

电网企业参与的分布式能源运营模式及发展空间研究

廖志伟^{1†}, 王妍¹, 王路²

(1. 华南理工大学 电力学院 广东省绿色能源技术重点实验室, 广东 广州 510640;

2. 广东省电力设计研究院, 广东 广州 510663)

摘要: 运营模式及效益限制分布式能源(distributed energy, DE)项目的良性发展, 清洁能源的发展和电力系统改革推动电网公司的角色转型. 本文首先对DE市场投资角色进行重组, 量化电网企业参与度, 以及DE的潜在价值和社会效益, 然后针对楼宇型和区域型分布式能源站(distributed energy stations, DES)设计发电模型, 通过能量流(冷、热、电)验证联供机组的高效性, 最终建立DE能效分享及节能发展空间模型. 重点分析输配电改革前后, 电网企业不同投资力度对楼宇型和区域型DE项目全生命周期内的节能效益影响, 预测电网企业参与的未来发展空间. 两类典型DE项目案例分析验证了模型的有效性.

关键词: 分布式能源; 运营模式; 电网企业; 节能发展空间

中图分类号: TM71 **文献标识码:** A

Research on business model and development capability of distributed energy with power grid enterprise's participation

LIAO Zhi-wei^{1†}, WANG Yan¹, WANG Lu²

(1. Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology, School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China;

2. Guangdong Electric Power Design Institute, Guangzhou Guangdong 510663, China)

Abstract: Business model and efficiency limit the benign development of distributed energy (DE) project; the development of clean energy and the power system reform policies have promoted the transformation of power grid enterprise. Firstly in this article, the investors of DE market are restructured, and the participation of power grid enterprise is quantized, so shall also the potential value and social benefits of DE. Then the power generation models whose high-efficiency is verified by energy flow (cold, heat and electricity) are designed for building and regional-based Distributed Energy Stations (DES). Finally, the model of efficiency sharing and development capability of energy-saving is established. Focusing on two situations, before and after the reform of electric power transmission and distribution, the influence of different investment intensity of power grid enterprise on the energy efficiency of building and regional-based DE projects is analyzed within the whole life cycle of DE project, and the trends of energy-saving benefit of DE project with power grid enterprise's participation is predicted. The efficiency of the proposed method is validated by two typical DE project cases.

Key words: distributed energy (DE); business model; power grid enterprise; development capability of energy-saving

1 引言(Introduction)

分布式微网系统是能源互联体系的重要组成部分^[1-2]. 随着能源市场和售电侧的逐步放开, 分布式能源(distributed energy, DE)项目的投资主体更加多样, 其投资和运营管理日趋复杂. 此外, 目前DE发电面临上网和消纳等难题, DE项目投资能否获利, 利润水平如何存在诸多不确定性. 在技术层面, 优化建设电网主网架, 提高电网侧与发电侧、需求侧交互响应能力是电网企业的重要工作. 在市场层面, 电网企业应主动参与, 发挥其在能源市场中的调节作用. 因此, 系统化

分析影响DE项目运营的主导因素、技术环境、能源政策, 及DE发展对电网企业的影响, 寻找电网企业参与DE项目的运营优势及发展空间等工作亟需进一步研究.

国内外关于DE系统的控制运行^[3-4], DE项目的运营模式^[5-8]、潜在价值分析^[9-10]、运营效益综合评价^[9-13]已有一定的研究基础. 文献[3]采用Agent建模研究DE系统的优化与协调. 文献[4]关注分布式微网的电源规划, 以能量平衡控制和费效率最优为约束条件, 利用遗传算法实现微网电源匹配. 文献[5]探究了

电力公司主导、物业公司主导、第三方公司主导智能小区商业运营的可行性。文献[6]从售电市场竞争角度提出可行的微网商业运营模式,定性分析了电网公司在售电侧市场的发挥空间。文献[7]结合新能源模块信息交互技术和广域综合能源协同调度技术,提出能源互联背景下新能源系统优化运营模式。文献[8]提出区域和楼宇型微电网的电力交易市场创新模式。文献[9]建立了高渗透率下微网的成本与收益的计算模型,但影响因子考虑较为单一。文献[10]提出了分布式电源的多目标优化方案,以环境成本、系统变动费用和电压浮动为优化目标,并通过非线性变异算子改进粒子群算法的收敛偏差,实现了电源规划方案的动态自适应优选。文献[11]建立了成本效益框架下的经济模型,对DE的3种金融机制进行比较分析。文献[12]则针对可再生能源发电直销用户方式下的商业模式进行了经济分析。文献[13]基于系统动力学原理,提出促进可再生能源并网消纳贡献度综合评价体系。

