s_{k2} - s_{k1})] \\ XU_c = \sum_{k=M+1}^L D_k (1 - \beta_k) [c_{pk} (T_{k2} - T_{k1}) - T_a (s_{k2} - s_{k1})] \end{cases} \quad (8)$$

式中, M ——热产品规格数; L ——热产品和冷产品的总规格数; T_a ——环境温度, K。

将式(7)代入式(4), 将式(8)代入式(5), 并令 r 为第 r 种产品规格, 当 $1 \leq r \leq M$ 时为热产品, 当 $M < r \leq L$ 时为冷产品, 得:

$$\lambda_1 = \frac{ER_e + \sum_{r=1}^M D_r \beta_r c_{pr} (T_{r1} - T_{r2}) + \sum_{r=M+1}^L D_r \beta_r c_{pr} (T_{r2} - T_{r1})}{(ER_e + EU_e) + \sum_{r=1}^M D_r c_{pr} (T_{r1} - T_{r2}) + \sum_{r=M+1}^L D_r c_{pr} (T_{r2} - T_{r1})} \quad (9)$$

$$\lambda_2 = \frac{XR_e + \sum_{r=1}^M D_r \beta_r [c_{pr} (T_{r1} - T_{r2}) - T_a (s_{r1} - s_{r2})]}{(XR_e + XU_e) + \sum_{r=1}^M D_r [c_{pr} (T_{r1} - T_{r2}) - T_a (s_{r1} - s_{r2})]} \quad (10)$$

式(9)和式(10)分别为第一定律和第二定律定

义下冷热电综合渗透率的计算表达式。

2 定性分析

根据式(9)和式(10)可定性分析 2 种定义下的异同以及各能量产品占比变化对渗透率的影响。

2.1 2 种定义的异同

首先分析只含一类能量产品的情况,当只存在电产品时,由于电能均为可用能,即 $ER_e = XR_e$, $EU_e = XU_e$, 因此令 $\beta_e = \frac{ER_e}{ER_e + EU_e}$, 表示可再生能源电占比,由式(9)和式(10)可得:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \beta_e \quad (11)$$

这意味着仅有电产品的情况下,热力学第一定律定义和第二定律定义是等同的。同理,当仅含单一规格的热产品或冷产品时有:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \beta_h \quad (12)$$

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \beta_c \quad (13)$$

式中, β_h ——可再生能源热占比, $\beta_h = \frac{ER_h}{ER_h + EU_h}$;

β_c ——可再生能源冷占比, $\beta_c = \frac{ER_c}{ER_c + EU_c}$ 。

当系统产出中包含电、热、冷中的任意 2 类以上产品时,渗透率的热力学第一和第二定律定义的等同需满足一定条件,以电、热产品为例,式(9)和式(10)可写为:

$$\lambda_1 = \frac{Q_e \beta_e + D_h \beta_h c_{ph} (T_{h1} - T_{h2})}{Q_e + D_h c_{ph} (T_{h1} - T_{h2})} \quad (14)$$

$$\lambda_2 = \frac{Q_e \beta_e + D_h \beta_h [c_{ph} (T_{h1} - T_{h2}) - T_a (s_{h1} - s_{h2})]}{Q_e + D_h [c_{ph} (T_{h1} - T_{h2}) - T_a (s_{h1} - s_{h2})]} \quad (15)$$

式中, $Q_e = ER_e + EU_e = XR_e + XU_e$, 表示产电总量(烟)。

分析式(14)和式(15),推导后可得:

$$\begin{cases} Q_e D_h T_a (s_{h1} - s_{h2}) (\beta_h - \beta_e) < 0 \Rightarrow \lambda_1 < \lambda_2 \\ Q_e D_h T_a (s_{h1} - s_{h2}) (\beta_h - \beta_e) = 0 \Rightarrow \lambda_1 = \lambda_2 \\ Q_e D_h T_a (s_{h1} - s_{h2}) (\beta_h - \beta_e) > 0 \Rightarrow \lambda_1 > \lambda_2 \end{cases} \quad (16)$$

式中,符号“ \Rightarrow ”表示蕴含。

由式(16)可知,当热电产品的产量不为 0 时 ($Q_e > 0$, $D_h > 0$),在非等熵条件下,只有 $\beta_e = \beta_h$, $\lambda_1 = \lambda_2$ 才成立。由此,可类推得到如下结论:对于不可逆系统,当各类能量产品的可再生能源产出占比均相同时,渗透率的热力学第一和第二定律定义可认为是等同的。

