

A 级数据中心综合能源系统多目标优化设计和调度

刘成运, 孟超, 景锐, 杨琪, 程其进

(厦门大学能源学院, 福建省厦门市 361102)

摘要: 采用分布式综合能源系统取代数据中心的传统供能系统, 是降低数据中心运行费用的有效措施。考虑 A 级数据中心的供能可用度, 设计了一种分布式综合能源系统, 并基于混合整数非线性规划方法, 建立了综合经济和环境效益的多目标优化设计和调度模型, 选取 ϵ -约束法对相互制约的多目标问题进行处理, 在通用代数建模系统 (GAMS) 中建模并调用 LINDOGLOBAL 求解器进行优化求解。采用多维偏好分析线性规划决策法从非劣解集中选出最终解, 并通过逼近于理想解的排序方法进行验证。算例结果表明, 优化后的分布式综合能源系统能够保证 A 级数据中心的供能可用度, 同时在降低年总费用和减排二氧化碳方面均具优势。

关键词: 数据中心; 分布式综合能源系统; 混合整数非线性规划; 多目标优化; 决策

0 引言

近年来, 随着互联网技术的发展, 数据中心的规模和数量持续高速增长。2015 年全球数据中心年耗电量约占世界总耗电量的 1.3%^[1], 预计 2020 年将超过 8%, 而碳排放量有望达到 2 059 亿 t^[2], 故如何实现数据中心清洁、高效且成本可控的供能日益受到关注。另一方面, 数据中心中 IT 设备连续运行对供能系统提出较高要求, 通常采用可用度来衡量数据中心的性能。美国 TIA-942-A-2014《数据中心电信基础设施标准》将可用度用于数据中心分级^[3], 并提出容错级数据中心的可用度为 99.995%; 而国内缺乏对数据中心可用度的研究, 国家相关标准也未明确容错级 (A 级) 数据中心的可用度。

随着分布式能源的蓬勃发展, 能源互联网已成为能源行业的研究热点^[4-6]。作为能源互联网的重要组成部分, 分布式综合能源系统 (DIES)^[7] 采用冷热电三联供 (CCHP)^[8]、光伏发电等技术, 将传统的电、热、天然气供能系统与可再生能源协同规划, 促进了清洁能源的消纳与系统综合效率的提升^[9]。采用 DIES 的数据中心, 实现了能源的本地生产和运行成本的降低, 获得了越来越多的关注^[10]。文献 [11] 建立了基于燃料电池的 CCHP 以定功率为数

据中心供能的优化模型, 得出该系统最高可降低 47% 的运行成本和 20% 的碳排放。然而, 该研究假定数据中心以定负荷运行且缺乏实际运行数据, 与工程应用存在一定偏差。文献 [12] 从能源、环境和经济三个方面评估了 CCHP 的性能, 并指出数据中心可以充分发挥 CCHP 的优势。但遗憾的是上述文献均未考虑可再生能源的利用。

在 DIES 优化设计与运行方面, 文献 [13] 提出了基于非合作博弈的 DIES 优化模型及求解方法, 实现可再生能源更好的消纳, 并获得较好的经济效益。文献 [14] 采用场景分析法对可再生能源的随机性进行建模, 并建立了包含能源转换和存储的 DIES 优化模型。这些研究的重点在于 DIES 的建模与优化运行, 并未涉及数据中心的用能与技术特点。

由上述文献可知, 目前考虑数据中心技术特点的 DIES 优化研究较少, 而针对数据中心的 DIES 进行经济和环境效益等多目标综合优化的研究亦不多见。因此, 有必要针对考虑数据中心技术特点的 DIES 多目标优化设计与决策问题进行深入研究。

本文提出一种针对 A 级数据中心的 DIES 设计和调度联合优化决策方法。首先, 基于混合整数非线性规划 (MINLP) 建立了设计和调度联合优化模型。然后, 采用 ϵ -约束法对多目标问题进行处理, 并采用多维偏好分析线性规划决策法 (LINMAP) 和逼近于理想解的排序方法 (TOPSIS) 进行决策, 选出一个综合最优设计与运行的方案。最后, 通过算例分析验证了优化模型和优化决策方法的有效性。

收稿日期: 2018-07-31; 修回日期: 2018-12-16。

上网日期: 2019-00-00。

国家自然科学基金资助项目 (51876181); 国家重点研发计划资助项目 (2016YFE0102300-09)。

1 数据中心供能系统

1.1 传统供能系统

数据中心全年具有稳定的电能和冷能需求,夏季有数据机房供冷和办公区供冷等供冷需求,冬季则有数据机房供冷和办公区供暖等需求。A级数据中心对供电和供冷的可用度要求较高,GB 50174—2017《数据中心设计规范》提出A级数据中心的供能系统宜按容错配置^[15]。传统供能系统(CES)主要包含两路市电、备用电源、两套低压配电、冗余不间断电源(UPS)、两路机柜配电和两套离心式制冷机组。由电网直接供电以满足电需求,采用离心式制冷机组制冷以满足冷需求。CES的电能主要来源于发电厂,目前中国的火力发电的发电效率约为39.3%,线路损失率约为6.64%^[16],因此CES的一次能源利用效率较低。