然而,在对DE项目进行整体效益分析时,缺乏各类潜在价值的综合量化系统研究及市场竞争分析,对电网企业参与的可行运营模式探索甚少。本文从项目投资角度出发,探索电网企业参与DE项目的可行运营模式及节能发展空间。对DE发展中电网公司投资因素,DE的潜在价值和社会效益,以及影响DE项目运营效益的各类因素进行量化,使之具有同一量纲,并将其纳入到DE项目的成本和收益中。在此基础上,构建节能分享和发展空间模型。重点分析输配电改革前后,DE项目全生命周期内电网企业参与投资和运营的效益空间及发展趋势,通过构建南方地区两种典型DE项目的发电机组模型,利用能量流和量化之后的经济流验证计算模型的有效性,并为新环境背景下,电网公司在分布式能源发展规划中的角色转型提供优化建议。

2 运营模式分类(Classification of business models)

2.1 分布式能源站类型(Types of DES)

按照供能类型对分布式能源站进行分类,可分为区域型和楼宇型^[14-15]。区域型DES的规模一般在几十兆瓦级及以上,主要建设在城区外的工业园区,区域内用户类型多样,各类负荷之间可互补分配,负荷特性较平稳^[14]。南方地区的DE项目多为区域型。在一些区域型园区智能化电网建设中,通常采用综合能源布点建设。

楼宇型DES的单位投资较高,占地空间小^[15]。为弥补较大的供能成本和发挥自身建设的灵活性优势,楼宇型DES通常建设在城中心或者城区外需集中供能的区域。用户多以医院、商场、酒店、学校、建筑综合体、机场为主。其中,医院和商场类DES用能较大,效益相对较好。燃气大楼类项目由于较低的燃料成本,

效益也较好。

2.2 电网企业参与的DE项目运营模式分类 (Business model of DE project with power grid enterprise's participation)

根据电网企业参与的投资力度,对电网企业参与DE项目的运营模式进行分类。通过设定电网企业参与DE项目的4种投资比例对模式分类并进行量化转化,如图1所示。 k 为电网公司的参与投资比例。

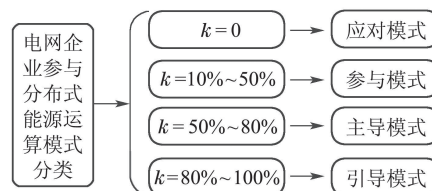


图1 DE项目运营模式分类

Fig. 1 Business model of DE project

参与模式和主导模式均为联合投资,应对模式和引导模式以独立投资为主,应对模式下电网企业不参与投资。参与模式指项目由其他市场主体主导投建(小团体联合或单方独立),电网公司参与小比例投资。主导模式指电网公司分担过半投资资金,剩余由其他市场主体补充。引导模式指电网公司参与绝大部分投资资金(剩余资金由用户或者其他小规模市场主体承担)或独立投资。

3 DE项目的能效分享及发展空间模型构建 (Model construction of efficiency sharing and development capability for DE project)

能效分享是项目是否盈利的直观表现,节能发展空间是项目长远利益的直接反映。本文结合DE项目的实际情况,在成本分析中考虑了固定成本和变动成本;在收益分析中考虑了售电、供冷和供热收益;在潜在效益分析考虑可靠性效益、降损效益、环境效益、延缓输电网投资效益。能效分享及发展空间折合到单位度电计算,模型构建的具体流程见图2。

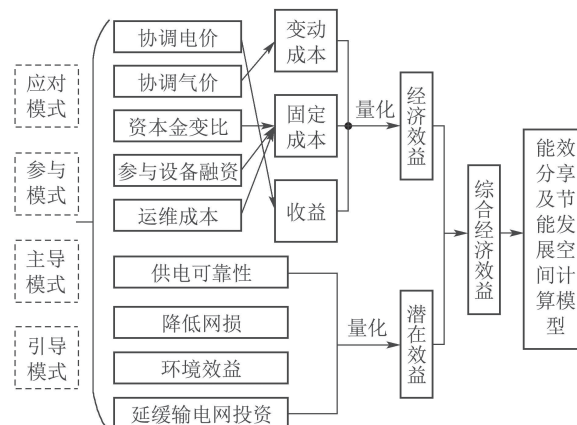


图2 计算模型构建流程

Fig. 2 Construction process of calculation model

3.1 单位运营成本(Unit operating cost)

固定成本主要包括初始投资、运维成本 W_m 、员工福利 W_b 等^[16];变动成本主要指燃料费用 $W_{f(t)}$,项目的单位运营成本 $W_{PU(t)}$,其计算公式为

$$W_{PU(t)} = \frac{W_{f(t)} + W_m + W_b + W_{IVN}}{W \times h}, \quad (1)$$

其中: W_{IVN} 为项目的初始投资等年值; W 为机组的发电功率; h 为年均发电小时数。

1) 固定成本.

