

基于Wasserstein距离多状态建模的 冷热电联供系统优化配置

考虑冷热电联供系统中可再生能源供热供电出力和负荷的不确定性对优化配置的影响,采用基于Wasserstein概率距离指标的改进多状态方法对风光出力和冷热电负荷不确定性进行建模。在考虑经济性、环保性基础上引入自平衡能力为目标建立优化配置模型,并采用非劣性排序遗传算法进行求解。针对算例使用提出的优化配置方法进行仿真计算,通过对多目标和可再生能源渗透率的比较分析,验证提出的优化配置模型和方法的有效性和合理性。

曹芷健¹ 刘继春¹ 武云霞² 刘俊勇¹ 李 斌¹ 卢天琪³/1.四川大学电气信息学院 2.中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司系统规划中心 3.国网辽宁省电力有限公司经济技术研究院

0 引言

含可再生能源的冷热电联供系统(Combined Cooling Heating and Power, CCHP)在经济、环保和节能等方面相比于传统的分供系统具有很大优势。CCHP系统是一种以清洁能源为燃料的新型供能系统,可以利用风光发电和集热供给冷热电负荷,能够通过能源的梯级利用提升系统综合能源利用率,并降低生产成本,而且在减少PM_{2.5}和CO₂排放方面也具有极大优势,可提供供暖、供电、供热水和供冷等多项功能,充分利用可再生能源,实现系统综合利用效率最大化。同时满足冷热电负荷的多重需求,提高了能源利用率和环境效益,以实现绿色经济可持续发展,被看作是对电网的有益补充,在提高电力系统可靠性、优化能源结构方面将发挥重要作用^[1]。

CCHP系统往往包含多种发电供热单元,其组成和运行比较复杂,这就对其优化配置技术提出了较高的要求。近些年国内外学者针对CCHP系统优化配置问题开展了一系列研究工作。文献[2]从经济、能源和环境对系统的设备容量和运行策略进行了优化。文献[3]以各季度典型日为例设计了一种冷热电联供三级协同优化配置方法,对系统的设备容量和运行策略进行优化。文献[4]采用全年8 760 h数据为例集成了光伏与CCHP系统,通过太阳能集热、发电与冷热电系统供能的协调优化设计,改善了能源与环境效益。上述文献一定程度上解决了冷热电联供的优化配置的相关问题,但仍存在一些局限性。已有文献采用的优化配置方案所采用的场景数据没有充分考虑系统的不确定性。本文采用改进的多状态理论对风、光和负荷不确定性建模,针对性考虑了系统中的不确定性因素,通过仿真验证本文方法在冷热电联供系统多目标优化配置中具有一定优势。

本文以含可再生能源冷热电联供系统为例,研究计及风光出力和负荷不确定性的含可再生能源冷热电联供系统优化配置问题。首先,应用Wasserstein距离指标理论对各季度典型日的风光和负荷进行多状态建模。然后,建立基于多状态的可再生能源冷热电联供系统多目标优化配置模型,并通过算例仿真验证本文方法的合理性和有效性。



曹芷健/助理工程师

关键词/Keywords

可再生能源·
Wasserstein概率距离指标·
自平衡能力·
可再生能源渗透率·
优化配置·

国家高技术发展研究计划(863项目)
(2014AA051901)。

1 系统构成

本文所研究的可再生能源综合利用的CCHP系统能量流程图如图1所示。其中变量 E 表示电能，变量 Q 代表热能。系统构成：CCHP系统由太阳能光伏光热一体化（PV/T）机组、风机、燃气轮机和燃气锅炉驱动的传统CCHP系统组成。风力发电机提供电能 E_{WT} 。PV/T机组同时提供电能 E_{PV} 和热能 Q_{PV} ，其中 Q_{PV1} 直接提供系统热负荷， Q_{PV2} 供给吸收式制冷机制冷。燃气轮机以天然气为燃料提供系统电能 E_G ，产生的高温烟气热能 Q_G 由余热回收装置回收。燃气锅炉以天然气为燃料提供给系统热能 Q_b ，它们产生的一部分热能 Q_{b1} 和 Q_{r1} 提供给系统热负荷需求。另一部分 Q_{b2} 和 Q_{r2} 提供给吸收式制冷机制冷，吸收式制冷机制冷量用 Q_c 表示。其中风机、PV/T机组出力受风光波动影响存在不确定性，而其容量配置对系统的经济、环保等方面影响较大，因此本文针对出力单元风机、PV/T机组和燃气轮机的容量进行优化配置。