1.2 DIES

在CES的基础上,本文设计了一套基于光伏、CCHP和市电协同供能的DIES,主要包含光伏、一路市电、一套CCHP、备用电源、两路低压配电、冗余UPS、储能电池、储冷单元及两路机柜配电。采用光伏、CCHP、电网和储能电池协同为数据中心供电,由离心式制冷机组、吸收式制冷机组和储冷单元联合供冷。储能电池与储冷单元在DIES中可以发挥缓冲器和聚合器的关键作用,同时提高了系统的供能可用度。以燃气内燃机(GE)为原动机的CCHP发电效率可达43%,热输出效率可达44.2%,因此DIES可以显著提高一次能源利用效率。DIES及CES能量流如图1所示。

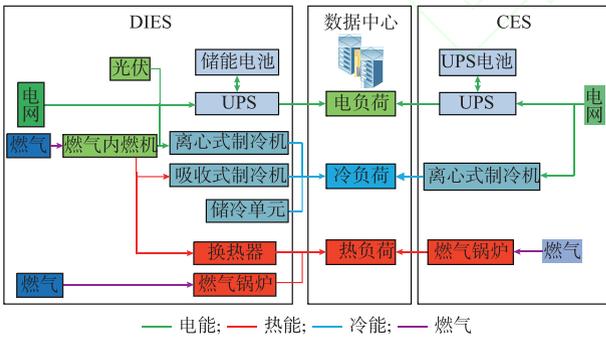


图1 DIES及CES能量流示意图

Fig. 1 Energy flow illustration of DIES and CES

2 多目标优化模型

2.1 目标函数

本文从经济和环境两方面建立优化目标,以实现DIES的综合性能优化。具体目标函数如下。

目标1为DIES的年总费用 F_{ATC} 最低,即

$$F_{ATC} = \min(F_{inv} + F_{gas} + F_m + F_g) \quad (1)$$

式中: F_{inv} 为年等额投资成本; F_{gas} 为年燃料费用; F_m 为年维护费用; F_g 为年购电费用。

年等额投资成本的表达式为:

$$F_{inv} = f_{cr} \sum_{e=1}^I C_e p_{inv,e} \quad (2)$$

式中: I 为设备总数; C_e 为设备 e 的优化装机容量; $p_{inv,e}$ 为设备 e 的单位容量投资成本; f_{cr} 为资本回收因子,如式(3)所示。

$$f_{cr} = \frac{i}{1 - (1+i)^{-n}} \quad (3)$$

式中: i 为利率; n 为设备的生命周期。

年燃料费用的表达式为:

$$F_{gas} = E_{gas} p_{gas} \quad (4)$$

式中: p_{gas} 为天然气的单位热值价格; E_{gas} 为DIES全年天然气使用量。

$$E_{gas} = \sum_{s=1}^S \sum_{h=1}^D \frac{P_{GE,s,h}}{\eta_{GE,s,h}} + \frac{H_{B,s,h}}{\eta_B} \quad (5)$$

式中: S 为夏季、冬季和过渡季的天数; D 为典型日设备运行小时数; $P_{GE,s,h}$ 和 $\eta_{GE,s,h}$ 分别为GE在 s 季节第 h 小时的发电功率和发电效率; $H_{B,s,h}$ 为燃气锅炉在 s 季节第 h 小时的产热功率; η_B 为燃气锅炉热效率。

年维护费用的表达式为:

$$F_m = \sum_{s=1}^S \sum_{h=1}^D \sum_{e=1}^I P_{e,s,h} p_{m,e} \quad (6)$$

式中: $P_{e,s,h}$ 为设备 e 在 s 季节第 h 小时的功率; $p_{m,e}$ 为设备 e 的单位维护费用。

年购电费用的表达式为:

$$F_g = \sum_{s=1}^S \sum_{h=1}^D \delta_{g,s,h} E_{g/b,s,h} p_{g/b,h} - (1 - \delta_{g,s,h}) E_{g/o,s,h} p_{g/o,h} \quad (7)$$

