

基于多目标优化的办公建筑可再生能源系统 集成优化配置方案研究

陈淑琴¹, 陆敏艳¹, 谭洪卫², 冯 威³, 周 南³

(1. 浙江大学建筑工程学院, 杭州 310058; 2. 同济大学绿色建筑及新能源研究中心, 上海 200092;

3. 劳伦斯伯克利国家实验室, 伯克利 94702)

摘 要: 以北京市某办公建筑为例,选取光伏、光热、土壤源热泵3类常用的可再生能源系统为对象,并以电冷水机组、空气源热泵、锅炉和市政电网等常规能源系统为备选系统,建立系统费用最优、运行阶段CO₂排放最优以及经济效益和环境效益折衷优化的目标函数,并通过eQUEST、PVWatts和DER-CAM软件联合仿真模拟,应用基于多目标的集成优化配置方法,分别提出可再生能源系统的集成优化配置方案。

关键词: 可再生能源; 系统配置; 集成优化; 多目标优化; 办公建筑

中图分类号: TK019

文献标识码: A

0 引 言

快速的城市化进程带来了建筑业的飞速发展,建筑能耗也随之急剧上升。鼓励各类可再生能源技术在建筑中的综合应用已成为中国建筑节能的重要政策,也已成为当前工程应用的热点和发展趋势。对于可再生能源应用的适宜性分析,当前的相关研究主要集中在为单一可再生能源技术应用的适应性评价方面^[1,2]。而各类可再生能源技术集成应用的国内外相关研究多以(近)零能耗建筑为目标,进行各类可再生能源系统的配置,且以住宅建筑居多^[3-5]。在实际工程应用上,可再生能源系统的集成应用也越来越多,但却缺乏对其集成方案合理性及效益的评估。各类可再生能源的应用需考虑当地气候特征、地质资源自然条件、各类建筑的用能负荷特征、系统投资、能源价格、运行效率等众多因素,从经济、环境、能效等多方面进行综合评估,因此,对于不同气候条件下的不同类型建筑,可再生能源集成优化配置方案各不相同。此外,建筑空调、用电等能源需求可由包括可再生能源系统在内的多种能源系统联合供应,在多目标优化的方

案选择时,如将常规能源系统也纳入备选系统,可再生能源系统和常规能源系统之间的最佳容量配比也是一个重要的问题。因此如何合理集成配置可再生能源系统,是一个复杂的科学问题。鉴于此,本文以办公建筑为对象,重点考虑可再生能源系统,并以常规能源系统为备选系统,建立系统费用最优、运行阶段CO₂排放最优以及经济效益和环境效益折衷优化目标函数,通过eQUEST、PVWatts和DER-CAM这3个软件联合仿真,建立多目标集成优化配置方法。并以北京市一办公建筑为例,利用上述优化配置方法,进行可再生能源系统集成优化配置方案的案例分析。

1 研究方法

1.1 可再生能源系统集成及能流

办公建筑运行及用能负荷均有其自身特点。一般情况下,办公建筑的负荷以电负荷和空调负荷为主,热水负荷通常非常小,因此建筑负荷重点考虑电负荷、空调冷负荷和热负荷3类。选取太阳能光热系统、太阳能光伏系统、光热蓄热装置、热泵系统等建筑中常用的可再生能源系统为研究对象(当

收稿日期: 2016-08-01

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0700301); 国家自然科学基金(51561135002); 中央高校基本科研经费(2015QNA4027)

通信作者: 陈淑琴(1981—),女,博士、副教授,主要从事建筑节能方面的研究。hn_csq@126.com

前国内光伏系统均能上网,因此本研究暂不考虑光伏蓄能装置),进行系统优化配置;以常规电冷水机组、吸收式冷水机组、空气源热泵、锅炉和市政电网为备选系统。各类能源系统能流如图 1 所示。

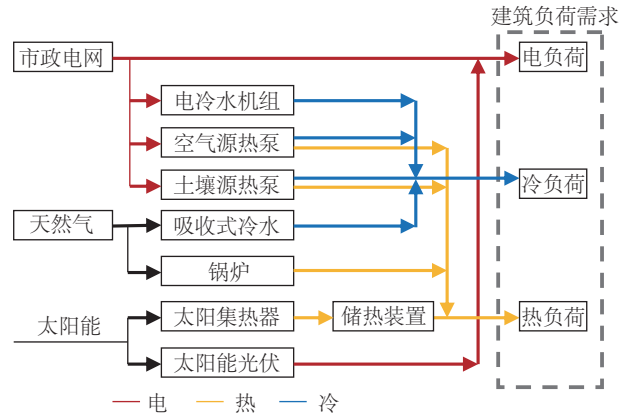


图1 办公建筑能源系统集成及能流图

Fig. 1 Integration of energy systems and flow chart

1.2 系统优化配置数学模型

1.2.1 目标函数

本研究以能源系统成本最低、CO₂排放量最低以及经济效益和环境效益折衷优化为目标。其中系统成本即系统的年值投资费用^[6],包含各类可再生能源系统与常规能源系统购买、安装等初投资的年平均费用、系统的年运行维护费用、以及电量上网的年收益^[7],如式(1)~式(6)所示。