以冷热电三联供系统为例,初始投资包括设备购置费、设计勘探、工程管理 etc 前期费用,其中设备购置费占初始投资的绝对比例,各类机型的价格在6000元/kW~13000元/kW之间.相关计算公式为

$$\begin{cases} W_{IVN} = \frac{r \times (1+r)^{T_p}}{(1+r)^{T_p} - 1} W_k, \\ W_m = \frac{W_0 \times \eta_0}{n_a}, \end{cases} \quad (2)$$

其中: W_k 为初始投资(包括设备费、建造费、运杂费、安装费等); n_a 为折旧年限; W_0 为生产设备购置费; η_0 为设备维护费率。

2) 变动成本.

$$W_{f(t)} = C_{f(t)} \times u_f, \quad (3)$$

其中: u_f 为燃料价格; $C_{f(t)}$ 为年燃料耗量。

3.2 单位运营收益(Unit operating income)

对于普通分布式联供系统而言,收益主要包括:售电收益 $I_{e(t)}$,供冷收益 $I_{c(t)}$,供热收益 $I_{h(t)}$,供蒸汽收益 $I_{s(t)}$,单位运营收益 $I_{EU(t)}$ 的计算公式为

$$I_{EU(t)} = \frac{I_{e(t)} \times 10^{-4} + I_{c(t)} + I_{h(t)} + I_{s(t)}}{W \times h}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} I_{e(t)} = W \times h \times u_s + p \times W \times h \times (u_t - u_s), \\ I_{c(t)} = S_{c(t)} \times u_c, \\ I_{h(t)} = S_{h(t)} \times u_h, \\ I_{s(t)} = S_{s(t)} \times u_{st}, \end{cases} \quad (5)$$

其中: u_s 和 u_t 分别为分布式电源售电价和上网电价; p 为DE发电上网比例; $S_{c(t)}$, $S_{h(t)}$ 分别为供冷量和供热量; $S_{s(t)}$ 为年供蒸汽量; u_c , u_h 分别为热价和冷价; u_{st} 为蒸汽价格。

3.3 单位潜在效益(Unit potential benefit)

就目前的技术条件和发展规模来看,楼宇型和区域型DES基于自身的建设地点和供能优势,在提高可靠性、环境保护、延缓输配网投资等方面的潜在价值不容忽视。

1) 单位可靠性价值(I_{RBU}).

DE系统的供电可靠性价值可用期望停电损失的减少来衡量^[12],停电损失用期望缺供电量与电能中断

损失率来计算.计算公式为

$$I_{RBU} = \frac{\eta_{iear} \times f_{avi} \times (t_{aid} - P_i t_{re}) \times W_{ial}}{W \times h}, \quad (6)$$

其中: η_{iear} 为电能中断损失率; f_{avi} 为系统负荷的年均停电频率; t_{aid} 为平均停电时间; P_i 为系统切换到孤岛的失败概率; t_{re} 为机组的重启时间; W_{ial} 为系统孤岛运行期间负荷的平均功率。

2) 单位降损价值(I_{LRU}).

DES通常建设在城市中用户密集区或者负荷比较集中的工业园区附近,合理规划DES的布点,可以有效降低网损. I_{LRU} 计算公式为

$$I_{LRU} = p \times \theta \times u_b, \quad (7)$$

其中: u_b 为火力发电的标杆电价; θ 为分布式配电网相对于传统集中式配电网的降损率。

3) 单位环境价值(I_{EVU}).

传统火电的污染物主要是粉煤灰,SO₂,NO_x,CO₂,CO等. I_{EVU} 计算公式为

$$I_{EVU} = \sum_{i=1}^n e_i \times (E_{tpp(i)} - E_{dep(i)}), \quad (8)$$

其中: e_i 为第*i*类污染物的环境价值; $E_{dep(i)}$ 为分布式发电第*i*类污染物的排放量; $E_{tpp(i)}$ 为常规火电发电第*i*类污染物的排放量。

本文在参考国外环境价值制定标准基础上^[17],同时考虑到我国目前的实际情况,计算使用的各类污染的实际环境价值稍低于国外标准,按降低30%计算.各类污染物的排放数据和环境价值见表1和表2。

表1 各类发电方式下的污染排放数据(g/kWh)

Table 1 Pollutants emissions data under various types of power generation

发电方式	SO ₂	NO _x	CO ₂	CO	灰尘
常规燃煤发电	8.556	3.803	822.8	0.124	52.28
脱硫煤发电	0.427	3.803	822.8	0.124	52.28
微燃机发电	0	0.618	184.1	0.170	0
内燃机发电	0.023	4.795	170.2	1.222	0

表2 污染物环境价值标准(元/kg)

Table 2 Environmental value standard of the pollutants

污染物	SO ₂	NO _x	CO ₂	CO	粉煤灰
环境价值	4.2	5.6	0.016	0.70	0.09

4) 延缓输电网投资单位价值(I_{TDU}).