式中: $E_{g/b,s,h}$ 为在 s 季节第 h 小时电网供电功率; $E_{g/o,s,h}$ 为DIES在 s 季节第 h 小时馈入电网的功率; $p_{g/b,h}$ 和 $p_{g/o,h}$ 分别为购电和售电价格; $\delta_{g,s,h}$ 为二进制变量,避免系统既售电又购电。

目标2为年碳排放量 T_{ACF} 最低,即

$$\min T_{ACF} = \sigma_{grid} \sum_{s=1}^S \sum_{h=1}^D E_{g/b,s,h} + \sigma_{gas} E_{gas} \quad (8)$$

式中: σ_{grid} 和 σ_{gas} 分别为电网和天然气的碳排放因子。

2.2 约束条件

2.2.1 能量平衡约束

1) 电负荷平衡约束

$$P_{de,s,h} = P_{PV,s,h} + P_{GE,s,h} + P_{BA,s,h} + P_{g,s,h} - P_{CC,s,h} \quad (9)$$

式中: $P_{de,s,h}$ 为数据中心IT设备在 s 季节第 h 小时

的电负荷; $P_{PV,s,h}$ 为光伏发电功率; $P_{BA,s,h}$ 为储能电池与系统的交换功率; $P_{g,s,h}$ 为系统与电网的交换功率; $P_{CC,s,h}$ 为离心式制冷机组的电功率。

2) 冷负荷平衡约束

$$Q_{de,s,h} = Q_{AC,s,h} + \eta_{CC} P_{CC,s,h} + Q_{ST,s,h} \quad (10)$$

式中: $Q_{de,s,h}$ 为数据中心在 s 季节第 h 小时的冷负荷; $Q_{AC,s,h}$ 为吸收式制冷机组的制冷功率; η_{CC} 为离心式制冷机组的能效比; $Q_{ST,s,h}$ 为系统与蓄冷单元交换的功率。

3) 热负荷平衡约束

$$H_{de,s,h} = H_{B,s,h} + \varphi P_{GE,s,h} - \frac{Q_{AC,s,h}}{\eta_{AC}} \quad (11)$$

式中: $H_{de,s,h}$ 为数据中心在 s 季节第 h 小时的热负荷; φ 为GE的热电比; η_{AC} 为吸收式制冷机组的能效比。

2.2.2 GE运行约束

$$P_{GE,s,h} = \delta_{GE,s,h} R_{GE,s,h} C_{GE} \quad (12)$$

式中: $\delta_{GE,s,h}$ 为GE的运行状态,1为运行,0为停机; $R_{GE,s,h}$ 为GE的负荷率; C_{GE} 为GE的优化装机容量。

由于GE的负荷率和发电效率关系是非线性的,本文对其进行分段线性化^[17]处理,如附录A图A1所示,按式(13)计算其发电效率。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{t=1}^n \mu_{GE,t} \leq 1 \\ \mu_{GE,t} R_{GE,t} \leq R_{GE,s,h,t} \leq \mu_{GE,t} R_{GE,t+1} \\ R_{GE,s,h} = \sum_{t=1}^n R_{GE,s,h,t} \\ d_t = \frac{\eta_{GE,t+1} - \eta_{GE,t}}{R_{GE,t+1} - R_{GE,t}} \\ \eta_{GE,s,h} = \sum_{t=1}^n \mu_{GE,t} \eta_{GE,t} + d_{GE,t} (R_{GE,s,h,t} - \mu_{GE,t} R_{GE,t}) \end{array} \right. \quad (13)$$

式中: n 为GE效率曲线的分段数; $\mu_{GE,t}$ 为二进制变量,判断GE负荷率是否在第 t 条线段内; d_t 为第 t 条线段的斜率; $\eta_{GE,t+1}$ 和 $R_{GE,t+1}$ 分别为 $t+1$ 处GE的发电效率和负荷率; $\eta_{GE,t}$ 和 $R_{GE,t}$ 分别为 t 处GE的发电效率和负荷率。

2.2.3 储能约束

1) 储电约束

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{BA,s,h} = P_{BA/d,s,h} - P_{BA/c,s,h} \\ \alpha_{BA/d,s,h} + \alpha_{BA/c,s,h} \leq 1 \\ 0 \leq P_{BA/d,s,h} \leq \alpha_{BA/d,s,h} P_{BA/d,max} \\ 0 \leq P_{BA/c,s,h} \leq \alpha_{BA/c,s,h} P_{BA/c,max} \\ S_{min} \leq S_{s,h} \leq S_{max} \\ S_{s,h} C_{BA} = S_{s,h-1} C_{BA} - \frac{P_{BA/d,s,h}}{\eta_{BA/d}} + \eta_{BA/c} P_{BA/c,s,h} \end{array} \right. \quad (14)$$

