

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2022.01.008

基于两级策略的双源分布式供能系统运行优化研究

Operation optimization of dual-source distributed energy supply systems based on two-level strategy

姚哲豪¹, 郑莆燕^{1*}, 袁言周²

YAO Zhehao¹, ZHENG Puyan^{1*}, YUAN Yanzhou²

(1.上海电力大学 能源与机械工程学院, 上海 201306; 2.上海奉贤燃气发电有限公司, 上海 201400)

(1.School of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai Electric Power University, Shanghai 201306, China;

2.Shanghai Fengxian Gas Turbine Power Generation Company, Shanghai 201400, China)

摘要: 现有的分布式供能经济性优化策略并没有很好地协调经济收益和设备运行稳定性之间的关系, 基于此问题提出了一种基于两级运行优化策略的新型分布式供能系统, 结合用户侧历史运行数据, 预测得到各时段的负荷平均值后先进行第1级总量优化, 保证优化方案处于收益较高的水平, 再将该平均值作为负荷变化基准值进行第2级微增优化, 保证各个时段之间设备根据负荷变动所进行调整的过程相对稳定。运行日将系统优先布置成第1级的总量优化方案, 在此基础上根据负荷基准值与逐时负荷的差值进行微增调度; 同时, 经济累加可得到典型日全天的系统总收益, 应用Epsilon工程软件进行系统的模拟仿真, 将该两级优化策略与总量优化、微增优化策略的操作可行性和系统经济性进行比较研究, 通过计算对比得出不同策略下各个时间段内分布式供能系统总收益及相应的设备调度最优方案。结果表明, 该两级优化策略对系统经济性和运行稳定性提供有价值的参考。

关键词: 分布式供能系统; 模拟仿真; 设备调度; 运行优化; 经济性; 多能耦合; 冷、热、电三联供

中图分类号: TK 01

文献标志码: A

文章编号: 2097-0706(2022)01-0056-07

Abstract: The existing economic optimization strategy for distributed energy supply systems does not well balance the economic benefits and equipment operation stability. Accordingly, the operation optimization for dual-source distributed energy supply systems taking two-level strategy is proposed. Based on user-side operational data, average load of each period is predicted and the first level total load optimization is carried out. Then, to ensure the profitability of the optimization scheme, the second level incremental optimization is made by taking the average load as the benchmark of load variation, keeping the scheduling process of equipment adjusting with the load that varies between different periods relatively stable. During daily operation times, the system prefers the first level total load optimization scheme. And on this basis, the incremental optimization scheme will be carried out according to the difference between the reference value and hourly value of load. The total revenue of a typical day is obtained by revenue accumulation. The operation feasibility and system economy of the total load optimization, the incremental optimization and the two-level strategy are compared based on the simulation results carried out by Epsilon engineering software. The results show that the two-level strategy is of reference value on optimizing system economy and operation stability.

Keywords: distributed energy supply system; simulation; equipment scheduling; operation optimization; economy; coupling of multiple energy; CCHP

0 引言

分布式供能系统可同时满足冷、热、电等多种

能源负荷种类需求, 因此供能方式复杂, 同样的负荷需求会产生多种供能组合方式和运行策略^[1-2]。分布式供能系统设计效率高^[3], 相比传统供能方式具有较大优势^[4], 但分布式供能企业的实际经济运行状况并不理想, 与设计工况存在较大差异, 能源利用率和经济性大打折扣^[5-6]。要想分布式供能系

统实现多种能源耦合理想化,就需要根据能量需求对系统运行模式进行优化调整来保证整体运行最优^[7-9],多位学者对此采用不同的优化策略进行研究,主要分为微增优化和总量优化。

微增优化方面,杨向劲等^[10]对比了单纯进行供热负荷条件下,分布式供能系统中联产和分产的能耗,通过对比将能耗低的设备进行供能增量分配;吴强等^[11]建立了单体设备的边际效益系数计算模型,以单个设备每小时运行收益大小与供能大小比值的最大化作为优化目标,判断系统运行负荷发生变化时该单个设备是否增加供能。