$$C_{ACS} = C_{RES} + C_{CON} + C_{OM} - P_{EXP} \quad (1)$$

式中, C_{RES} ——可再生能源系统初投资的年平均费用,¥/a; C_{CON} ——常规能源系统初投资的年平均费用,¥/a; C_{OM} ——系统运行成本,¥/a; P_{EXP} ——将电量上网所得的年利润,¥/a。

可再生能源系统的初投资成本一般包含固定资产投资,即不管安装容量多大都会产生的安装费用,以及变动投资,该部分与安装容量成正比^[8],计算方法如式(2)所示:

$$C_{RES} = \sum_{d \in \mathcal{D}} (b_{dUs} \times F_{dUs} + p_{dUs} \times V_{dUs}) \times A_{dUs} \quad (2)$$

式中, d ——可再生能源发电或产热设备种类; s ——蓄能设备种类; b_{dUs} ——是否购买设备 d 或 s 的决策信息,0 代表不购买,1 代表购买; F_{dUs} ——设备 d 或 s 的固定初始投资,¥; p_{dUs} ——设备 d 或 s 的安装容量, kW/kWh; V_{dUs} ——设备 d 或 s 的单位

变动投资成本, ¥/kW 或 ¥/kWh; A_{dUs} ——设备的投资回收因子。

而 A 的计算公式如式(3)所示^[9]:

$$A = r \times \left\{ 1 + \left[(1+r)^y - 1 \right]^{-1} \right\} \quad (3)$$

式中, r ——年利率; y ——设备的使用年限。

常规能源系统的初投资成本如式(4)所示:

$$C_{CON} = \sum_c n_c \times F_c \times A_c \quad (4)$$

式中, c ——常规能源设备种类; n_c ——常规能源设备的购买数量; F_c ——设备 c 的单价。

系统年运行成本由式(5)计算,分别包含从市政电网的购电成本、天然气购买成本、可再生能源系统的运行维修成本以及常规能源系统的运行维修成本^[8]:

$$C_{OM} = \sum_{m,d,h,u} E_{m,d,h,u} \times C_{e,m,d,h,u} + \sum_{m,d,h,u} G_{gas,m,d,h,u} \times C_{gas} + \sum_{i,m,d,h} g_{i,m,d,h} \times C_{i,m,d,h} + \sum_{j,m,d,h} g_{j,m,d,h} \times C_{j,m,d,h} \quad (5)$$

式中, m ——季节; d ——典型日类型; h ——小时; u ——用能终端种类; $E_{m,d,h,u}$ ——用能终端 u 在季节 m 、典型日 d 、 h 时从市政电网实际消费的电量, kWh; $C_{e,m,d,h,u}$ ——在季节 m 、典型日 d 、 h 时市政电网的电价, ¥/kWh; $G_{gas,m,d,h,u}$ ——用能终端 u 在季节 m 、典型日 d 、 h 时实际购买的天然气容量, kWh; C_{gas} ——天然气的单价, ¥/kWh; i ——所有应用的可再生能源技术; $g_{i,m,d,h}$ ——可再生能源技术 i 在季节 m 、典型日 d 、 h 时产生的能量, kWh; $C_{i,m,d,h}$ ——在季节 m 、典型日 d 、 h 时, 技术 i 产生能量的单位价格, 包含维修费用, ¥/kWh; j ——应用的所有常规能源技术; $g_{j,m,d,h}$ ——技术 j 在季节 m 、典型日 d 、 h 时产生的能量, kWh; $C_{j,m,d,h}$ ——在季节 m 、典型日 d 、 h 时, 技术 j 产生能量的价格, 包含维修费用, ¥/kWh。

本研究中考虑太阳能光伏系统并网, 上网年收益计算见式(6)。

$$P_{EXP} = \sum_{m,d,h} S_{m,d,h} \times C_{EXP,m,d,h} \quad (6)$$

式中, $S_{m,d,h}$ ——光伏板在季节 m 、典型日 d 、 h 时产生的并网电量, kW; $C_{EXP,m,d,h}$ ——季节 m 、典型日 d 、 h 时可再生能源发电并网电价, ¥/kW。

CO₂排放量主要来源于消耗的天然气燃料及从电网购买的电力,计算方法如式(7)所示:

$$M_{\text{CO}_2} = \sum_{m,d,h,u} E_{m,d,h,u} \times \mu_e + \sum_{m,d,h,u} G_{\text{gas},m,d,h,u} \times \mu_{\text{gas}} \quad (7)$$