式中: $P_{BA/c,s,h}$ 和 $P_{BA/d,s,h}$ 分别为储能电池在 s 季节第 h 小时的充电和放电功率; $\alpha_{BA/c,s,h}$ 和 $\alpha_{BA/d,s,h}$ 分别为储能电池的充电和放电状态; $P_{BA/c,max}$ 和 $P_{BA/d,max}$ 分别为储能电池的最大充电和放电功率; S_{min} 和 S_{max} 分别为储能电池的最小和最大荷电状态; $S_{s,h}$ 和 $S_{s,h-1}$ 分别为储能电池在第 h 和 $h-1$ 小时的荷电状态; C_{BA} 为储能电池的优化设计容量; $\eta_{BA/c}$ 和 $\eta_{BA/d}$ 分别为储能电池的充电和放电效率。

由于储冷约束与储电约束类似,故不再赘述。

2.2.4 设备装机容量约束

$$C_{e,min} \leq C_e \leq C_{e,max} \quad (15)$$

式中: $C_{e,max}$ 和 $C_{e,min}$ 分别为各设备的装机容量上限和下限。

2.2.5 设备负荷率约束

$$R_{e,min} \leq R_{e,s,h} \leq R_{e,max} \quad (16)$$

式中: $R_{e,max}$ 和 $R_{e,min}$ 分别为各设备的负荷率上限和下限。

2.3 关键指标

选取数据中心的可用度和电源使用效率(PUE)为关键指标,以评估DIES性能,具体如下。

2.3.1 可用度

供电子系统的可用度 A_P 的表达式为:

$$A_P = [1 - (1 - A_G)(1 - A_{BA})][1 - (1 - A_{SP})^2] \quad (17)$$

式中: A_G 为输入电源部分的可用度; A_{BA} 为储能电池的可用度; A_{SP} 为单母线供电的可用度。

供冷子系统的可用度 A_C 的表达式为:

$$A_C = A_{CU} A_{AC} \quad (18)$$

式中: A_{CU} 为制冷部分的可用度; A_{AC} 为空调部分的可用度。

2.3.2 PUE

采用CES供能的数据中心,其PUE表达式为:

$$U_{CES} = \frac{P_g}{P_{de}} \quad (19)$$

式中: P_g 为系统总购电量; P_{de} 为IT设备总耗电量。

采用DIES供能时,其PUE由下式计算:

$$U_{DIES} = \frac{P_g + P_{PV} + \mu E_{gas}}{P_{de}} \quad (20)$$

式中: P_{PV} 为光伏全年发电量; μ 为能源转换系数,取值为0.4。

3 多目标优化与决策方法

为求解建立的多目标优化模型,本文首先利用 ϵ -约束法^[18]得到该优化模型的非劣解集,然后通过LINMAP和TOPSIS^[19]确定非劣解集中的最优解。首先,通过单目标优化确定各单目标的理想解

和负理想解。然后,将其中一个目标转化为不等式约束,另一个目标选为基本目标,从而使多目标转化为单目标。所建立的多目标优化模型如式(21)或式(22)所示。

$$\begin{cases} \min F_{\text{ATC}} \\ \text{s. t. } T_{\text{ACF}} \leq \epsilon_1 \\ A(\mathbf{x}) \leq 0 \\ B(\mathbf{x}) = 0 \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} \min T_{\text{ACF}} \\ \text{s. t. } F_{\text{TAC}} \leq \epsilon_2 \\ A(\mathbf{x}) \leq 0 \\ B(\mathbf{x}) = 0 \end{cases} \quad (22)$$

式中: ϵ_1 和 ϵ_2 分别为目标 T_{ACF} 和 F_{ATC} 的上限值; $A(\mathbf{x}) \leq 0$ 代表了模型中的所有不等式约束; $B(\mathbf{x}) = 0$ 代表了所有等式约束。

本文在高级建模软件 GAMS24.0^[20] 建立 MINLP 模型,并调用先进的商业求解器 LINDOGLOBAL 来求解优化模型。LINDOGLOBAL 是一种针对 MINLP 问题提供成熟全局解决方案的求解器,得到了广泛应用。进而利用 ϵ -约束法得到非劣解集,其构成的帕累托曲线如附录 A 图 A2 所示。

采用 LINMAP 和 TOPSIS 两种决策方法来实现该双目标优化问题的决策,互为验证。首先,将帕累托曲线上的非劣解进行无量纲化处理,即

$$\nu_{i,j}^{s,\tan} = \frac{\nu_{i,j} - \min(\nu_{i,j})}{\max(\nu_{i,j}) - \min(\nu_{i,j})} \quad (23)$$