对于负荷密集、峰谷用电量差异较大的城中区,或者输配电困难的偏远山区等,电网企业可在电网规划阶段引导投资者有序进行建设,满足部分负荷增长的需要, I_{TDU} 计算公式为

$$I_{TDU} = (1 - a)U_{uci}, \quad (9)$$

其中: U_{uci} 为电网新建单位容量所需的投资; a 是电网对分布式电源的备用率。

3.4 模型构建(Model construction)

从DE项目整体效益和电网分享的效益两个角度出发, 分析中将可靠性价值和环境价值纳入到分布式电源侧的利润计算中, 将降损价值和延缓输电网投资价值纳入到与电网相连接部分的利润分析中。其中, DE系统侧的单位利润为

$$I_{EGU(t)} = I_{EU(t)} + I_{RBU} + I_{EVU} - W_{PU(t)}. \quad (10)$$

DE系统在建设过程中, 与电网相接部分的收益主要体现在投资成本的减少, 即降损价值(I_{LRU})、延缓输电网投资价值(I_{TDU}); 收益降低主要体现在售电收益($I_{e(t)}$)的减少。针对DE项目, 与电网相连接部分的单位效益(I_{POWU})为

输配电改革前:

$$I_{POWU} = p \times (u_t - u_b). \quad (11)$$

输配电改革后:

$$I_{POWU} = p \times S_q, \quad (12)$$

$$I_{POWU} = I_{LRU} + I_{TDU} + I_{POWU}, \quad (13)$$

其中 S_q 为输配电改革模式下的输配电价。

对于投资方来讲, 为在合同期限内收回投资, 其年节能分享额应该满足

$$\sum_{t=t_b}^{t_a+t_0} \frac{S_s}{(1+i_0)^t} \geq W_k, \quad (14)$$

其中: S_s 为投资方的最低节能分享; i_0 为基准收益率; t_a 为合同年限; t_b 为项目开始运营年份; t_0 为建设期。

对于一般的DE项目, 投资方和用户达成协议, 合同年限内, 投资方享受一定的节能效益。由式(10)–(14)以及成本和收益分析可推算出电网参与的DE项目的节能分享及发展空间模型如下:

$$\begin{cases} \mu = \frac{S_s}{(I_{EU(t)} - W_{PU(t)}) \times W \times h}, \\ E_{POWU} = I_{POWU} + \mu k I_{EGU(t)}, \\ EC_U = (1 - \mu k) I_{EGU(t)} - I_{POWU}, \end{cases} \quad (15)$$

其中: μ 为投资方的节能分享比例; E_{POWU} 为电网企业的节能效益分享额; EC_U 为节能发展空间; k 为电网参与的投资比例。

4 算例分析(Example analysis)

4.1 案例概述(Case overview)

本文算例取自于广东地区两种典型分布式能源站(distributed energy station, DES)项目。分别是, 某综合购物商场DES, 属于楼宇型, 某知识城DES, 属于区域型。主要系统配置及生产参数见图3–4和表3。

两种系统均能实现冷、热电三联供, 为方便比较,

系统发电均上网。考虑发电规模、发电效率和经济性。楼宇型DES主机组采用4台1.063 MW的J320内燃机, 由2台烟气热水型溴化锂机组制冷(1.18 MW), 不足部分由1台电制冷离心式冷水机组(2.64 MW)补充。采用非补燃型余热锅炉供热。区域型DES主机组采用2套21 MW多轴“一拖一”联合循环热电联产机组, 其中, 燃气轮机选用solar公司Titan130重型燃机(21 MW), 对应的蒸汽轮机匹配发电机选用能适应快速启动的要求的QF-J15-2(6 MW)。制冷设备选用双效蒸汽型溴化锂机组, 余热回收装置选用两台非补燃型的卧式自然循环余热锅炉, 调峰锅炉主要用于冬季汽机高压抽气不满足工业用蒸汽时使用。