总量优化方面,陈云等^[12]对用户供能进行总量负荷联合调度优化,减少了分供造成企业间协调操作所产生的额外成本;丁明等^[13]研究了分布式供能系统发电的运行策略,给出分布式发电系统经济调度的目标函数并求解,得出了在满足约束条件下运行成本最经济时的总量优化方案;胡慧忠^[14]在统筹考虑系统的经济性和节能性的基础上,建立了分布式供能系统的数学优化模型,通过总负荷量的分配优化得到经济性最优运行方案;崔亚^[15]针对冬季能源综合利用效率不高的情况,进一步在优化问题中增加能源综合利用效率约束,使最优能源配置在经济指标和能耗指标之间达到平衡。

分析上述研究可知,采用微增优化启停调度机组较少,但不一定能获得最佳系统整体运行经济性;采用总量优化时系统整体经济效益很高,但几乎每台设备都需要调节,运行操作不便且在实际生产中难以满足各项约束,对设备性能的损伤也较为严重。本文针对某分布式供能企业的双源分布式供能系统,提出了结合总量优化和微增优化的两级运行策略优化模型,为企业实际运营提供有价值的参考^[16-17]。

1 分布式供能系统案例与建模

某度假园区的双源分布式供能系统如图 1 所示,由联产设备和分产设备组成。联产设备包括内燃机-溴化锂机组(A),设备的组合方式为 1 拖 1,即 1 台内燃机后面接 1 台烟水型溴化锂制冷机,分产设备包括电制冷机组(B)和燃气锅炉机组(C)。用户侧仅对冷热负荷有需求,其中,内燃机生产的电能一部分用作厂内的自用电,用以匹配电制冷机等设备的用电需求,多余的电直接进行上网售卖,电制冷机方面,所需电能如内燃机无法满足则再考虑从电网买入进行电能的供需匹配。

各设备的运行参数见表 1,其中循环效率针对联产设备指的是设备工作效率,针对分产则指的是

运行循环性能系数(COP)值,该值来表示设备将燃料消耗转化为可被用户所利用能源的转化效率。

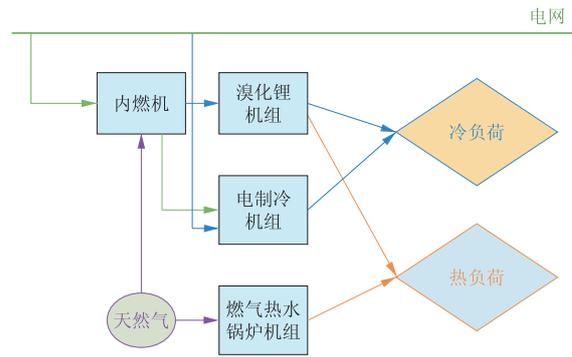


图 1 某园区分布式供能系统示意

Fig. 1 Schematic of a distributed energy supply system for a park

表 1 分布式供能系统各设备运行参数

Table 1 Operation parameters of different equipment in the distributed energy supply system

项目	联产设备		分产设备	
	溴化锂机组	内燃机	电制冷机	燃气热水锅炉
台套数	5	5	6	2
额定发电功率/kW	—	4 401	—	—
额定制冷量/kW	3 490	—	6 330	—
额定制热量/kW	4 004	—	—	8 400
循环效率	1.00/0.98	0.46	5.35	0.95

吸收式溴化锂机组为双效型制能机组,夏季主要用来给园区制冷,冬季则主要用来制热,吸收式溴化锂机组的能量来源为内燃机排烟中的热能。分产设备中,各台电制冷机通过消耗内燃机所发电能进行供冷,燃气热水锅炉通过消耗天然气进行供热。制冷机夏季供冷时冷水出口温度 t_{co} 为 $12\text{ }^{\circ}\text{C}$,冷水回水温度 t_{ci} 为 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。冬季供热时热水出口温度 t_{ho} 为 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$,热水回水温度 t_{hi} 为 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

各季节典型日用能情况(将冷热负荷转换为流量)如图 2 所示,根据历史数据可以进行第一级总量优化的负荷数据处理。

针对这一系统,应用 Epsilon 软件搭建系统仿真模型,内燃机和燃气热水锅炉采用软件自带模块,溴化锂机组和电制冷机组采用可编程模块,编程思路为:输入焓值和流量,通过拟定的(设备规程数据)COP 计算公式可以得出设备输出的制能量以及对应的能耗量。电制冷机负荷率为 $15\%\sim 100\%$,模拟误差为 0.85% ;内燃机溴化锂机组负荷率为 $40\%\sim 100\%$,模拟误差为 0.30% ;燃气热水锅炉的负荷率为 $10\%\sim 100\%$,模拟误差为 0.23% 。