式中: $\nu_{i,j}$ 为第 j 个目标的第 i 个非劣解; $\nu_{i,j}^{s,\tan}$ 为非劣解的无量纲量。

然后,采用 LINMAP 和 TOPSIS 两种决策方法确定双目标优化问题的最优解。

1) LINMAP

首先对各非劣解进行比较,以获得理想解的位置,然后计算各非劣解到理想解的欧几里德距离 S_i^+ 。 S_i^+ 最小的非劣解,即为双目标最优解。

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^2 (\nu_{i,j}^{s,\tan} - V_j^+)^2} \quad (24)$$

式中: i 为非劣解的编号; j 为目标的编号; V_j^+ 为理想解的位置。

2) TOPSIS

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^2 (\nu_{i,j}^{s,\tan} - V_j^-)^2} \quad (25)$$

式中: V_j^- 为负理想解的位置; S_i^- 为非劣解到负理想解的欧几里德距离。

$$R_{a,i} = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (26)$$

式中: $R_{a,i}$ 为非劣解与理想解的相对接近度, $R_{a,i}$ 值

最大的非劣解,即为双目标最优解。

4 算例分析

4.1 基础数据

以杭州某 A 级数据中心为例验证上述 DIES 设计和调度优化模型,该数据中心 3 个典型日的能源需求,如附录 A 图 A3 所示。通过 PV_{sys} 软件仿真得到杭州 3 个典型日的 10 kW 光伏出力曲线,见附录 A 图 A4。

本项目设计生命周期为 10 年,利率为 6%。天然气价格为 3.27 元/m³,杭州分时电价见附录 A 图 A4,碳排放因子见附录 A 表 A1。基于数据中心的用能特点,本文采用发电效率较高的 GE 作为 CCHP 的原动机。为保证数据中心的可用度,DIES 配置的储能电池和储冷单元,在电力和制冷中断的情况下,可以确保数据中心运行 30 min。DIES 主要设备的经济参数见附录 A 表 A2^[21-22],主要设备的可用度^[23]和技术参数见表 A3 和表 A4^[24]。

4.2 结果与分析

本文利用可靠性框图法计算了 DIES 供电子系统与供冷子系统的可用度,如附录 A 图 A5 所示。由附录 A 表 A5 可见,DIES 的可用度达到了 TIA-942-A-2014 标准中容错级数据中心的可用度为 99.995% 的要求且优于 CES 的可用度。

通过多目标优化得到的非劣解构成了帕累托曲线如图 2 所示,其中字母 A 和 B 分别表示 CES 和 DIES,数字 1 和 2 分别表示以年碳排放量最低和年总费用最低为目标的单目标最优解,而数字 3 表示通过 LINMAP 和 TOPSIS 决策方法确定的双目标最优解。由图 2 可以看出 DIES 的经济性和环保性之间存在相互制约的关系,以年碳排放量最低为目标时,其相应的年总费用较高。采用 LINMAP 和 TOPSIS 两种决策方法对帕累托曲线上的非劣解进行处理分别得到 S_i^+ 和 $R_{a,i}$,如附录 A 表 A6 所示。两种决策方法分别以 S_i^+ 的最小值和 $R_{a,i}$ 的最大值为决策依据,均选出方案 B3 为双目标最优。

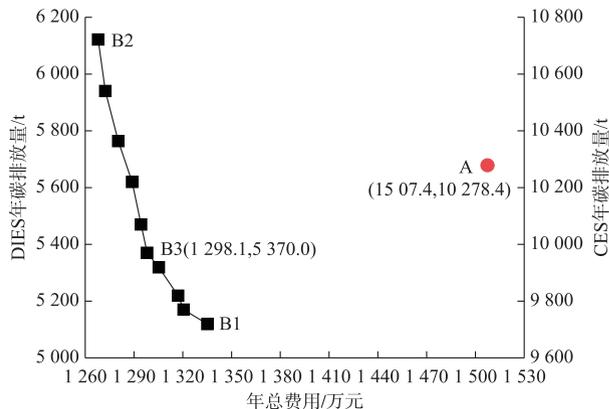


图 2 优化结果的帕累托曲线

Fig. 2 Pareto curve of optimization results

两种供能系统的优化设计方案见表 1。与方案 A 相比,方案 B1, B2, B3 的储能电池和储冷单元的装机容量都有所增加;同时,DIES 通过回收 GE 的余热为办公区域供暖,故未安装燃气锅炉。方案 B1 中光伏装机容量达到安装上限,同时提高了储冷单元和储能电池的装机容量,而变压器和离心式制冷机组的装机容量明显减少。方案 B1 通过提高清洁但成本较高的能源技术的装机容量和降低传统能源的利用实现了碳排放的最小化。方案 B2 通过增大变压器和离心式制冷机组的装机容量以协助 CCHP 机组高效运行,同时降低了光伏、储冷单元和储能电池的装机容量,实现了系统年总费用的最小化。方案 B3 中设备装机容量总体上介于方案 B1 和 B2 之间,实现了系统经济性与环保性的综合最优。

