天然气分布式能源项目效益优化分析

唐睿　胡道玖
上海电力大学

摘　要：为了积极落实“双碳”目标，进一步优化能源结构、应对大气污染，我国各地积极推进特色产业园区建设，通过“企业入园”和“煤改气”等措施，实现节能减排、缓解雾霾，在此过程中，天然气分布式能源项目作为“上大压小”和“煤改气”的有效手段被广泛应用于企业以及产业园区项目中，用以替代燃煤分散小锅炉。本文以某天然气分布式项目案例进行分析，评价了此系统的合理性。并根据此项目在设计、建设和运营过程中所遇到的各方面问题，提出有利于当地发展天然气分布式项目的具有可操作性的优化改进对策及建议，以利于此类项目在当地的发展和推广。

关键词：天然气；分布式能源；节能减排；效益分析；优化建议

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.06.118

一、背景

十四五开局时期，国家提出了即2030碳达峰和2060碳中和的双碳目标，推动全面低碳转型。构建保障中国式现代化进程的现代能源体系。

分布式能源系统在国外的发展起步比较早，关于分布式能源系统的研究也相对比较完善，已经形成了比较成熟的政策体系。初期是以天然气为燃料的燃气蒸汽联合循环热电联产系统研究应用为主，带来的社会效益与经济效益十分显著。美国、欧洲、日本等发达国家对于分布式能源的使用已经有近40年历史，并且已将其纳入为安全能源发展的重要战略范畴。几乎所有欧盟国家都已经建立了适合自身发展特征的分布式能源系统，以及与之匹配的天然气能源分布式计划。

二、天然气分布式能源的特点与优势

天然气分布式能源在提高能源利用效率、供电安全及促进节能减排等多方面具有优势。主要有以下几个方面的特点：

（1）系统集成度高，多目标优化。

（2）系统开放程度高，多能源耦合能力强。

（3）系统不可复制性，贴近用户。

（4）多能源输入与输出，促进供给侧与需求侧改革。

同时天然气分布式能源具备以下优点:

（1）能源利用率高、节能。分布式能源系统将发电过程中产生的废热用来供热和制冷，充分利用了一次能源。制冷机回收发电机排出的尾气，不经过二次换热，直接转化为冷能、热能等，系统的能源利率高达70%以上。

（2）环保。分布式能源系统燃烧排放物对环境污染少。

（3）安全。区域建筑物采用天然气分布式系统后，其供电减少了对电网的依赖，提高了用户的供电安全。

三、某天然气分布式能源项目情况概述

某天然气分布式项目为某企业大厦客户提供服务。为保证大厦数据中心（以下简称数据中心）具有稳定的温度、湿度，在大厦内部建设分布式供能系统，向数据中心提供冷负荷及电负荷。占地面积约277㎡，长约27m，宽约9m。主厂房内布置有内燃机发电机组、溴化锂机组、冷水一次泵等。

该项目，累计发电量138.4654万千瓦时，制热量29.0900万千瓦时，制冷量125.8200万千瓦时，期间共消耗天然气371054m^3，发电气耗0.25m^3/千瓦时，利用小时数1,730.8小时，一次能源利用率82%。加权平均电价为1元/千瓦时、冷、热价皆为0.67元/千瓦时（此为国网公司能源中心价格）、天然气价2.7元/m^3，厂用电率15%，年发电量237.3693万千瓦时，利用小时数2,967小时，年制冷制热总量265.5600万千瓦时，一次能源利用效率82%，不计人工和折旧成本条件下毛利207.9441万元

四、效益分析

（一）用能分析

该项目为用户侧提供冷负荷，其中热量来源主要包括：（1）设备散热量；（2）通过围护结构传入室内的热量；（3）人体散热量；（4）照明散热量；（5）新风散热量。为了满足温度、湿度、洁净度和送风速度的要求，需要提供足够的冷负荷满足数据中心的热量的需求。根据数据中心规划建设面积以及数据中心的设备功率，对数据中心的最大散热进行估算。表1列出了2017至2021实际运行指标远未达到实际工况。

（二）经济效益分析

以天然气作为一次能源发电、供冷、供热，其运行收益为：减少外购电量、冷量、热量而节省的费用；成本为：燃料（天然气）成本、折旧成本、运行人工成本、检修维护费用。由于三联供实现经济效益是以减少

表 1 实际运行情况比较

	每日运行小时	年利用小时（h）	年供冷量(GJ)	年累计发电（Kwh）
设计	16	5000	14400	4000000
2017	5.54	1730.8	4984	1384654
2018	6.11	1910	5233	1453726
2019	6.68	2088	6340	1761248
2020	5.90	1844	5382	1495140
2021	7.83	2446	6441	1789354