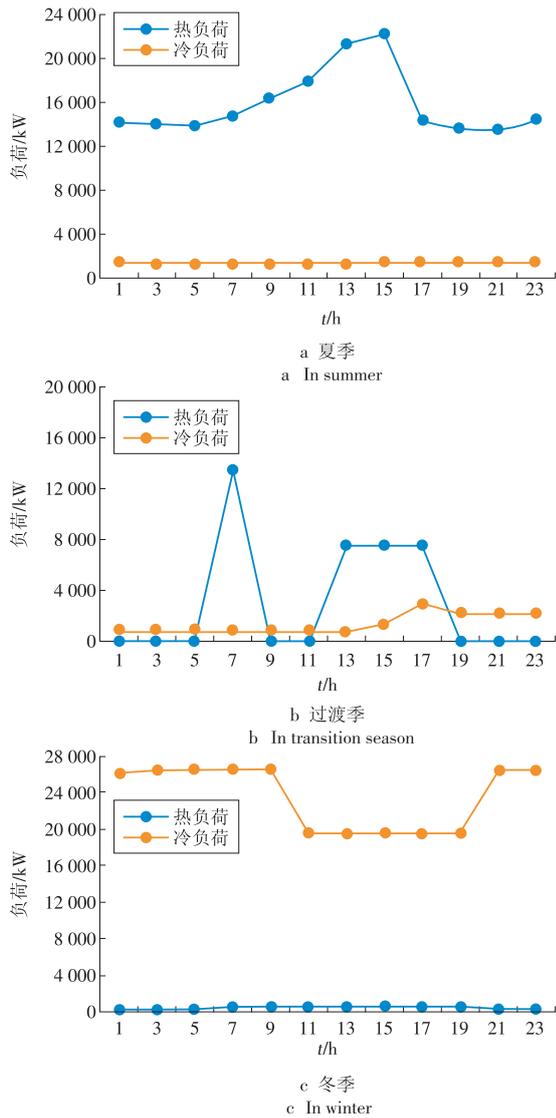


图 2 全年季节典型日园区冷热负荷变化曲线

Fig. 2 Variation curves of cooling and heating loads in typical days of all seasons

2 运行优化模型

2.1 总量及微增优化模型

总量优化模型是针对典型日某小时分布式供能系统冷热负荷总量的一个优化方案,该优化最终目的是为了得出该时刻分布式供能系统的最大化收益

$$E = \sum_{i=1}^m E_{Ni} + (\sum_{j=1}^n E_{Lj} + \sum_{k=1}^s E_{Gk}), \quad (1)$$

式中: E 为某小时分布式供能系统总收益,元; E_{Ni} 为某小时联产设备内燃机-溴化锂机组收益,元; E_{Lj}, E_{Gk} 为某小时分产设备电制冷机和燃气锅炉收益,元; m, n, s 为各设备的总运行台套数,台。

总量优化方案通过改变联产和分产设备的分流比(占总回水流量比) λ_a, λ_b 来实现。联产设备之间的分流比为 $\lambda_{i1}(i=1, 2, \dots, m)$,分产设备中电制冷

机之间的分流比为 $\lambda_{2j}(j=1, 2, \dots, n)$,燃气锅炉之间的分流比为 $\lambda_{2k}(k=1, 2, \dots, s)$ 。在系统运行过程中,一是联产设备即内燃机-溴化锂机组,消耗天然气量 G_A ,同时产生电能 P_A ,热能 Q_{HA} 或冷能 Q_{CA} ;二是分产设备,其中电制冷设备,消耗电能 P_B ,产生冷能 Q_{CB} ,燃气锅炉则消耗天然气 G_C ,产生热能 Q_{HC} 。各类供能单台设备在某小时内供电、供冷或供热所带来的收益可由以下公式得出