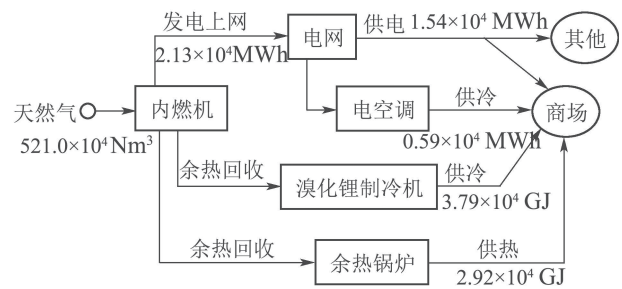


图 3 楼宇型DE系统配置图

Fig. 3 System configurations of building DE

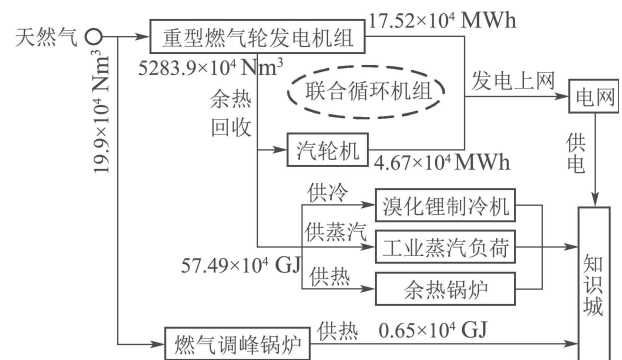


图 4 区域型DE系统配置图

Fig. 4 System configurations of regional-based DE

表 3 各类DES的生产参数

Table 3 Production parameters of DES

生产参数	楼宇型	区域型
动态单位投资/(元/kW)	8920	7643
年发电利用小时数/h	5000	5441
年发电量/(10 ⁴ MWh)	2.126	22.19
溴化锂机组供冷量/(10 ⁷ GJ)	3.79	11.27
年供热量	2.9210 ⁴ GJ	供热1.6×10 ⁴ GJ 蒸汽14.35×10 ⁴ t
年耗气量/(10 ⁷ m ³)	0.521	5.305

项目的工程投资除了考虑主辅生产工程费用外, 还需计入与厂址相关的单项工程费、生产准备费等其

他费用. 本文算例兼顾以上考虑因素, 参考广州地区已投运项目运营数据进行估算.

4.2 经济效益及敏感度分析(Economic benefit and sensitivity analysis)

影响DE项目运营效益的主要因素有电价、冷价、热价、上网电价等, 给定影响因素初始基准, 然后通过调整该基准使之上下浮动5%~10%, 计算参数调整后的内部收益率(IRR)指标或者成本电价. 分析相同变化率条件下, 气价、冷价、热价和上网电价对两类DES经济效益的影响. 气价3.2元/m³, 电价762.8元/MWh, 冷价167元/GJ, 热价111元/GJ, 蒸汽价格400元/t.

分析图5-6, 气价和电价对DES的经济效益最为敏感, 其次为冷价和热价. 由于燃料成本是项目运营期间的主要现金流出, 远大于设备资金的时间价值和运维费用, 因此气价变化对经营效益影响最为显著; 热力供应实现门槛低, 设备投资少(以锅炉为主), 而电价的附加价值较高, 售电收益是项目主要现金流入, 因此电价敏感度较高. 楼宇型DES多针对商业用户, 单位冷负荷需求大, 致使楼宇型DES的冷价敏感度大于区域型; 区域型DES用户类型多样, 部分工业负荷对工业蒸汽的特殊需求使得区域型DES的热价敏感度较大, 甚至大于楼宇型, 间接说明用户类型的多样化可以提高能源站的综合能源利用率.

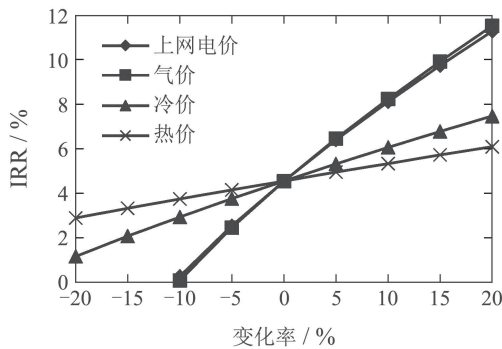


图5 楼宇型DE项目影响因素敏感度变化曲线
Fig. 5 Factors sensitivity of building DE project

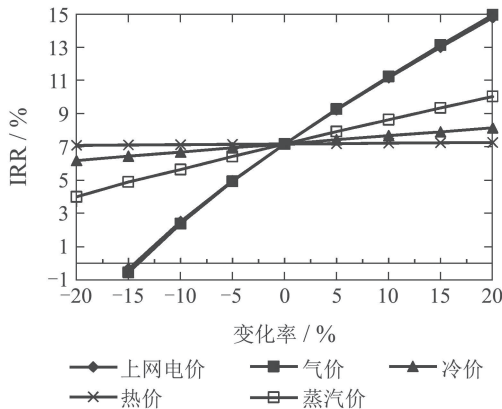


图6 区域型DE项目影响因素敏感度变化曲线
Fig. 6 Factors sensitivity of regional-based DE project

4.3 节能发展空间分析(Analysis on development capability of energy-saving)