式中, μ_e ——电的 CO₂ 排放因子; μ_{gas} ——天然气的 CO₂ 排放因子。

多目标优化公式如式(8)所示:

$$\min \left[(1-w) \times \frac{C_{\text{ACS}}}{C_{\text{ACS}}^{\text{ref}}} + w \times \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CO}_2}^{\text{ref}}} \right] \quad (8)$$

式中, w ——自设定的权重因子,如果较注重减碳量,则 w 大于 0.5,如果偏重经济效益,则取小于 0.5^[10],当 $w=0$,为能源系统成本最低;当 $w=1$,为 CO₂ 排放量最低; $C_{\text{ACS}}^{\text{ref}}$ ——参考案例,即未采用任何可再生能源系统情况下的年投资成本,¥/a; $M_{\text{CO}_2}^{\text{ref}}$ ——参考案例中 CO₂ 年排放量, t/a。

1.2.2 约束条件

系统模型的约束条件主要包含能源平衡条件以及各项可再生能源技术的运行条件。对于太阳能光伏系统而言,太阳能光伏板的发电量受限于可安装光伏板面积、太阳能辐射量以及光伏系统的发电效率^[11];且任何时刻,本地设备消耗的太阳能电量与并网电量之和不大于光伏板的实际发电量^[12]。约束条件如式(9)和式(10)所示。

$$g_{\text{pv},m,d,h} \leq A_{\text{pv}} \times I_{m,d,h} \times \eta_{\text{pv}} \quad (9)$$

$$g_{\text{pv},m,d,h} \geq \sum_u E_{\text{pv},m,d,h,u} + S_{m,d,h} \quad (10)$$

式中, $g_{\text{pv},m,d,h}$ ——光伏系统在季节 m 、典型日 d 、 h 时的发电量, kW; A_{pv} ——可安装光伏板面积, m²; $I_{m,d,h}$ ——光伏系统在季节 m 、典型日 d 、 h 时的太阳能辐射量, kW/m²; η_{pv} ——光伏系统的发电效率。

同理,太阳集热器的供热量与安装的集热板面积,太阳能辐射量以及光伏系统的发电效率紧密相关^[12],如式(11)所示。

$$g_{\text{st},m,d,h} \leq A_{\text{st}} \times I_{m,d,h} \times \eta_{\text{st}} \quad (11)$$

式中, $g_{\text{st},m,d,h}$ ——太阳集热器在季节 m 、典型日 d 、 h 时的供热量, kW; A_{st} ——可安装的集热板面积, m²; η_{st} ——光伏系统的发电效率。

燃气锅炉的供热量与燃气锅炉的效率,燃气量热值及运停情况成正比;且受限于锅炉的额定制热量与运行情况^[13];见式(12)及式(13)。

$$g_{\text{bg},m,d,h} = G_{\text{bg},m,d,h} \times \eta_{\text{bg}} \times \theta_{\text{bg},m,d,h} \quad (12)$$

$$g_{\text{bg},m,d,h} \leq Q_{\text{bg}} \times \theta_{\text{bg},m,d,h} \quad (13)$$

式中, $g_{\text{bg},m,d,h}$ ——燃气锅炉在季节 m 、典型日 d 、 h 时的供暖量, kW; $G_{\text{bg},m,d,h}$ ——季节 m 、典型日 d 、 h 时锅炉的燃气量热值, kW; η_{bg} ——燃气锅炉的效率; $\theta_{\text{bg},m,d,h}$ ——季节 m 、典型日 d 、 h 时锅炉的运行情况,当 $\theta_{\text{bg},m,d,h}=1$ 时代表锅炉开, $\theta_{\text{bg},m,d,h}=0$ 代表锅炉关; Q_{bg} ——锅炉的额定供暖量, kW。

本模型中的热泵及制冷机均由电驱动,设备的制冷量或供暖量与空调设备的性能参数、耗电量以及设备的运行时间成正比,且受限于设备的额定制冷或供暖量^[13],见式(14)及式(15)。

$$g_{q,k,m,d,h} = E_{q,k,m,d,h} \times \text{COP}_{k,q} \times \theta_{q,k,m,d,h} \quad (14)$$

$$g_{q,k,m,d,h} \leq Q_{q,k} \times \theta_{q,k,m,d,h} \quad (15)$$

式中, q ——制冷或供暖; k ——不同的空调系统,包含土壤源热泵、空气源热泵以及电制冷机; $g_{q,k,m,d,h}$ ——系统 k , 季节 m 、典型日 d 、 h 时的制冷量或供暖量, kW; $E_{q,k,m,d,h}$ ——系统 k 在季节 m 、典型日 d 、 h 时制冷或供暖所消耗的电量, kW; $\text{COP}_{k,q}$ ——系统 k 提供 q 时的性能系数; $\theta_{q,k,m,d,h}$ ——系统 k 提供 q 时的运行情况, 1 代表开, 0 代表关; $Q_{q,k}$ ——系统 k 的额定制冷或供暖量, kW。