表 1 两种供能系统的优化设计方案
Table 1 Optimized design schemes of two energy supply systems

方案	光伏/kW	GE/kW	柴油发电机/kW	变压器/kW	燃气
A	0	0	1 900	3 566	
B1	400	1 392	1 900	1 905	
B2	23	1 402	1 900	2 691	
B3	400	1 356	1 900	2 551	

图 3 所示为方案 B3 的夏季典型日出力优化结果,可以看出 DIES 在电价低谷时购电,既能保证 CCHP 机组的负荷率,实现了光伏、电网和 CCHP 的协同供电,同时又实现了吸收式制冷机组和离心式制冷机组的合理供冷分配。

两种供能系统的年总费用和 PUE 如图 4 所示,能源费用占系统年总费用的比例较高,CES 的购电费用约占年总费用的 83%,而 DIES 的 3 种方案燃料费用分别占年总费用的 71%,62%,67%。与方案 A 相比,方案 B1, B2, B3 的年总费用分别降低 10.3%,14.8%,12.8%,表明 DIES 具有较大的节能潜力。同时可以发现采用 DIES 后,数据中心的 PUE 由二级 ($1.6 < PUE \leq 1.8$) 提升为一级 ($1 < PUE \leq 1.6$)^[25]。

图 5 所示为两种供能系统的年碳排放量,可以看出 CES 的碳排放主要来源于电网购电,而 DIES 的碳排放主要由燃气燃烧产生;DIES 的 3 种方案较 CES 分别减排二氧化碳 50.2%,40.4% 和 47.8%,体现了 DIES 的环保优势。

5 结语

本文提出了适用于 A 级数据中心的 DIES,以年总费用和年碳排放量为目标,建立了多目标优化

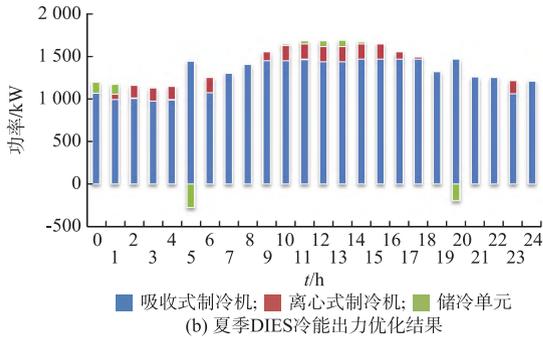
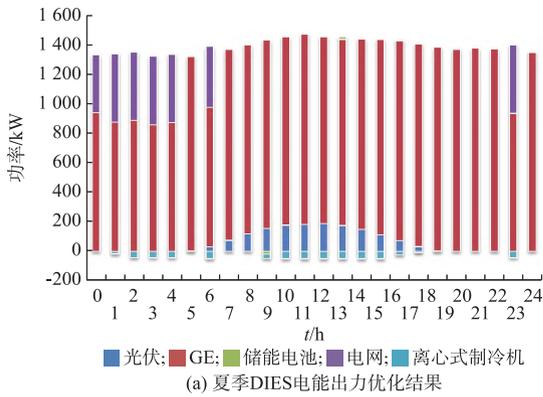


图3 夏季 DIES 出力优化结果

Fig. 3 Optimal output results of DIES in summer

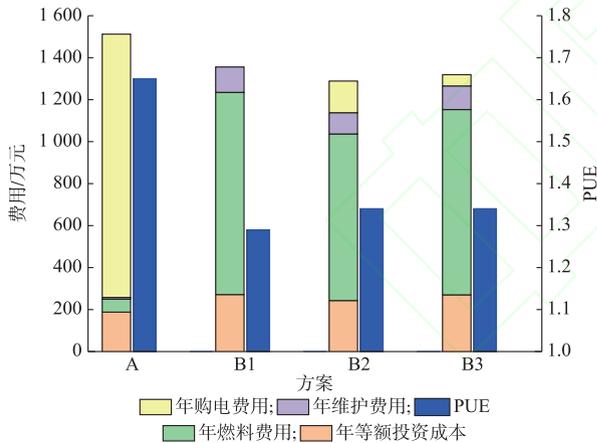


图4 两种系统的年总费用和 PUE

Fig. 4 Annual total cost and PUE for two systems

设计和调度模型。通过杭州某 A 级数据中心负荷数据验证了多目标优化和决策方法的有效性和可行性。优化结果表明：DIES 达到了 TIA-942-A-2014 标准对容错级数据中心供能可用度的要求，使数据中心的 PUE 得到提升，在经济与环境效益上均优于 CES。