以参与模式下(k 为0.3)的参数为基准, 其他模式下各效益计算按照图2的影响路径进行相应调整. 假设参与模式下折现率为0.8, 电网对系统的备用率为0.3. 电网扩建成本为300元/kW. 传统集中式发电配电网降损率为6%, 两类DES的降损率分别为1.7%和0.3%, 则相对降损率分别为4.3%和5.7%. 此外, 可靠性是针对分布式系统而言, 相比传统火力发电, 独立的小型商业楼宇型DES的可靠性为零. 由于其规模较小, 延缓输电网投资效益也可忽略不计. 针对区域型DES, 假设配电网的年均停电频率为0.5次/年, 平均停电持续时间为5.2 h, 微网切换到孤岛的失败概率为16%, 电源重新启动的时间为5.5 min, 孤岛运行期间微网所支撑的负荷平均功率为正常运行状态的65%, 负荷的电能中断损失率为44.6元/kWh.

1) 传统模式下电网参与模式效益分析.

假设所发电量全部上网, 气价采用广东省天然气管网公司的门站价格同步下调之后的最新价格, 2.42元/m³, 上网电价联动下调, 按666.9元/MWh计算, 冷、热、蒸汽价同上节. 计算结果见图7和图8. 其中, 垂直虚线表示临界年均发电小时数, 即虚线右侧的部分为8%基准收益率条件下项目的盈利区间, 曲线A表示项目综合效益.

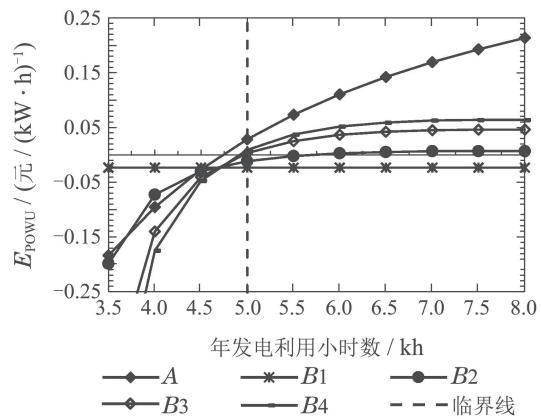


图7 电网参与的楼宇型DE项目运营效益分析
Fig. 7 Operation efficiency on building DE project of power grid enterprise participating in

分析图7-8可知, 电网侧最低节能分享效益随投资力度的增加而增加. 对于楼宇型DES, 随着年均发电小时数的增加, 电网侧最低节能分享效益逐渐趋向于稳定, 项目的盈利空间(A曲线与B系列曲线的差值)增加, 但是一般的楼宇型DES年均发电小时数很难达到6000 h, 因此, 即使气价全面下调, 电网公司参与的盈利空间依然很小. 对于区域型DES, 随着年均发电小时数的增加, 电网侧最低节能分享效益有一个最大值, 此处对应5500 h. 在4500 h~6000 h之间, B3和B4

模式下电网侧效益明显高于其他2种模式,此区间对应一般区域型DES的年均发电利用小时数.因此,对于区域型DES,由电网公司主导或引导投资对发挥DE潜在优势更加有利.

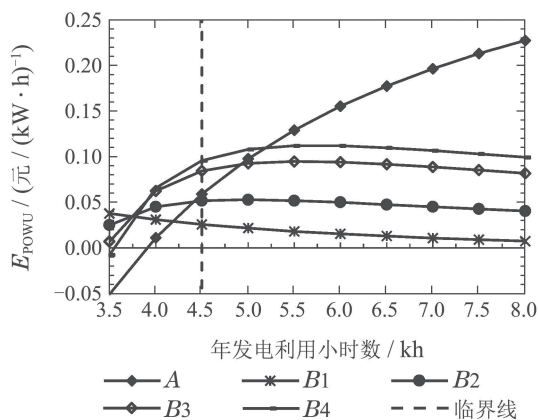


图 8 电网参与的区域型DE项目运营效益分析

Fig. 8 Operation efficiency on regional-based DE project of power grid enterprise participating in

2) 电改模式下电网参与模式效益分析.