本模型中的平衡条件包括电力平衡、制热量平衡及制冷量平衡。本研究中假设太阳能光伏系统直接并网,因此不考虑蓄电装置。故电力平衡中,太阳能光伏发电量与从电网购买的电量总和需等于建筑的总电负荷与并网电量之和,如式(16)所示:

$$g_{\text{pv},m,d,h} + \sum_u E_{m,d,h,u} = \sum_u L_{e,m,d,h,u} + S_{m,d,h} \quad (16)$$

式中, $L_{e,m,d,h,u}$ ——设备 u 在季节 m 、典型日 d 、 h 时的电负荷, kW。

热负荷可由土壤源热泵、空气源热泵、锅炉以及太阳能集热系统供暖满足,且太阳能热水系统考虑蓄热装置。热平衡方程如式(17)所示:

$$\sum_k g_{\text{he},k,m,d,h} + g_{\text{bg},m,d,h} + \sum_u O_{m,d,h,u} = \sum_u L_{\text{he},m,d,h,u} \quad (17)$$

式中, $g_{\text{he},k,m,d,h}$ ——系统 k 在季节 m 、典型日 d 、 h 时的制热量, kW; $O_{m,d,h,u}$ ——设备 u 在季节 m 、典型日

d 、 h 时从蓄热水箱消耗的热量, kW; $L_{he,m,d,h,u}$ ——设备 u 在季节 m 、典型日 d 、 h 时的热负荷, kW。

冷负荷主要由土壤源热泵、空气源热泵以及水冷机组满足, 其冷平衡方程如式(18)所示:

$$\sum_k g_{co,k,m,d,h} = \sum_u L_{co,m,d,h,u} \quad (18)$$

式中, $g_{co,k,m,d,h}$ ——系统 k 在季节 m 、典型日 d 、 h 时的制冷量, kW; $L_{co,m,d,h,u}$ ——设备在季节 m 、典型日 d 、 h 时的冷负荷, kW。

1.3 模型构建与实现

美国劳伦斯伯克利国家实验室研发的 DER-CAM (Distributed Energy Resources Customer Adoption Model) 软件可实现对建筑光伏、光热、CHP、吸收式制冷、热储存、蓄电池等分布式能源系统进行优化配置^[14]。模型利用混合整数线性回归方法, 建立系统费用最优、运行阶段 CO_2 排放最优或经济效益和环境效益折衷优化配置目标函数, 根据各类建筑分布式能源系统的成本、性能、能源价格等输入条件, 在满足建筑实际冷热电负荷需求的情况下, 输出能源系统优化配置方案^[4,15]。

本文通过 eQUEST、PVWatts 和 DER-CAM 软件联合仿真, 来构建成本最优、 CO_2 排放最小以及经济效益和环境效益折衷配置模型。对光伏、光热、土壤源热泵等可再生能源系统进行集成优化配置, 必须考虑城市的气象条件、围护结构特性、建筑的运行特征等因素对建筑冷热电负荷的影响。同时, 还需考虑建筑所在地太阳能辐射量、土壤恒温层温度、土壤热扩散率、土壤传导率、单位延米换热量等地质、资源条件对太阳能光伏、光热、以及土壤源热泵系统能效的影响。此外, 土壤源热泵的打井价格、常规能源价格等存在地域差异, 将对技术使用的经济性产生影响。鉴于此, 模型首先将城市的气候条件、建筑围护结构特性、建筑的运行特征、土壤恒温层温度等作为建筑负荷计算模型输入参数, 利用 eQUEST 软件, 计算获取建筑模型的全年各月工作日和周末的逐时平均用电/空调负荷、高峰(每个月用能需求最大的 3 d)逐时平均用电/空调负荷; 同时 eQUEST 软件将会根据土壤源热泵的性能曲线, 计算出土壤源热泵机组季节 COP 和 EER 值。对于空气源热泵等常规空调系统也同样计算出其季节能效比。根据城市的太阳辐射强度, 利用美国可再

再生能源国家实验室开发的 PVWatts 软件, 计算得到建筑所在地的单位装机容量光伏系统全年典型日逐时平均发电性能曲线。将上述这些参数值作为系统优化配置模型输入参数, 再辅以当地电价、天然气价格、土壤源热泵打井深度和打井价格、可再生能源系统和常规能源系统初投资等经济参数, 利用 DER-CAM 软件, 构建系统优化配置模型, 其计算原理与方法如 1.2 节所示。基于 DER-CAM 的建筑可再生能源系统集成优化配置模型思路如图 2 所示。