本文侧重于研究小型 DIES 的优化设计和调度，多区域综合能源系统协同规划和多能优化运行将成为下一步的研究方向。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

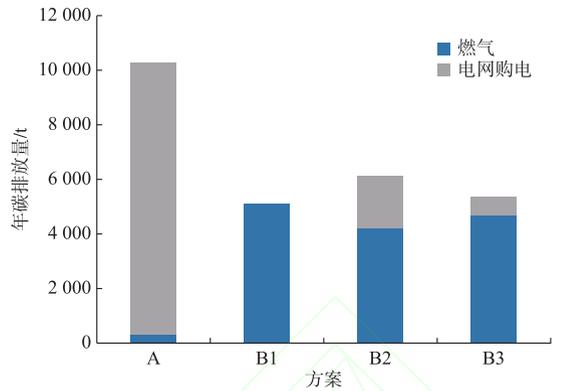


图5 两种系统的年碳排放量

Fig. 5 Annual carbon footprint for two systems

参考文献

[1] VASUDEVAN M, TIAN Yuchu, TANG Maolin, et al. Profile-based application assignment for greener and more energy-efficient data centers[J]. Future Generation Computer Systems, 2017, 67: 94-108.

[2] 任淑霞. 基于服务器集群预留机制的高级云体系架构研究[D]. 新乡: 河南师范大学, 2012. REN Shuxia. Research on high-level cloud architecture based on cloud server cluster reserve mechanism[D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2012.

[3] Telecommunication Industry Association. Telecommunications infrastructure standard for data centers: TIA-942-A-2014[S]. Arlington: Telecommunications Industry Association Standards and Engineering Publications, 2014.

[4] 吴聪, 唐巍, 白牧可, 等. 基于能源路由器的用户侧能源互联网规划[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(4): 20-28. DOI: 10.7500/AEPS20160802010. WU Cong, TANG Wei, BAI Muke, et al. Energy router based planning of Energy Internet at user side[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4): 20-28. DOI: 10.7500/AEPS20160802010.

[5] 薛飞, 李刚. 能源互联网的网络化能源集成探讨[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 9-16. XUE Fei, LI Gang. Discussion on networking energy integration for Energy Internet[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 9-16.

[6] 刘敦楠, 唐天琦, 杨建华, 等. 面向能源互联网的微平衡调度交易设计[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(10): 1-8. DOI: 10.7500/AEPS20160728017. LIU Dunnan, TANG Tianqi, YANG Jianhua, et al. Energy Internet based micro balance dispatching and trading design[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(10): 1-8. DOI: 10.7500/AEPS20160728017.

[7] 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.

[8] 何桂雄, 黄子硕, 闫华光, 等. 燃气三联供-热泵容量优化匹配分析方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 25-29. DOI: 10.7500/