进一步,对于供暖、生活热水一类的热产品,由于其产水和回水压力变化较小,可近似认为是等压变化,根据等压线上温熵变化的同向性可得 $s_{h1} - s_{h2} > 0$, 则有:

$$\begin{cases} \beta_e > \beta_h \Rightarrow \lambda_1 < \lambda_2 \\ \beta_e = \beta_h \Rightarrow \lambda_1 = \lambda_2 \\ \beta_e < \beta_h \Rightarrow \lambda_1 > \lambda_2 \end{cases} \quad (17)$$

由此可见,对于仅含电、热 2 种能量产品的能源系统, λ_1 是否大于 λ_2 主要取决于可再生能源热占比是否优于其电占比。

必须注意到,上述分析的前提是热产品的规格只有 1 种,当其规格不只 1 种时,上述结果可能不成立。以仅含热产品为例,假设系统产出 2 种规格的热产品,将式(9)和式(10)写为:

$$\lambda_1 = \frac{\sum_{r=1}^2 D_r \beta_r c_{pr} (T_{r1} - T_{r2})}{\sum_{r=1}^2 D_r c_{pr} (T_{r1} - T_{r2})} \quad (18)$$

$$\lambda_2 = \frac{\sum_{r=1}^2 D_r \beta_r [c_{pr} (T_{r2} - T_{r2}) - T_a (s_{r1} - s_{r2})]}{\sum_{r=1}^2 D_r [c_{pr} (T_{r2} - T_{r2}) - T_a (s_{r1} - s_{r2})]} \quad (19)$$

通过推导可获得如下关系式:

$$\begin{cases} (\beta_1 - \beta_2)(\varphi - \delta) > 0 \Rightarrow \lambda_1 > \lambda_2 \\ (\beta_1 - \beta_2)(\varphi - \delta) = 0 \Rightarrow \lambda_1 = \lambda_2 \\ (\beta_1 - \beta_2)(\varphi - \delta) < 0 \Rightarrow \lambda_1 < \lambda_2 \end{cases} \quad (20)$$

式中, φ ——2 种规格热产品之间的热量比,

$\varphi = \frac{D_2 c_{p2} (T_{22} - T_{22})}{D_1 c_{p1} (T_{12} - T_{12})}$; δ ——2 种规格热产品之间的熵

增比, $\delta = \frac{D_2 (s_{21} - s_{22})}{D_1 (s_{11} - s_{12})}$ 。

由式(20)可看出,只有满足 $(\beta_1 - \beta_2)(\varphi - \delta) = 0$ 时,即 $\beta_1 = \beta_2$ 或 $\varphi = \delta$ 时,渗透率的热力学第一和第二定律定义才可能等同。

2.2 能量产品占比变化对渗透率的影响

当系统的产电量不为零时,设

$\theta_1 = \frac{D_h c_{ph} (T_{h1} - T_{h2})}{Q_e}$ 表示系统的热电能量比,

$\theta_2 = \frac{D_h [c_{ph} (T_{h1} - T_{h2}) - T_a (s_{h1} - s_{h2})]}{Q_e}$ 表示系统的热电烟

量比,式(18)和式(19)可写为:

$$\lambda_1 = \frac{1}{1 + \theta_1} \beta_e + \frac{\theta_1}{1 + \theta_1} \beta_h \quad (21)$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{1 + \theta_2} \beta_e + \frac{\theta_2}{1 + \theta_2} \beta_h \quad (22)$$

当系统总产出能量参数确定时,对式(21)和式(22)进行相对增量化得:

$$\Phi_{\lambda_1} = k_{1\beta_e} \Phi_{\beta_e} + k_{1\beta_h} \Phi_{\beta_h} \quad (23)$$

$$\Phi_{\lambda_2} = k_{2\beta_e} \Phi_{\beta_e} + k_{2\beta_h} \Phi_{\beta_h} \quad (24)$$

式中, Φ ——相对增量符号,如 $\Phi_{\lambda_1} = \frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_{10}}$; $k_{1\beta_e}$ 、 $k_{1\beta_h}$ ——可再生能源电和热占比增幅对第一定律定义下的渗透率增幅的影响系数, $k_{1\beta_e} = \frac{\beta_{e0}}{\beta_{e0} + \theta_1 \beta_{h0}}$,