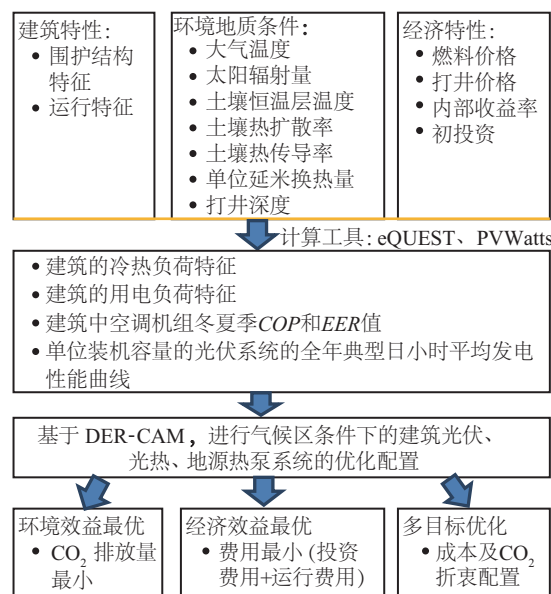


图2 基于DER-CAM的可再生能源系统集成优化配置方法

Fig. 2 Optimization configuration method of integration of renewable energy systems based on DER-CAM model

2 案例分析

2.1 建筑选择和负荷计算

选取北京某办公建筑为例, 该建筑共 19 层, 建筑面积达 24000 m²。通过实地调研, 获得建筑的围护结构性能参数、建筑内人员密度及设备功率。墙体、屋顶和外窗的传热系数分别为 0.50、0.45 和 2.50 W/(m²·K)。建筑内人员密度及设备功率见表 1。建筑运行时间按 08:00~18:00 进行计算, 周末不工作。利用 eQUEST 建筑能耗模拟软件构建建筑模型, 模拟计算全年逐时空调负荷和用电负荷, 数据处理得到各月工作日逐时平均电负荷, 如图 3 所示, 以及夏冬季各月的工作日逐时平均冷热负荷,

如图 4、图 5 所示。

表1 照明、办公设备的单位面积功率和人员密度

Table 1 LPD systems power per unit and occupant density

区域	照明/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	办公设备/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	人员密度/ $\text{米}^2\cdot\text{人}^{-1}$
会议室	11	5	2.5
办公室	11	20	4
大厅	11	5	20
实验室	11	5	4
多功能厅	18	5	2.5
洗手间	5	0	20
设备间	5	0	20
走廊	5	0	50
餐厅	13	0	20

由图 3 可知,该办公建筑的各月工作日逐时平均电负荷的变化趋势基本相同,用电高峰集中在 09:00~11:00 及 14:00~17:00 之间。7、8 月份的用电

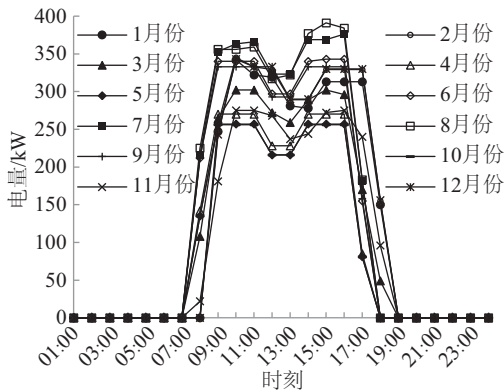


图3 各月工作日逐时平均电负荷

Fig. 3 Hourly average electricity load on months' workdays

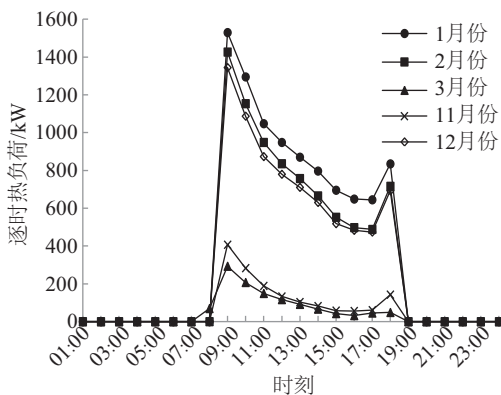


图4 冬季各月工作日逐时平均热负荷

Fig. 4 Hourly average heat load on weekdays in winter

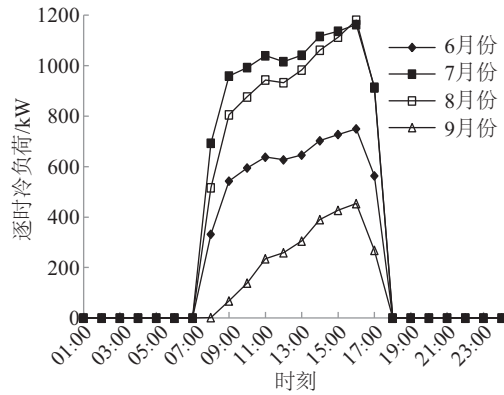


图5 夏季各月工作日逐时平均冷负荷

Fig. 5 Hourly average cooling load on weekdays in summer

负荷最高,高峰时期可达近 400 kW。图 4 展示了冬季的采暖负荷,主要集中在每年的 1 月份、2 月份和 12 月份,且峰值发生在上午 09:00~10:00 之间。图 5 显示夏季的制冷负荷主要集中在 7、8 月份,工作日内逐时冷负荷均较高,且下午的负荷值高于上午。