电改模式下,电网企业通过输配电成本确定输配电价,收取过网费来盈利.本节参考深圳市输配电价,按0.14元/kWh进行计算.

分析图9-10可知,电网侧最低节能分享效益随投资力度的增加而增加.对于楼宇型DES,相比传统模式,电改背景下电网参与楼宇型DE项目的四种运营模式下的节能分享空间有所微增,项目总体效益较好.输配电价改革对与电网向市场化进行结构转型有利.随着年均发电小时数的增加,电网侧最低节能分享效益有一个最大值,此处对应5500 h;在4500 h~6000 h之间,电网侧的最低节能分享效益高于项目的总体效益,与区域型DES的年均发电利用小时数变化区间吻合.因此,在输配电改革环境下,电网企业在资金允许的情况下,可适当增加投资比例.

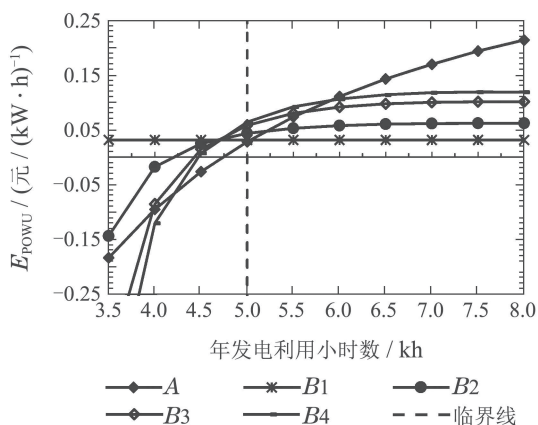


图 9 电网参与的楼宇型DE项目运营效益分析

Fig. 9 Operation efficiency on building DE project of power grid enterprise participating in

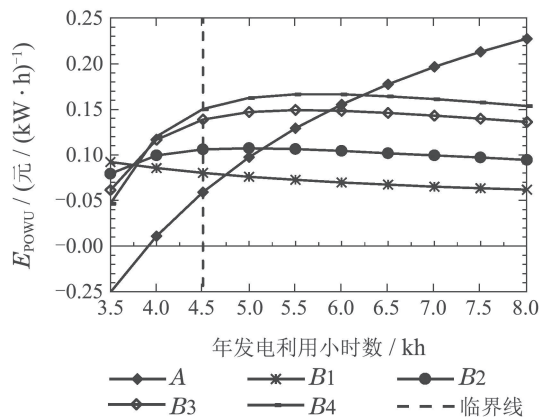


图 10 电网参与的区域型DE项目运营效益分析

Fig. 10 Operation efficiency on regional-based DE project of power grid enterprise participating in

分析表明,未来的DE发展增加了电网企业的盈利空间.目前楼宇型DE项目效益不理想,投资方积极性不高,电网公司作为中间枢纽,应更多的去牵头编制楼宇型DE项目发展规划,将DE发展规划与燃气建设和电网建设有机结合,最大化发挥政策和技术操作空间,逐渐改善市场态度和项目本身的盈利空间.

5 结论(Conclusions)

1) 针对当前DE项目的运营效益不理想,不同类型项目的运营效益差异大等问题.重新考虑DE的环境价值、降损价值等潜在价值,结合经济领域的财务模型,定量分析DE发展给能源互联网带来的增值空间,并考虑天然气价格下调趋势和售电侧放开趋势.分析结果表明,在气价全面下调,气价联动机制规范实施的背景下,区域型DES的综合效益趋向乐观,相比于楼宇型DES,具有更大的发展空间.

2) 针对新环境背景下电网企业能否转向DE等新能源领域,以及参与力度如何确定等问题.利用模型,对输配电改革前后两种情况下电网企业参与DE项目投资进行重设,分析投资力度对能效分享影响的差异化程度.有利于电网企业进一步完善配电网规划设计规范,建立配电网与DE及微电网进行同步规划的机制,推进DE与配电网的一体化建设.

参考文献(References):

[1] CHEN Qixin, LIU Dunnan, LIN Jin, et al. Business models and market mechanisms of energy internet (1) [J]. *Power System Technology*, 2015, 39(11): 3050 – 3056.
(陈启鑫, 刘敦楠, 林今, 等. 能源互联网的商业模式与市场机制(一) [J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3050 – 3056.)

[2] LIU Dunnan, ZENG Ming, HUANG Renle, et al. Business models and market mechanisms of energy internet (2) [J]. *Power System Technology*, 2015, 39(11): 3057 – 3063.
(刘敦楠, 曾鸣, 黄仁乐, 等. 能源互联网的商业模式与市场机制(二) [J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3057 – 3063.)