$$E_{Ni} = \frac{P_{Ni}(1-\theta)C_P - P_{Ni}m_{Ni}}{1+\alpha_1} + \frac{M_C\lambda_a\lambda_{1i}c\Delta t_C C_C - G_{Ni}C_g}{1+\alpha_2} + \frac{P_{Ni}(1-\theta)C_P - P_{Ni}m_{Ni}}{1+\alpha_1} + \frac{M_H\lambda_b\lambda_{1i}c\Delta t_H C_H - G_{Ni}C_g}{1+\alpha_2}, \quad (2)$$

$$E_{Lj} = \frac{M_C\lambda_b\lambda_{2j}c\Delta t_C C_C}{1+\alpha_2} - \frac{P_{Lj}C_P + m_{Lj}}{1+\alpha_1}, \quad (3)$$

$$E_{Gk} = \frac{M_H\lambda_b\lambda_{2k}c\Delta t_H C_H}{1+\alpha_2} - \frac{G_{Gk}C_g + m_{Gk}}{1+\alpha_1}, \quad (4)$$

式中: E_{Ni} 为某小时内第*i*台内燃机溴化锂机组运行收益,元; E_{Lj} 为某小时内第*j*台电制冷机组运行收益,元; E_{Gk} 为某小时内第*k*台燃气热水锅炉运行收益,元; C_P 为上网电价,元/(kW·h); C_H 为供热价格,元/GJ; C_C 为供冷价格,元/GJ; C_g 为标准状态下天然气价,元/m³; M_C, M_H 为冷,热回水总流量,kg/s; $\Delta t_C, \Delta t_H$ 为冷,热回水温差,℃; c 为水的比热容,kJ/(kg·℃); α_1 为电费、检修费税率; α_2 为冷、热、气价税率; θ 为综合厂用电率; m_N 为内燃机-溴化锂机组的材料费,元/(kW·h); m_L, m_C 为电制冷设备和燃气锅炉的设备维护成本,元/h; m_{Lj}, m_{Gk} 为单小时的设备维修费用,元。

微增优化模型是将实际运行某一时刻的方案作为起始方案,根据下一时刻的负荷变化量对运行设备进行增量分配,最终使得负荷变化量带来的系统增加收益达到最大值。

根据负荷微增之后需要分配的负荷量大小采用Epsilon自带的遗传算法进行优化,若需要增产,则将微增收益最大的设备优先增产,待增满时,如有需要则再增产其他设备(减产同理)。

微增优化本身的变量相比于总量优化额外添加了内燃机的发电负荷率(0.4~1.0),其约束与总量优化方案保持一致:各个设备的流量均不可以超过其额定流量,各个分产设备的总流量不可以超过规定的分产总流量之和(联产同理),同时内燃机排烟温度处于一个给定的合理区间内。基于上述得到的不等式和等式约束如下

$$120\text{ }^\circ\text{C} < t_s < 130\text{ }^\circ\text{C}, \quad (5)$$

$$M_{\min} \leq M \leq M_{\max}, \quad (6)$$

$$M_{d, \min} \leq M_d \leq M_{d, \max}, \quad (7)$$

$$M_{c, \min} \leq M_c \leq M_{c, \max}, \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_{2j} = 1, \sum_{k=1}^s \lambda_{2k} = 1, \lambda_a + \lambda_b = 1, \quad (9)$$

$$H = H_C + H_N, \Phi = \Phi_L + \Phi_N, \quad (10)$$

式中: H 和 Φ 为用户热负荷和冷负荷,kW; H_C 和 H_N 为燃气热水锅炉、溴化锂机组的制热量,kW; Φ_N 和 Φ_L 为溴化锂机组、电制冷机的制冷量,kW。

2.2 两级运行策略

针对上述2种策略的研究表明,采用微增优化不能获得系统整体运行最佳效果;采用总量优化时不同工况下,几乎每台设备都需要调节,频繁地大规模启停对设备本身也会造成一定的损坏,因此结合上述2个方面原因提出了一种两级运行策略。