$k_{1\beta_h} = \frac{\theta_1 \beta_{h0}}{\beta_{e0} + \theta_1 \beta_{h0}}$; $k_{2\beta_e}$ 、 $k_{2\beta_h}$ ——可再生能源电和热占比增幅对第二定律定义下的渗透率增幅的影响系数;下标 0 代表变化前的状态,

$$k_{2\beta_e} = \frac{\beta_{e0}}{\beta_{e0} + \theta_2 \beta_{h0}}, k_{2\beta_h} = \frac{\theta_2 \beta_{h0}}{\beta_{e0} + \theta_2 \beta_{h0}}。$$

根据式(23)和式(24)可知:

1) 当 $\frac{\beta_{e0}}{\beta_{h0}} > \theta_1$ (或 $\frac{\beta_{e0}}{\beta_{h0}} > \theta_2$) 时,可再生能源产电(或电焓)量占比增幅对渗透率增幅的影响更大;

2) 当 $\frac{\beta_{e0}}{\beta_{h0}} = \theta_1$ (或 $\frac{\beta_{e0}}{\beta_{h0}} = \theta_2$) 时,可再生能源产电(或电焓)量和产热(或热焓)量的占比增幅对渗透率增幅的影响均等;

3) 当 $\frac{\beta_{e0}}{\beta_{h0}} < \theta_1$ (或 $\frac{\beta_{e0}}{\beta_{h0}} < \theta_2$) 时,可再生能源产热(或热焓)量占比增幅对渗透率增幅的影响更大。

另外,在一定的系统热电参数下有 $\theta_2 < \theta_1$, 因此有 $k_{1\beta_e} < k_{2\beta_e}$, $k_{1\beta_h} > k_{2\beta_h}$, 即 2 种定义下的电占比增幅对渗透率增幅的影响中,第一定律定义要小于第二定律定义,而在热占比增幅对渗透率增幅的影响中,第一定律定义要大于第二定律定义。图 1 所示为不同 θ_1 和 θ_2 下,可再生能源电(热)占比增幅对渗透率增幅的影响。从图 1 中可看出,随着 θ_1 (或 θ_2)

的增大,电占比增幅对渗透率的影响呈下降趋势,而热占比增幅的影响则呈上升趋势,两者相交于 $\beta_{e0}/\beta_{h0} = \theta_1$ (或 $\beta_{e0}/\beta_{h0} = \theta_2$) 点。而且,对于每一个 θ_1 值(从左到右每一个圈或叉对应的横坐标值),其对应的 θ_2 值均小于 θ_1 值(除了初始 0 点),在每一组 θ_1 和 θ_2 比较中,前者的电占比影响系数均小于后者的电占比影响系数,而热占比影响系数则相反。

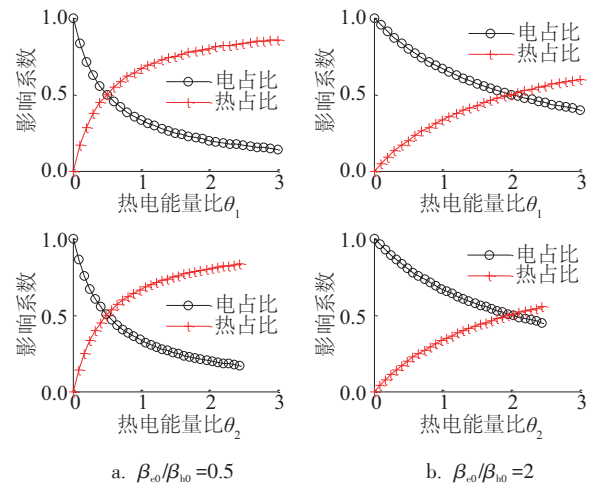


图 1 电(热)占比增幅对渗透率增幅的影响

Fig. 1 Effect of increase of electricity (heat) proportion on increase of penetration rate

3 算例分析

某小区采用太阳能和天然气集成的方案满足小区内的冷热电负荷需求,其冷热电用户相关参数如表 1 所示,全年分为夏季、冬季和过渡季,其中夏季供冷,冬季供暖,全年均有用电和生活热水需求。太阳能和天然气装置的装机容量和全年实际产量如表 2 所示。根据前述各定义,可计算得到渗透率如表 3 所示。