外购能源费用方式实现，故不计税费。

设：燃料价格为a（元/m^3），发电气耗为b（m^3/Kwh），电价为c（元/Kwh），冷、热价为d（元/Kwh），厂用电率为ξ，项目装机容量为P千瓦，实际发电量Pa，检修维护成本为r（元/Kwh），溴化锂出力与内燃发电机出力之比为s，总造价为x（元）其中贷款利率e（%），贷款年限（折旧年限）f（年），初期投资比例g（%），运维人工成本为yp（元/年·人）运维人数n（人），年利用小时数为z。

则有

度电产生的减少外购能源费用（收益）：

（1-ξ）c+sd

度电燃料成本：ab

供热供冷收益：sd

不计折旧和人工成本，每发一度电获得收益：

（1-ξ）c+sd-ab-r

每年运行人工成本：y

以15年为折旧年限，即f=15

贷款利率为固定利率，为4.2%，即 e=4.2%

初期投资比例20%,即 g=20%

贷款本息和 PMT(4,15,0.8)×15≈1.1

则每年折旧成本：$\frac{(0.2+1.1)\,x}{15}=\frac{1.3x}{15}$

每年运行人工成本：nyp

每年发电量（实际）：Paz

综合以上，有

项目年化净利润（实际）：

$$W=[(1-\xi)c+sd-ab-r]P_az-\frac{1.3}{15}x-ny_p \quad (1)$$

当厂用电率、电价、溴化锂出力与内燃发电机出力之比、冷热价、燃料价格、发电气耗、度电检修维护成本等参数对一个已建成项目而言基本固定，故令：

$$k=(1-\xi)c+sd-ab-r \quad (2)$$

对定编定额的维护项目，年运行人工成本y（元/年）基本固定，故令

$$y=nyp \quad (3)$$

则项目年化利润表达式简化为：

$$W=kP_az-\frac{1.3}{15}x-y \quad (4)$$

公式（4）为H大厦分布式能源年利润计算公式，从人工+折旧成本，效益系数，经济效益角度而言，天然气分布式能源经济性以降低人工+折旧成本、增加效益系数、提升年利用小时数为最重要因素。

从数学模型分析，欲提高已建成项目的经济效益，有如下措施：

（1）尽可能让机组运行在额定出力点，尽可能减少机组启停次数，使值最大。

（2）尽可能增加年利用小时数，年利用小时数与项目经济效益直接成线性关系。

（3）尽可能减少运行人工成本。项目利用小时数与项目利润如图1所示

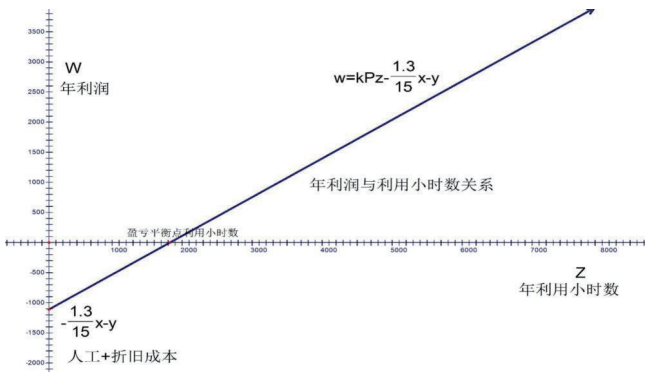

图 1：项目利用小时数与项目利润关系图

从图1明显可以看出，项目年利润直接与利用小时数成线性关系。当项目利用小时数小于盈亏平衡点时，项目亏损。增加年利用小时数，使项目运营点在直线尽可能右的位置取得。同时，对应射线绕起点逆时针旋转，降低人工+折旧成本，对应直线整体向上平移，对增加即年利润相当有利。

以H大厦为例，当时燃料价格=2.59元/m^3，发电气耗=0.25m^3/千瓦时，电价=1元/Kwh，冷、热价=0.67元/Kwh，厂用电率为=15%，项目装机容量=800Kw，度电检修维护成本=0.05元/Kwh，溴化锂出力与内燃发电机出力之比=1.2，总造价=1493万元，运行人工成本=120万元/年。

令k=(1-ξ)c+sd-ab-r，则有k=0.9565，故H大厦项目年净利润WH为：

$$W_H = kP_a z - \frac{1.3}{15}x - y = 765.2z - 2504000 \quad (5)$$

五、天然气分布式能源项目的优化建议

（一）设备成本优化

该项目可以采用选用2台400KW国产内燃机发电机组+烟气换热器+热水型溴化锂机组方案。采用单一热水型溴化锂机组，设备简单，国产化程度高，可选范围大。可以有效降低设备投资成本降低，且系统控制较为简单；虽然增加了能源的二次转化，没有充分体现出高品质热能的优势但从大厦目前工况分析，后者足以满足需求。