2.2 太阳能资源

利用 PVWatts^[16] 软件估算光伏系统的发电性能。图 6 显示了在北京市太阳辐射条件下,单晶硅光伏系统的发电性能曲线,即 1 kW 交流额定装机容量情况下的小时平均发电量(朝南固定角度安装)。

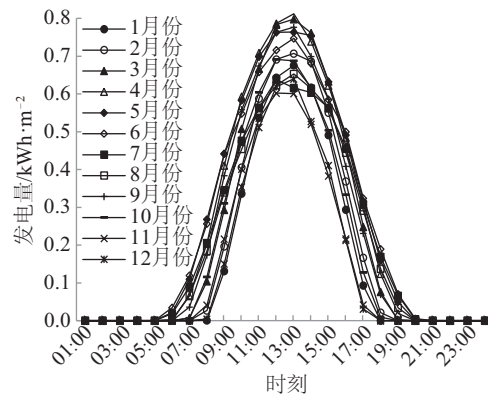


图6 北京市单晶硅光伏系统发电性能曲线

Fig. 6 Generation curve of monocrystalline silicon photovoltaic system in Beijing

2.3 能源价格

北京市商业建筑的分时电价如图 7 所示,在工作日期间,随着建筑用能需求的增长而逐步提升电力价格,在 10:00~15:00 达到最高 1.27 ¥/kWh。且

夏季为全年用能高峰期,11:00~13:00 实行尖峰电价 1.44 ¥/kWh。而北京市的天然气价格则全年保持 2.84 ¥/m³ 不变。

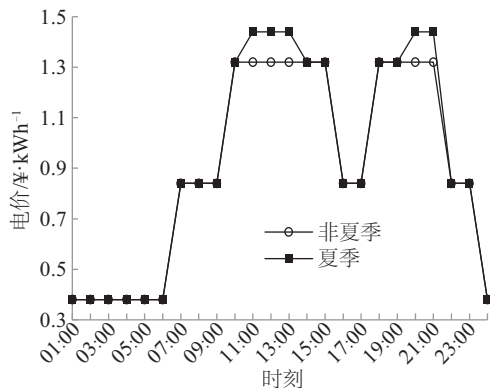


图7 北京的分时电价

Fig. 7 Hourly electricity price in Beijing

2.4 能源系统技术参数及经济成本

表 2 列出了优化配置模型采用的土壤源热泵、空气源热泵和电冷水机组的能效值,表中数值为 eQUEST 软件根据空调机组性能曲线计算出的冬夏季 COP 和 EER 值,将性能参数平均值输入 DER-CAM 软件进行系统的优化配置计算。

表 2 空调系统技术参数

Table 2 System performance of air conditioning

技术	COP(制热)	COP(制冷)
土壤源热泵	4.9	6.0
空气源热泵	3.0	3.2
电冷水机组	—	4.5

按照当前的市场价格,各类系统的单位装机容量的成本如表 3 所示。其中土壤源热泵的成本包括设备费用和打井费用。

表 3 各能源系统的投资成本

Table 3 Investment cost of energy systems

技术	成本/¥·kW ⁻¹	生命周期/a
光伏系统	12000	20
太阳能热水器	1600	15
土壤源热泵	2100	10
空气源热泵	900	10

3 结果及讨论

利用 DER-CAM 软件,建立优化配置模型,分别从经济性最优、CO₂排放量最小以及经济效益和环

境效益折衷配置的角度,对北京市一办公建筑的能源系统进行配置,以满足该建筑的采暖空调负荷和用电负荷,各种配置方案如表 4 所示。在基准方案中,采用天然气锅炉和电冷水机组分别满足建筑的热负荷和冷负荷,采用市政电网满足电负荷,其全年运行成本为 349.78 万 ¥, CO₂ 排放量为每年 907.95 t。方案 1 为式(8)中权重因子 w 取 1 时,即以 CO₂ 排放量最低为目标的配置方案,方案 2~方案 8 中 w 的取值不断变小,由倾向于注重 CO₂ 排放优化发展为注重成本优化;而方案 9 则为 w 取 0,即以成本最低为优化目标时的系统配置方案。通过不同配置方案以及基准方案之间的对比分析可得以下结论:

1)在各方案中,不论采用光伏、光热、土壤源热泵等可再生能源技术的哪种组合形式,相比于基准模型,均可实现降低年成本及 CO₂ 排放量的目标。且成本节约效果明显,高达 53.9%到 63.3%,减碳量在 14.9%~26.7%之间。

2)在 CO₂ 排放量最小的配置方案中(方案 1),空调系统全部使用土壤源热泵,装机容量为 1529 kW(制热),1928.6 kW(制冷),这主要是因为土壤源热泵的性能比空气源热泵高。同时将光伏系统铺满整个屋顶,其装机容量为 154.4 kW,可最大程度降低建筑运行阶段市政电网用电和相应的 CO₂ 排放。此时 CO₂ 排放最小,为 665.68 t/a。

3)如果要得到成本最优的方案(方案 9),需使用空气源热泵,因为空气源热泵的机组价格远低于土壤源热泵系统;尽管其运行能效低于土壤源热泵,但运行成本的增加值小于系统初投资的增加值;此外,因北京采取分时电价,白天电价贵,且 10:00~15:00 间电价最高,而这些时段又恰好是办公建筑的用电高峰,因此仍可将光伏系统装满整个屋顶,2 类可再生能源系统集成后的设备初投资和运行成本还是最低的。

4)在这 2 个方案之间,即选择成本与 CO₂ 排放量折衷的目标,减小土壤源热泵的装机容量,增大空气源热泵的装机容量,整个能源系统成本降低,而 CO₂ 排放量升高。

5)在各个方案中,不论是从经济性考虑还是从环境效益考虑,太阳能集热系统均未被选上,这是因为不考虑办公建筑热水负荷,太阳能集热系统仅用于采暖,而其采暖能效又低于热泵,热泵的冬季

能效比均在 3 以上;太阳集热器单位制热量的初投资要比热泵高,因此不论是从经济效益还是能效和减排效益的角度,均未竞争过土壤源热泵系统。

6)在各方案中电冷水机组也未被选上是因为其仅

用于夏季制冷,还需再选取冬季制热设备,因此经济性和减排效益均不如上述方案好。而基准模型中利用电冷水机组制冷、天然气锅炉制热(制热效率小于 1),其系统成本和 CO₂排放量均非常高。

表 4 北京市某办公建筑可再生能源系统集成优化配置方案

Table 4 Configuration cases for integration energy systems in an office building in Beijing

参数	基准方案	方案 1 (CO ₂ 最低)	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6	方案 7	方案 8	方案 9 (成本最低)
空气源热泵/ 制热	0	0	91.0	101.2	169.9	654.2	676.2	694.1	698.6	1617.9
kW 制冷	0	0	97.0	108.0	181.2	697.8	721.3	740.4	745.1	1725.8
地源热泵/kW 制热	0	1529.0	1436.1	1359.1	1267.7	1063.1	1041.1	1023.2	1018.8	0
制冷	0	1928.6	1811.4	1714.3	1598.9	1340.9	1313.2	1290.6	1285	0
PV 装机容量/kW	0	154.4	154.4	154.4	154.4	154.4	154.4	154.4	154.4	154.4
PV 装机面积/m ²	0	1010	1010	1010	1010	1010	1010	1010	1010	1010
成本/万¥	349.78	161.39	158.69	156.46	153.86	148.26	147.67	147.19	147.08	128.52
节约成本/%	—	53.9	54.6	55.3	56.0	57.6	57.8	57.9	60.0	63.3
碳排放量/t	907.95	665.68	666.20	666.83	668.12	671.76	672.27	672.72	672.83	772.72
减碳量/%	—	26.7	26.6	26.5	26.4	26.0	25.9	25.9	25.9	14.9

4 结 论

随着可再生能源技术的推广,将各类可再生能源技术集成应用于同一建筑中,以期更好地提高建筑能效,已成为当前建筑节能的一大趋势。而各类可再生能源技术集成应用与建筑所在地的气象及地理条件、建筑类型及负荷特征、可再生能源系统应用要求、设备及能源的市场价格等多种因素密切相关,如何从能效、经济、环境效益等各方面考虑,合理集成应用这些可再生能源技术,是一个复杂的科学问题。鉴于此,本文针对办公建筑负荷需求特征,选取光伏、光热、土壤源热泵 3 类可再生能源技术为对象,并以电冷水机组、空气源热泵、锅炉和市政电网等常规能源系统为备选系统,建立系统费用最优、运行阶段 CO₂排放最优以及经济效益和环境效益综合优化的目标函数,通过 eQUEST、PVWatts 和 DER-CAM 软件联合仿真模拟,建立基于多目标优化的集成优化配置方法。以北京市一办公建筑为例,根据该建筑的空调负荷及用电负荷特征,利用上述优化配置方法,提出综合应用太阳能光伏、光热、土壤源热泵和空气源热泵等可再生能源系统的集成优化配置方案。