表 1 冷、热、电用户相关参数

Table 1 Related parameters of cold, heat & power user

参数	冷	热		电
		供暖	生活热水	
额定负荷需求/kW	2116	1518	856	1100
输出温度/°C	7	65	80	—
输出压力/MPa	0.8	0.3	0.3	—
回水温度/°C	12	55	60	—
回水压力/MPa	0.75	0.25	0.25	—
流量/kg·s ⁻¹	101.1	36.3	10.2	—
环境温度/°C	32	-1	-1/15/32	—

表2 太阳能和天然气装置相关参数
Table 2 Related parameters of solar and gas units

方案	负荷类型	太阳能装置			天然气装置			年负荷总需求	
		额定功率/kW	年实际产能/MWh	年实际产烟/MWh	额定功率/kW	年实际产能/MWh	年实际产烟/MWh	能量/MWh	烟量/MWh
A	冷	750	362.1	29.8	1590	2594.9	213.6	2957.0	243.4
	供暖	600	132.9	24.5	1137	1855.6	341.9	1988.5	366.4
	生活热水	200	134.7	27.9	316	1031.4	213.8	1166.2	241.7
	电	300	358.7	358.7	800	2611.2	2611.2	2969.9	2969.9
B	冷	1500	724.2	59.6	1590	2232.8	183.8	2957.0	243.4
	供暖	1200	265.8	49.0	1137	1722.7	317.4	1988.5	366.4
	生活热水	200	134.7	27.9	316	1031.4	213.8	1166.2	241.7
	电	300	358.7	358.7	800	2611.2	2611.2	2969.9	2969.9

表3 各定义下的渗透率值 Table 3 Penetration rate values under various definitions					
方案	负荷类型	符号	按装机容量	按实际产量	
				第一定律	第二定律
A	冷	β_c	0.321	0.122	0.122
		β_{hi}	0.345	0.067	0.067
	热	β_{h2}	0.388	0.116	0.116
		β_h	0.355	0.085	0.086
	电	β_e	0.273	0.121	0.121
	综合	λ	0.325	0.109	0.115
B	冷	β_c	0.485	0.245	0.245
		β_{hi}	0.513	0.134	0.134
	热	β_{h2}	0.388	0.116	0.116
		β_h	0.491	0.127	0.126
	电	β_e	0.273	0.121	0.121
	综合	λ	0.454	0.163	0.130

由表3可得到以下几点:

1) λ_0 远高于 λ_1 和 λ_2 , 表明采用装机容量定义评价易高估可再生能源的实际贡献, 尤其是采用间歇性可再生能源如风能、太阳能等的情况下, 由于装置的实际运行时间和负荷率受地理、气候等环境因素影响较大, 在同等装机容量下, 其实际产量往往远低于具有稳定持续特征的不可再生能源装置;

2) 单一规格的冷热电产品各自对应的可再生能源占比与采用哪一定律的定义无关, 如方案1中

冷量 β_{c1} 和 β_{c2} 均为 0.122, 多种规格的情况下, 其综合渗透率在第一定律和第二定律定义下存在差别, 如本例中的热产品, 方案A中 β_h 分别为 0.085 和 0.086, 方案B中的 β_h 则为 0.127 和 0.126; 而且, 第一定律定义下的 β_h 在方案A中小于第二定律定义下的 β_h , 而在方案B中则大于第二定律定义下的 β_h , 其变化符合式(20)所示的关系;

3) 第一定律和第二定律定义下的冷热电综合渗透率 λ_1 和 λ_2 存在差异; 当其冷热产品的实际产量较小时, λ_1 和 λ_2 的相差不大, 随着冷热产品实际产量的增加, λ_1 和 λ_2 的差别也随之增大; 并且, 在保证可再生能源电产品占比 β_e 不变的情况下, 冷热产品占比 β_h 和 β_c 增加导致的 λ_1 增幅(约为 50%) 明显大于 λ_2 增幅(约为 12.3%), 表明第一定律定义下的渗透率对冷热产量的变化更为敏感。

4 讨 论

从上述分析可知, 基于热力学第一定律和第二定律定义的渗透率的等同需要满足较为严格的条件, 如需满足仅产出单一能量产品或各能量产品的可再生能源占比相同的条件等。那么, 两者存在差异时, 应采用哪一种? 可分以下2种情况: 1) 2种定义下的渗透率差异较小时, 如方案A所示, 两者相差仅为 6%, 此时, 由于第一定律定义计算更为简便, 也更易于理解, 有利于具体实施和推广应用, 因此可采用第一定律定义; 2) 而当2种定义下的渗透