这里将季节中多个典型日各个时刻的负荷值进行了均值处理,考虑到典型日各个时刻的负荷差距可能比较大,针对园区企业项目划分为工作和非工作时段,分别对该2大时段内的总负荷取平均值,将该平均值作为下一级进行微增优化方案的负荷基准值,整体上看,是根据用户历史负荷数据对基准值进行预测,取基准值的目的在于只需要针对基准值进行一次总量优化,避免了逐时进行总量优化的繁琐操作,预测部分也仅是通过历史运行数据对基准值的预测计算,基准值表达式为

$$Q_1 = \frac{1}{x} (\bar{Q}_a + \bar{Q}_{a+1} + \dots + \bar{Q}_{a+x}), \quad (11)$$

$$Q_2 = \frac{1}{y} (\bar{Q}_b + \bar{Q}_{b+1} + \dots + \bar{Q}_{b+y}), \quad (12)$$

式中: Q_1 为工作时段(从 a 时刻开始,共 x 个小时)负荷基准值,kW; Q_2 为非工作时段(从 b 时刻开始,共 y 个小时)负荷基准值,kW。

将2个负荷基准值进行第1级总量优化后,实际运行负荷会根据基准值产生一定的上下负荷波动,根据预测得到的基准值大小计算各时刻实际负荷大小与基准值大小的差值,表达式如下

$$\Delta Q_m = \bar{Q} - Q_m (m=1,2), \quad (13)$$

式中: m 为1代表工作时段, m 为2代表非工作时段, Q_m 为预测得到的负荷基准值,kW; ΔQ_m 为负荷差值,kW; \bar{Q} 为该时刻的负荷值,kW。该负荷变量的值若为正则进行微增启运分配,该差值代表了第2阶段微增优化的分配依据,进而得到最终系统优化运行方案。

根据负荷值直接进行优化得到结果,从优化目标角度上看,本质上仍然是系统负荷总量分配方案优化,不满足对设备操作可行性的要求,负荷波动时各个设备需要逐时进行1次总量优化,而两级运

行策略可以让企业在隔日运行时优先将系统布置成第1级总量优化最佳运行方案,再根据逐时负荷波动进行第2级微增优化,这样减少了设备的调度次数,不需要对每个设备进行反复启停调节。

从全局上看,第1级保证了企业分布式供能系统全天相对高水平的盈利,第1级在将优化方案的实用性和可行性加以提升的同时可以更合理地进行设备间负荷调度,该两级优化策略具体模型如图3所示。

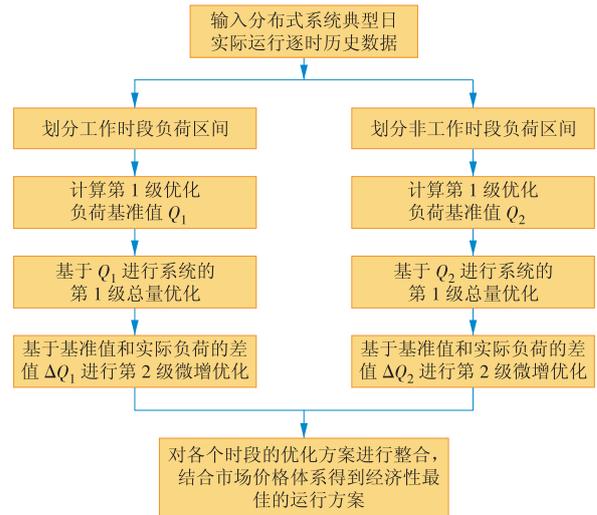


图3 两级策略优化模型

Fig. 3 Model of the two-level optimization strategy

通过典型日两级策略的实施,可以使全天的总收益达到一个理想值,全天总收益计算式为

$$S = \sum_{i=1}^x E_{ai} + \sum_{j=1}^y E_{bj}, \quad (14)$$

式中: E_{ai} 和 E_{bj} 为工作时段和非工作时段内系统逐时收益,元; x, y 为各时段包含的单位小时数,h; S 为全天总收益,元。

3 算例优化结果分析

系统建成后分布式供能系统的经济效益达到最佳,见表2。

表2 分布式供能系统计算各设备价格体系

Table 2 Price system for the equipment in the distributed energy supply system		
种类	单位	价格
天然气价	元/m ³	3.05
上网电价	元/(kW·h)	0.77
冷价	元/GJ	133.67
热价	元/GJ	157.93