- AEPS20170905007.
- HE Guixiong, HUANG Zishuo, YAN Huaguang, et al. Analytical method for capacity matching optimization of CCHP-HP[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 25-29. DOI: 10.7500/AEPS20170905007.
- [9] 马溪原,郭晓斌,雷金勇.面向多能互补的分布式光伏与气电混合容量规划方法[J].电力系统自动化,2018,42(4):55-63. DOI: 10.7500/AEPS20170602002.
- MA Xiyuan, GUO Xiaobin, LEI Jinyong. Capacity planning method of distributed PV and P2G in multi-energy coupled system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 55-63. DOI: 10.7500/AEPS20170602002.
- [10] 宋杰,孙宗哲,刘慧,等.混合供电数据中心能耗优化研究进展[J/OL].计算机学报:1-19[2018-09-11].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1826.TP.20180514.2323.018.html.
- SONG Jie, SUN Zongzhe, LIU Hui, et al. Research advance on energy consumption optimization of hyper-powered data center[J/OL]. Chinese Journal of Computers: 1-19[2018-09-11]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1826.TP.20180514.2323.018.html.
- [11] GUIZZI G L, MANNO M. Fuel cell-based cogeneration system covering data centers' energy needs[J]. Energy, 2012, 41(1): 56-64.
- [12] XU Donghao, QU Ming. Energy, environmental, and economic evaluation of a CCHP system for a data center based on operational data[J]. Energy and Buildings, 2013, 67(4): 176-186.
- [13] 林凯骏,吴俊勇,郝亮亮,等.基于非合作博弈的冷热电联供微能源网运行策略优化[J].电力系统自动化,2018,42(6):25-32. DOI:10.7500/AEPS20170714006.
- LIN Kaijun, WU Junyong, HAO Liangliang, et al. Optimization of operation strategy for micro-energy grid with CCHP systems based on non-cooperative game [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 25-32. DOI: 10.7500/AEPS20170714006.
- [14] 刘涤尘,马恒瑞,王波,等.含冷热电联供及储能的区域综合能源系统运行优化[J].电力系统自动化,2018,42(4):113-120. DOI:10.7500/AEPS20170512002.
- LIU Dichen, MA Hengrui, WANG Bo, et al. Operation optimization of regional integrated energy system with CCHP and energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 113-120. DOI: 10.7500/AEPS20170512002.
- [15] 中华人民共和国工业和信息化部.数据中心设计规范:GB 50174—2017[S].北京:中国计划出版社,2017.
- Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Code for design of data centers: GB 50174—2017[S]. Beijing: China Planning Press, 2017.
- [16] XIE Baichen, WANG Jieyong, MA Jiajun, et al. Efficiency evaluation of China's provincial power systems based on the dynamic network slacks-based measure model[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 174: 650-660.
- [17] MAJEWSKI D E, WIRTZ M, LAMPE M, et al. Robust multi-objective optimization for sustainable design of distributed energy supply systems[J]. Computers & Chemical Engineering, 2017, 102: 26-39.
- [18] 郑能,丁晓群,郑程拓,等.含高比例光伏的配电网有功-无功功率多目标协调优化[J].电力系统自动化,2018,42(6):33-39. DOI:10.7500/AEPS20170708001.
- ZHENG Neng, DING Xiaoqun, ZHENG Chengtuo, et al. Multi-objective coordinated optimization of active and reactive power for distribution network integrated with high proportion of photovoltaic generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 33-39. DOI: 10.7500/AEPS20170708001.
- [19] SAYYAADI H, MEHRABIPOUR R. Efficiency enhancement of a gas turbine cycle using an optimized tubular recuperative heat exchanger[J]. Energy, 2012, 38(1): 362-375.
- [20] GAMS Development Corporation. GAMS user's guide[EB/OL]. [2018-07-01]. https://www.gams.com/24.8/docs/userguides/index.html.
- [21] SALIMI M, AMIDPOUR M M. Simulation, parametric study and economic assessment of reciprocating internal combustion engine integrated with multi-effect desalination unit [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 138: 299-311.
- [22] LUO Zhao, WU Zhi, LI Zhenyuan, et al. A two-stage optimization and control for CCHP microgrid energy management[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 125: 513-522.
- [23] GENG H. Data center handbook[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2014.
- [24] ZENG Rong, LI Hongqiang, JIANG Runhua, et al. A novel multi-objective optimization method for CCHP-GSHP coupling systems[J]. Energy and Buildings, 2016, 112: 149-158.
- [25] 全国信息技术标准化技术委员会.数据中心资源利用第3部分:电能能效要求和测量方法:GB/T32910.3—2016[S].北京:中国标准出版社,2016.
- China National Information Technology Standardization. Data center resource utilization Part 3: electric energy usage effectiveness requirements and measuring methods: GB/T32910.3—2016[S]. Beijing: China Standard Press, 2016.

刘成运(1990—),男,硕士研究生,主要研究方向:综合能源系统优化、光伏发电。E-mail: 1273564506@qq.com

孟超(1985—),男,通信作者,博士,工程师,主要研究方向:能源互联网、综合能源系统。E-mail: meng@xmu.edu.cn

景锐(1989—),男,博士研究生,主要研究方向:城市综合能源系统、能源系统工程。E-mail: fafujingrui@126.com

(编辑 章黎)

Multi-objective Optimization Design and Scheduling of Integrated Energy System in A-level Data Center

LIU Chengyun, MENG Chao, JING Rui, YANG Qi, CHENG Qijin

(College of Energy, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

Abstract: Replacing conventional energy supply systems by distributed integrated energy systems is considered as an effective alternative to reduce the operation expense of data centers. Considering requirements of A-level data center for energy availability, a distributed integrated energy system is proposed, and a model for multi-objective optimization design and dispatch of economic and environmental benefits is established based on the mixed integer nonlinear programming approach. Furthermore, the ϵ -constraint method is applied to solve the competing multi-objective problem, and an optimization program in GAMS using LINDOGLOBAL solver is developed. The final solution is selected from non-inferior solutions by linear programming techniques for multidimensional analysis of preference approach and verified by the technique for order preference by similarity to ideal solution approach. The results demonstrate that the optimized distributed integrated energy system is able to guarantee the energy availability of the A-level data center, and effectively achieves annual total cost saving and carbon dioxide emission reduction.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51876181) and National Key R&D Program of China (No. 2016YFE0102300-09).

Key words: data center; distributed integrated energy system; mixed integer nonlinear programming; multi-objective optimization; decision-making