[3] GUO Hongxia, WU Jie, KANG Yunlong, et al. Coordinated optimization of distributed hybrid generation system based on multi-

- agent system [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(2): 235 – 239.
(郭红霞, 吴捷, 康龙云, 等. 基于多智能体的分布式发电系统协调优化 [J]. 控制理论与应用, 2012, 29(2): 235 – 239.)
- [4] SHU Jie, ZHANG Xianyong, SHEN Yuliang, et al. The algorithm and application in power sources planning and designing for micro-grid based on distributed renewable energy [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(5): 675 – 680.
(舒杰, 张先勇, 沈玉樑, 等. 可再生能源分布式微电网电源规划方法及应用 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27(5): 675 – 680.)
- [5] WANG Cheng, XU Yancai, WEI Qinglai, et al. Analysis of intelligent community business model and operation mode [J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(6): 147 – 154.
(王澄, 徐延才, 魏庆来, 等. 智能小区商业模式及运营策略分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 147 – 154.)
- [6] ZHANG Chi, CHEN Xiaoke, XU Xiaogang et al. Microgrid operation mode based on electricity market reform [J]. *Electric Power Construction*, 2015, 36(11): 154 – 159.
(张弛, 陈晓科, 徐晓刚, 等. 基于电力市场改革的微电网经营模式 [J]. 电力建设, 2015, 36(11): 154 – 159.)
- [7] ZENG Ming, YANG Yongqi, LI Yuanfei, et al. The preliminary research for key operation mode and technologies of electrical power system with renewable energy sources under energy internet [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(3): 681 – 691.
(曾鸣, 杨雍琦, 李源非, 等. 能源互联网背景下新能源电力系统运营模式及关键技术初探 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3): 681 – 691.)
- [8] KIM H, THETTAN M. A two-stage market model for microgrid power transactions via aggregators [J]. *Bell Labs Technical Journal*, 2011, 16(3): 101 – 107.
- [9] WU Yaowen, MA Xiyuan, SUN Yuanzhang, et al. Overall economic evaluation and analysis of accession of microgrids with high penetration [J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(13): 49 – 54.
(吴耀文, 马溪原, 孙元章, 等. 微网高渗透率接入后的综合经济效益评估与分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(13): 49 – 54.)
- [10] LI Ran, SHEN Xue, ZHONG Chao, et al. Multi-objective planning of distributed generation considering environmental benefit [J]. *Power System Technology*, 2014, 38(6): 1471 – 1478.
(栗然, 申雪, 钟超, 等. 考虑环境效益的分布式电源多目标规划 [J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1471 – 1478.)
- [11] LEVIN T, THOMAS V M. Utility-maximizing financial contracts for distributed rural electrification [J]. *Energy*, 2014, 69(5): 613 – 621.
- [12] HEFFELS T, MCKENNA R, FICHNER W. Direct marketing of electricity from biogas and biomethane: an economic analysis of several business models in Germany [J]. *Journal of Management Control*, 2012, 23(1): 53 – 70.
- [13] SUN Shengpeng, LIU Fengliang, XUE Song. Comprehensive evaluation system for contribution degree of demand-side resources to renewable energy source integration [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2015, 35(4): 77 – 83.
(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]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 77 – 83.)
- [14] 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.
(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.)
- [15] LING Meng. Integration and optimized operation of distributed energy system in a large public building [J]. *Guangdong Electric Power*, 2012, 25(1): 70 – 74.
(凌猛. 某大型公共建筑分布式能源系统集成与优化运行研究 [J]. 广东电力, 2012, 25(1): 70 – 74.)
- [16] CULLINANE K, CULLINANE S. A financial evaluation of the design concept for a ‘clean energy producing vessel’ [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 2013, 229(2): 201 – 217.
- [17] MASSAELI M, JAVADIAN S A M, KHALESII N. Environmental benefits of DGs and comparing their generation costs with thermal power plants considering production pollution on human health [J]. *Indian Journal of Science and Technology*, 2011, 4(10): 1290 – 1294.

作者简介:

廖志伟 (1973–), 男, 副教授, 目前研究方向为电力市场改革与运营、新能源发电经济后评价等, E-mail: epliao@scut.edu.com;

王妍 (1993–), 女, 硕士研究生, 目前研究方向为电力系统控制与运营、分布式能源项目经济评价等, E-mail: Dandelion_fei@163.com;

王路 (1970–), 男, 教授级高级工程师, 目前研究方向为电力发展战略研究、综合能源规划、电力系统规划、电源规划, E-mail: wlud@163.com.