率差异较大时,如方案 B 所示,两者相差达 20%以上,此时应选择哪种定义值得商榷。

首先,渗透率定义应有利于正确评价可再生能源对终端用户的贡献。以前述算例为例,装机容量定义下,如可再生能源装置不运行,可再生能源对终端用户的实际贡献应为零,但其渗透率却分别达到 0.325 和 0.446,与可再生能源对终端用户的实际贡献严重不符。与装机容量定义不同,第一定律和第二定律从终端用户实际获得的能量和焓量角度对可再生能源的实际贡献进行了度量,前者突出了可再生能源对低品位能量的贡献,后者则突出了可再生能源对高品味能量的贡献。

其次,渗透率定义应有利于可再生能源的高效利用。从前述分析可看出,相对于第二定律定义,基于第一定律定义得到的渗透率,对冷热产品能量的变化较为敏感,其原因在于第一定律定义对电、热、冷等各类能量产品品位上的无差别对待。在此定义下,投资运营方为了应付综合能源项目中渗透率的最低限制要求,往往会通过提高可再生能源用于生产热、冷等低品位的能量产品的比例来提升渗透率,不利于引导可再生能源的高品质和高效利用。从另一个角度而言,在第一定律定义下,不可再生能源的实际占比将可能得以大幅上升,变相地削弱了渗透率的限制作用,对系统整体的节能环保性能产生不利影响。第二定律定义则可避免这类情况的发生,有利于引导可再生能源在电、热、冷产品生产中的合理分配,更大程度地提升系统的整体节能环保性。

最后,渗透率定义应有利于促进可再生能源的可持续发展。可再生能源的“可再生”是有一定条件的,除了受地理环境约束外,过度利用可再生能源会导致“可再生”难以再生,如地热资源的过度使用会导致地面沉降,使得地热资源难以为继。第一定律定义下,可再生能源的数量优势被突出显示,在此标准下,可再生能源更易于开发和过度被用于提供低品位能量,变相地造成浪费。比起一味追求数量上的高渗透率,质量层面的高渗透率对可再生能源的利用提出了较高要求,抑制可再生能源的不当开发,有助于可再生能源的保护和可持续发展。

5 结 论

可再生能源渗透率是评价可再生能源利用成效的重要参数,针对目前该参数定义模糊的问题,本文基于热力学第一定律和第二定律对其进行阐述,分析 2 种定义下的异同和优劣,并研究各能量产品占比变化对渗透率的影响,结果如下:

1) 装机容量定义下的渗透率往往远高于实际产量定义下的渗透率,不适宜衡量可再生能源对终端用户用能的贡献程度;

2) 负荷类型单一且其参数规格单一时,第一定律和第二定律定义可认为是等价的;

3) 多种负荷类型或多种参数规格下,第一定律定义与第二定律定义的等同需满足严格条件,当 2 种定义存在差异时,第一定律定义下的渗透率对冷热产量的变化更为敏感;

4) 随着热电能量比 θ_1 的增大,电量占比 β_e 增幅对渗透率 λ_1 的影响呈下降趋势,而热(冷)量占比 β_h (β_c) 增幅的影响则呈上升趋势,两者相交于 $\beta_e/\beta_h = \theta_1$ 点,此规律同样适用于第二定律定义。

5) 第一定律和第二定律定义下的渗透率相差较小时,可采用第一定律定义,两者相差较大时,宜采用第二定律定义。

[参考文献]

- [1] Erdinc O, Uzunoglu M. Optimum design of hybrid renewable energy systems: Overview of different approaches[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16: 1412—1425.
- [2] Kuang Yonghong, Zhang Yongjun, Zhou Bin, et al. A review of renewable energy utilization in islands[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 59: 504—513.
- [3] REN21. Renewables 2017 Global Status Report[R]. 2017.
- [4] 国家能源局. 2017 年度全国可再生能源电力发展监测评价报告[R]. 2018.
- [4] National Energy Administration. National monitoring report on renewable power development in 2017[R]. 2018.
- [5] Luderer G, Krey V, Calvin K, et al. The role of renewable energy in climate stabilization: results from