（二）施工成本控制优化

该项目除了隐蔽工程管线等必须与土建主体工程同步竣工外，其余应延后至楼宇进入装修阶段开工。同时，机组调试及试运行应在政府相关职能部门通过验收，准予并网后，与电网连接运行的方式进行，避免孤岛小系统方式调试增加风险和费用。

材料入场时间也不宜过早，避免主体建筑设计变更带来分布式能源被迫变更，造成已入场材料的浪费。除预埋件外，几乎没有需要提前施工项目，可进一步压缩施工周期和延后开工时间，减少人工费用和资金的时间成本。

（三）维护人工优化

联供运行小时数的增加，势必带来运行人工成本增加，该天然气分布式系统运维人员为常驻8人+临时工4人的配置，然而该系统在编制控制程序时，是严格按无人值守标准要求进行的，控制程序及主、辅设备也满足无人值守条件。实际运维工作中，至少可以减少6-8人的运维费用，按照目前120万/年的情况，可将成本运维人工成本降低至40万/年。

（四）出力优化

天然气分布式项目发电由本地负荷消耗。若不能完全消耗，余额倒送注入电网，倒送的有功，供电部门不会支付任何电费。然而，由于大厦用电负荷是随机变化的，若分布式机组控制较小出力，虽然能确保不倒送有功，不产生收不到电费的电量，但机组未充分利用，效益不佳。若分布式机组控制满载出力，虽然机组充分利用，但势必产生大量收不到电费的电量，效益也较差。所以，需要将负荷在一定区间分布的数据形成函数模型，在数学上求函数的极值，从而实现最优控制。

（五）政策响应优化

目前，根据国家政策规定，分布式光伏发电具有天然的售电权。充分利用大厦屋顶平整度高、向阳且光照充足，可以增加光伏发电设备。在此政策下，只要向电网倒送的有功不超过光伏发电设备的额定容量，完全可以用“自发自用，光伏发电上网售电”来规避禁止倒送有功条款（当时签订的禁止向电网倒送有功条款严重限制了H大厦天然气分布式项目供能替代率。该项目经过规划，在楼顶新增建设光伏,光伏容量,29MW,该光伏发电量直接由大楼入驻用户进行消纳，度电费用为0.95元/kw,其中政策性补贴为0.15元/kwh。

（六）运行方式优化

该项目有两路10kV进线，工作日，每路进线负荷变化规律如图5-1所示，0时至6时，每路进线负荷为280千瓦，几乎恒定不变；6时至8时，负荷上升至700千瓦；8时至17时，负荷恒定为700千瓦，浮动在上下50千瓦左右；17时至19时，下降至280千瓦；19时至24时，负荷为几乎恒定不变的280千瓦。且有波动较大的负荷，主要为多台电梯同时上升或下降，尤其在电梯下降时，电梯向电源倒送有功，显示的效果就是市电注入有功急剧减少，运行优化方法是一路市电进线运行，另一路市电进线改热备用，联络开关合闸。所有的用电负荷、2台机组都等效接在同一段母线上。工作时间电负荷较高，2台机组出力能完全被消纳，非工作时间电负荷较低，改为单机运行。改变运行方式后，使得原先的出力消纳问题大大提升，从数学角度分析，出力（发电量）Pa相比原运行方案提高了约35%。

六、总结

根据式5，基础条件不变情况下，通过上述优化后的可带来的收益约为84.7万元每年，各项影响数据计算后，可至少可将盈亏平衡年利用小时数从目前的3259.15小时降低至2040小时。假设该该项项目采用优化的设备方案及施工方案，盈亏平衡点（W=0时年利用小时数）将小于2000小时。

参考文献

[1]王宝琳，天然气分布式能源系统节能和经济性分析，石油石化节能，2020 NO.03：45-47

[2]金红光,多能互补的分布式能源系统理论和技术的研究进展总结及发展趋势探讨，中国科学基金，2020，34卷第4期：289-296

[3]张伟波，多能互补分布式综合供能系统及典型开发方案研究，发电技术，2020.6，41卷第3期：246-251

[4]傅旭，多能互补系统盈利模式分析，分布式能源，2020.8，5卷第4期：28-33

[5]詹天津,谢玉荣,王世朋,等.中国天然气分布式能源发展现状研究[J].上海电力学院学报,2021(006):037.