不同策略下逐时调度的具体方案见表3,这里以夏季典型日为例,总量优化和微增优化均是基于

实际运行方案进行的,括号内的值为设备对应的负荷率百分数(1则代表设备以 100% 满负荷容量运行),A 和 B 分别代表联产设备中的内燃机溴化锂机组和分产设备中的电制冷机。

其中两级优化的第 2 级优化过程是基于基准负荷值下的总量优化方案,第 1 级总量优化

结果根据负荷基准值进行负荷分配,通过软件自带的遗传算法进行优化,结果为:工作时段为 4 台电制冷以 73% 负荷率运行制冷,非工作时段为 3 台电制冷以 75% 负荷率运行制冷,故优化方案中优先将系统布置成这种形式,再在这基础上进行第 2 级微增优化。

表 3 夏季典型日各时刻不同策略下的系统设备调度方案

Table 3 Scheduling scheme for the equipment at different time in typical summer days under different strategies

时段	实际运行方案	总量优化方案	微增优化方案	两级优化方案
09:00—11:00	1A(1)+6B(33%)	4B(60%)	1A(1)+6B(33%)(起始点)	3B(73%)+B(42%)
11:00—13:00	1A(1)+6B(36%)	4B(65%)	1A(1)+1A(40%)+6B(33%)	3B(73%)+B(64%)
13:00—15:00	2A(1)+6B(37%)	5B(63%)	2A(1)+1A(40%)+6B(36%)	4B(73%)+B(47%)
15:00—17:00	2A(1)+6B(38%)	5B(66%)	2A(1)+1A(40%)+6B(37%)	4B(73%)+B(60%)
17:00—19:00	1A(1)+4B(42%)	3B(67%)	5B(38%)	3B(73%)
19:00—21:00	1A(1)+4B(37%)	3B(64%)	4B(32%)	2B(75%)+B(66%)
21:00—23:00	1A(1)+4B(38%)	3B(65%)	1A(1)+4B(37%)	2B(75%)+B(67.5%)
23:00—01:00	1A(1)+4B(42%)	3B(67%)	1A(1)+4B(37%)+B(15%)	3B(75%)+B(15%)
01:00—03:00	1A(1)+4B(42%)	3B(67%)	1A(1)+4B(42%)	3B(75%)+B(15%)
03:00—05:00	1A(1)+4B(41%)	3B(66%)	1A(1)+4B(42%)	2B(75%)+B(74%)
05:00—07:00	1A(1)+4B(41%)	3B(66%)	1A(1)+4B(42%)	2B(75%)+B(73%)
07:00—09:00	1A(1)+4B(43%)	3B(68%)	1A(1)+4B(41%)+B(20%)	3B(75%)+B(15%)

由表 3 可知,总量优化方案在各时刻对系统设备运行进行了频繁启停和负荷容量调整,每一个时段内的配置方案不尽相同;微增优化和两级优化方案仅在上一时刻运行方案的基础上进行相应调整,大部分设备仍然保留了上一时段的出力情况,而通过对比冬季和过渡季各个运行方案同样可以得出两级优化可以有效提高系统逐时运行稳定可行性的结论。

将夏季典型日全天收益总和进行计算汇总,将时刻划分为工作时段和非工作时段,各优化方案每小时收益结果如图 4 所示,其中不同时段括号内数字代表典型日对应的不同时间段。

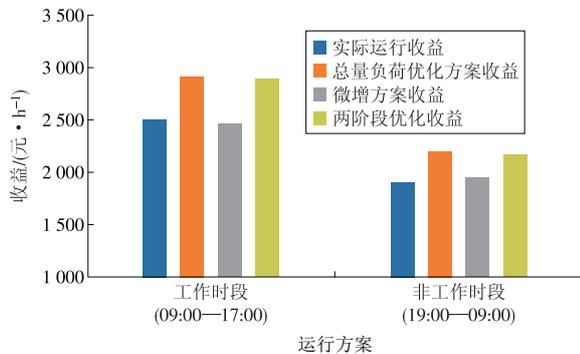


图 4 夏季典型日各策略下分时段优化收益与实际运行收益对比

Fig. 4 Comparison of hourly optimized revenue and actual operating revenue in summer days under different strategies