- the EMF27 scenarios[J]. *Climatic Change*, 2014, 123: 427—441.
- [6] Hong Lixuan, Zhou Nan, Fridley D, et al. Assessment of China's renewable energy contribution during the 12th Five Year Plan[J]. *Energy Policy*, 2013, 62: 1533—1543.
- [7] 孙盛鹏, 刘凤良, 薛 松. 需求侧资源促进可再生能源消纳贡献度综合评价体系[J]. *电力系统自动化设备*, 2015, 35(4): 77—83.
- [7] Sun Shengpeng, Liu Fengliang, Xue Song. Comprehensive evaluation system for contribution degree of demand-side resource to renewable energy source integration[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2015, 35(4): 77—83.
- [8] Edenhofer O, Hirth L, Knopf B, et al. On the economics of renewable energy sources[J]. *Energy Economics*, 2013, 40(Sup 1): s12—s23.
- [9] Nasrolahpour E, Ghasemi H. A stochastic security constrained unit commitment model for reconfigurable networks with high wind power penetration[J]. *Electric Power Systems Research*, 2015, 121: 341—350.
- [10] Cochran J, Mai T, Bazilian M. Meta-analysis of high penetration renewable energy scenarios[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 29(7): 246—253.
- [11] Arnette A N. Integrating rooftop solar into a multi-source energy planning optimization model[J]. *Applied energy*, 2013, 111: 456—467.
- [12] 中华人民共和国科学技术部. “智能电网技术与装备”重点专项 2016 年度项目申报指南[EB/OL]. http://www.most.gov.cn/mostinfo/xinxifenlei/fgz/gfxwj/gfxwj2016/201602/t20160218_124155.htm, 2016-02-18.
- [12] Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China. 2016 annual project application guide for Smart grid technology and equipment key project[EB/OL]. http://www.most.gov.cn/mostinfo/xinxifenlei/fgz/gfxwj/gfxwj2016/201602/t20160218_124155.htm, 2016-02-18.
- [13] Ibrahim H, Younès R, Basbous T, et al. Optimization of diesel engine performances for a hybrid wind-diesel system with compressed air storage[J]. *Energy*, 2011, 36(5): 3079—3091.
- [14] Bayem H, Capely L, Dufourd F, et al. Probabilistic study of the maximum penetration rate of renewable energy in an island network[A]. 2009 IEEE Bucharest Power tech Conference[C], Bucharest, Romania, 2009.
- [15] Moein M A, Ali A, Mahmud F F. Incorporating large-scale distant wind farms in probabilistic transmission expansion planning—Part I: Theory and algorithm[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, 27(3): 1585—1593.
- [16] Bittencout L, Schetinger A M, Borba B S M C, et al. Impact of photovoltaic integration on voltage variation of Brazilian secondary network distribution system[A]. 4th International Conference on Renewable Energy Research and Applications[C], Palermo, Italy, 2015.
- [17] Mancarella P. MES (multi-energy systems): An overview of concepts and evaluation models[J]. *Energy*, 2014, 65: 1—17.
- [18] Chicco G, Mancarella P. Distributed multi-generation: A comprehensive view[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(3): 535—551.

THERMODYNAMIC DEFINITION OF PENETRATION RATE OF RENEWABLE ENERGY AND ITS ANALYSIS

Zhang Junli, Shen Jiong, Li Yiguo, Ge Bin

(Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The paper presents the definition of renewable energy penetration rate based on the first and second law of thermodynamics. The differences and similarities between the two definitions are analyzed as well as the advantages and disadvantages of the two definitions are discussed. The effect of the change of energy product proportion is also studied. The results show that the definition based on the first law and the second law is same when the system outputs a single energy production. However, the equivalent of the two definitions must satisfy strict conditions as the system outputs a variety of energy productions. While some differences occurred, the penetration rate based on the first law is more sensitive to the change of heat and cold production. Furthermore, the effect of the increase rate of electricity proportion β_e on penetration rate is declined with the increase of the heat-to-electric ratio θ_1 , and the effect of the increase rate of heat proportion β_h on penetration rate is the opposite. The two effects are intersected on the point of $\beta_e / \beta_h = \theta_1$. If some small differences between the two definitions occurred, the definition of the first law can be adopted. When the differences are large, it is better to use the second law definition.

Keywords: renewable energy resource; thermodynamics; exergy; penetration rate; cold and hot electricity