[参考文献]

- [1] 陈燕哲. 陕西地区地下水源热泵工程应用适应性评价及软件[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
- [1] Chen Yanzhe. Adaptability evaluation and software of groundwater source heat hump engineering application in Shaanxi Province[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014.
- [2] Erdil E, Ilkan M, Egelioglu F. An experimental study on energy generation with a photovoltaic (PV) - solar thermal hybrid system[J]. Energy, 2008, 33(8): 1241—1245.
- [3] Wang L P, Gwilliam J, Jones P. Case study of zero energy house design in UK[J]. Energy and Buildings, 2009, 41(11): 1215—1222.
- [4] Mendes G, Feng W, Stadler M, et al. Regional analysis of building distributed energy costs and CO₂ abatement: A U.S.-China comparison[J]. Energy and Buildings, 2014, 77:112—129.
- [5] Hassoun A, Dincer I. Development of power system designs for a net zero energy house[J]. Energy and Building, 2014, 73: 120—129.
- [6] 江全元, 石庆均, 李兴鹏, 等. 风光储独立供电系统电源优化配置[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(7): 19—26.

- [6] Jiang Quanyuan, Shi Qqingjun, Li Xingpeng, et al. Optimal configuration of standalone wind-solar-storage power supply system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2013, 33(7): 19—26.
- [7] 汪 伟, 段绍辉, 张兆鹏, 等. 冷热电蓄能联供微网系统优化配置的影响因素[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2013, 25(4): 156—161.
- [7] Wang Wei, Duan Shaohui, Zhang Zhaopeng, et al. Influential factor of optimal configuration for combined cooling heating and power systems [J]. *Proceedings of the Chinese Society of Universities for Electric Power System and Automation*, 2013, 25(4): 156—161.
- [8] Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL). DER-CAM user manual, version 27 [EB/OL]. https://building-microgrid.lbl.gov/sites/all/files/DER-CAM_User_Manual_V4-414_0.pdf, 2016-04-10.
- [9] Li L X, Mu H L, Li N, et al. Economic and environmental optimization for distributed energy resource systems coupled with district energy networks [J]. *Energy*, 2016, 109: 947—960.
- [10] Stadler M, Groissböck M, Cardoso G. et al. Optimal distributed energy resources and building retrofits with the strategic DER-CAM model[J]. *Applied Energy*, 2014, 132: 557—567.
- [11] Byrne J, Taminiay J, Kurdgelashvili L. et al. A review of the solar city concept and methods to assess rooftop solar electric potential, with an illustrative application to the city of Seoul[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 41: 830—844.
- [12] Schittekatte T. The impact of stochastic variability in insolation and capital cost of batteries on optimal microgrid design [M]. Madrid: Comillas Pontifical University, 2015.
- [13] 林美顺. 城市区域建筑负荷预测与能源配置优化研究 [M]. 上海: 同济大学, 2016.
- [13] Lin Meishun. Building load prediction and energy optimization of community energy planning [M]. Shanghai: Tongji University, 2016.
- [14] Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL). Distributed Energy Resources Customer Adoption Model (DER-CAM) [EB/OL]. <https://building-microgrid.lbl.gov/projects/der-cam>, 2016-02-25.
- [15] 国家能源局微网工作组. 分布式能源智能微网关键技术与发展[R]. G-1107-14354, 2012.
- [16] National Renewable Energy Laboratory (NREL). PVWatts, A performance calculator for grid-connected PV systems [EB/OL]. <http://rredc.nrel.gov/solar/calculators/PVWATTS/version1/>, 2016-03-09.

RESEARCH ON INTEGRATION RENEWABLE ENERGY SYSTEMS IN OFFICE BUILDING BASED ON MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION

Chen Shuqin¹, Lu Minyan¹, Tan Hongwei², Feng Wei³, Zhou Nan³

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. Tongji University Green Building and New Energy Research Center, Shanghai 200092, China;

3. Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), California Berkeley 94702, America)

Abstract: Taking an office building in Beijing as a case study, objective functions (e.g. minimizing the total equivalent annual costs, minimizing CO₂ emissions, or multi-objective optimization of minimizing annual cost and CO₂ emissions) was built, combining three renewable energy systems, like PV, solar thermal collectors, and soil source heat pump, and other conventional energy systems, like electric water chiller, air source heat pump, boiler and electricity grid. The model has been simulated with the integration of eQUEST, PVWatts and DER-CAM. Finally, different configuration plans of integrated systems have been put forward by utilising the multi-objective optimization method.

Keywords: renewable energy; system configuration; optimized integration; multi-objective optimization; office buildings