结果表明,总量优化方案总收益为 119 583 元,微增优化方案为 103 372 元,实际运行方案为 103 175 元,两级策略为 118 181 元,相比于仅使用微增优化策略以及实际运行策略,经济性方面有了显著提升。同理可以进一步得出不同季节典型日各个策略的具体收益,如图 5 所示。

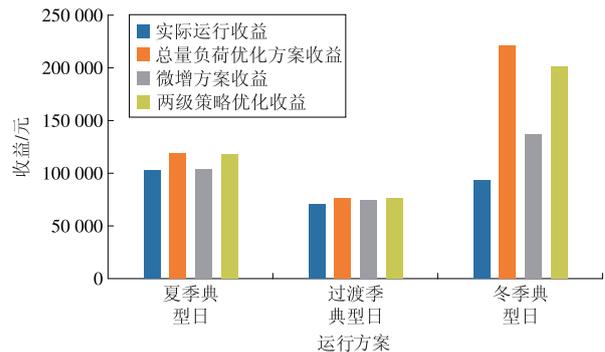


图 5 不同季节典型日在各策略下总收益对比

Fig. 5 Comparison of total revenue of typical days in different seasons under different strategies

由图 5 可知,过渡季由于处于旅游淡季冷热负荷需求较低,故收益也同样低于夏季和冬季,不同策略下的日收益区别不大,均在 75 000 元左右;冬季进行微增优化后日收益为 136 615 元,总量优化为 222 234 元,两级策略优化为 201 237 元。

从全年经济性来看,分布式供能系统实际运行方案年总收益为 3 081.3 万元,微增优化年总收益

为 3 549.9 万元,总量优化年总收益为 4 498.5 万元,两级优化策略下的年总收益为 4 280.1 万元。

4 结论

本文介绍了以内燃机为核心的双源分布式供能系统在运行中采用的不同优化策略,提出了一种新的两级运行优化策略。参考各季节冷热负荷历史数据,对分布式供能系统进行优化,得出了典型日全天在不同优化策略下的系统运行经济性和操作可行性 2 个方面的最优方案,得出以下结论。

(1)采用微增优化策略优化后,方案所带来的系统年总收益相对于实际运行提高 15.2%,低于总量优化方案;采用两级优化策略,最终年总收益相比于实际运行方案提高 38.9%,经济性上明显优于微增优化。

(2)采用总量优化方案会存在多台供能设备的启停,且各台设备的负荷容量相对于上一时刻也不尽相同;两级优化策略逐时调度围绕少数设备的微增展开,该策略使得实际运行中对各个设备的调度次数明显减少,运行操作可行性大为提高。

(3)在用户侧负荷值较大的时间段,相比于实际运行和微增优化收益,实施两级优化后分布式供能较负荷值小的时间段系统运行收益的提升幅度更大,两级优化策略实现了分布式供能系统经济性和操作可行性上的统筹最优。

参考文献:

- [1]姜鑫民,田磊,刘琪,等.我国非常规天然气发展战略研究[J].中国能源,2017,39(6):8-11,7.
JIANG Xinmin, TIAN Lei, LIU Qi, et al. Study on the development strategy of unconventional natural gas in China [J]. China Energy, 2017, 39(6): 8-11, 7.
- [2]张晓晖,陈钟颀.热电冷联产系统的能耗特性[J].中国电机工程学报,2007,27(5):93-98.
ZHANG Xiaohui, CHEN Zhongxin. Energy consumption performance of combined heat cooling and power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(5): 93-98.
- [3]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.
- [4]徐静静,张珍,杨竹,等.天然气分布式能源在某机场项目中的设计应用[J].华电技术,2016,38(3):71-73,76,80.
XU Jingjing, ZHANG Zhen, YANG Zhu, et al. Design and application of natural gas distributed energy in an airport project [J]. Huadian Technology, 2016, 38(3): 71-73, 76, 80.
- [5]刘浩.多能互补与余热梯级利用的冷热电联产系统集成[D].北京:中国科学院研究生院(工程热物理研究所),2015.
- [6]谷永刚,王琨,张波.分布式发电技术及其应用现状[J].电网与清洁能源,2010,26(6):38-43.
GU Yonggang, WANG Kun, ZHANG Bo. Distributed generation technology and its application status [J]. Power Grid and Clean Energy, 2010, 26(6): 38-43.
- [7]卢胤龙,韩明新,任洪波,等.多能互补分布式能源系统优化设计研进展[J].上海电力学院学报,2018,34(3):229-235.
LU Yinlong, HAN Mingxin, REN Hongbo, et al. Research progress on optimal design of multi energy complementary distributed energy system [J]. Journal of Shanghai Electric Power University, 2018, 34(3): 229-235.
- [8]崔琼,黄磊,舒杰,等.多能互补分布式能源系统容量配置和优化运行研究现状[J].新能源进展,2019,7(3):263-270.
CUI Qiong, HUANG Lei, SHU Jie, et al. Research status of capacity allocation and optimal operation of multi energy complementary distributed energy system [J]. New Energy Progress, 2019, 7(3): 263-270.
- [9]孔丽丽.多能互补分布式能源系统优化分析[J].低碳世界,2019,9(12):90-91.
KONG Lili. Optimization analysis of multi energy complementary distributed energy system [J]. Low Carbon World, 2019, 9(12): 90-91.
- [10]杨向劲,由世俊,刘晶.单纯供热负荷下热电联产与分产的能耗比较[J].煤气与热力,2003(2):76-79.
YANG Xiangjin, YOU Shijun, LIU Jing. Comparison of energy consumption of cogeneration and separate generation under simple heating load [J]. Gas and Heat, 2003(2): 76-79.
- [11]吴强,袁言周,范方.内燃机分布式供能企业经济运行研究[J].上海电力大学学报,2020,36(3):307-311.
WU Qiang, YUAN Yanzhou, FAN Fang. Research on economic operation of internal combustion engine distributed energy supply enterprises [J]. Journal of

- Shanghai Electric Power University, 2020, 36 (3): 307-311
- [12] 陈云, 汤放奇, 刘阳升, 等. 分布式冷热电多联供系统的经济运行[J]. 电力科学与技术学报, 2013, 28 (1): 56-62.
CHEN Yun, TANG Fangqi, LIU Yangsheng, et al. Economic operation of distributed CCHP system [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2013, 28(1): 56-62
- [13] 丁明, 包敏, 吴红斌. 分布式供能系统的经济调度[J]. 电力科学与技术学报, 2008(1): 13-17.
DING Ming, BAO min, WU Hongbin. Economic dispatch of distributed energy supply system [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2008(1): 13-17.
- [14] 胡慧忠. 区域分布式能源系统的运行优化研究[J]. 上海节能, 2019(3): 178-184.
HU Huizhong. Research on operation optimization of regional distributed energy system [J]. Shanghai Energy Conservation, 2019(3): 178-184.
- [15] 崔亚. 分布式能源系统综合评估和优化配置模型[J]. 煤矿机械, 2018, 39(2): 142-145.
CUI Ya. Comprehensive evaluation and optimal allocation model of distributed energy syst [J]. Coal Mining Machinery, 2018, 39(2): 142-145.
- [16] 钱国明, 丁泉, 黄超, 等. 基于价值链视角的发电企业参与综合能源服务策略[J]. 华电技术, 2021, 43 (4): 28-33.
QIAN Guoming, DING Quan, HUANG Chao, et al. Integrated energy service strategy with participation of power generation enterprises from the perspective of value chain [J]. Huadian Technology, 2021, 43 (4): 28-33.
- [17] 孙思宇, 于成琪, 孙涛, 等. 冷热电三联供分布式能源系统研究进展[J]. 华电技术, 2019, 41(11): 26-31, 56.
SUN Siyu, YU Chengqi, SUN Tao, et al. Advance in study on CCHP distributed energy system [J]. Huadian Technology, 2019, 41(11): 26-31, 56.

(本文责编: 齐琳)

作者简介:

姚哲豪(1996), 男, 在读硕士研究生, 从事分布式供能系统模拟与运行优化方面的工作, 1967538909@qq.com;

郑莆燕*(1972), 女, 副教授, 工学博士, 从事热力系统分析评价优化方面的工作, ty33@163.com;

袁言周(1984), 男, 工程师, 工学硕士, 从事燃气电厂运行管理方面的工作。

*为通信作者。