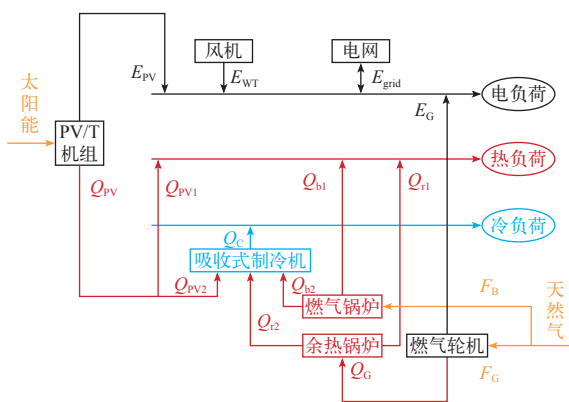


图1 冷热电联供系统能量流

2 系统不确定性建模

冷热电联供系统中往往包含多种分布式电源（DG），其中风机、PV/T机组工作过程中可能存在不同的性能水平，再加上冷热电负荷存在波动性，选择利用多状态方法对系统进行建模。

通常用连续概率分布表示风光等可再生能源出力的不确定性。如何以离散分布对原连续分布近似是建模的难点，文献[5]指出模型模拟准确度

取决于概率分布距离。本文采用目前被证明优于其他距离指标的Wasserstein距离指标。Wasserstein距离是定义在概率测度空间上的2阶矩，定义为^[6]

$$W_r(p_1, p_2; \pi) = \int \pi[p_1(x), p_2(x)]^r dx \quad (1)$$

式中， p_1 和 p_2 为两个概率密度函数； $\pi(p_1, p_2)$ 为距离测度； r 为阶数。

将离散分布对连续分布近似问题转化为求 W_r 最小化问题。假设变量 x 的概率密度函数为 $h(x)$ ，Wasserstein距离指标下的最优分位点 $z_q (q=1, 2, \dots, Q)$ 可以通过下式得到

$$\int_{-\infty}^{z_q} h(x)^{1/(1+r)} dx = \frac{2q-1}{2Q} \int_{-\infty}^{\infty} h(x)^{1/(1+r)} dx \quad (2)$$

其相应的概率为

$$p_q = \int_{\frac{z_{q-1}+z_q}{2}}^{\frac{z_q+z_{q+1}}{2}} h(x) dx \quad (3)$$

式中， $z_0 = -\infty$ ； $z_{Q+1} = +\infty$ 。

如图2所示以6个离散分位点形成的概率密度函数近似一个连续密度函数，可以通过最小化阴影面积实现（取 $r=1$ ）。

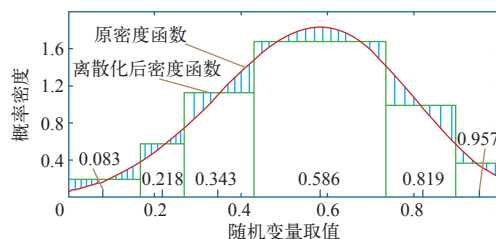


图2 Wasserstein概率距离指标

本文选择采用Wasserstein概率距离指标对风光的热电出力及冷热电负荷的概率密度函数进行最优离散划分。

2.1 风机出力的不确定性建模

风力介于切入风速 v_{ci} 和额定风速 v_{cr} 之间时，将此区间的风速划分为 N 个状态，通过Wasserstein距离指标最优离散化方法得到风电概率分布最优分位点 $n_i (i=1, 2, \dots, N)$ 。

$$\int_{v_{ci}}^{n_i} f(v)^{1/(1+r)} dv = \frac{2q_i-1}{2N} \int_{v_{ci}}^{v_{cr}} f(v) dv \quad (4)$$

式中， r 为阶数； $f(v)$ 为风速概率密度函数。

可求出每个状态下发生的概率为

$$D_W(q) = \int_{\frac{n_{i-1}+n_i}{2}}^{\frac{n_i+n_{i+1}}{2}} f(v) dv \quad (5)$$

式中, $n_0 = v_{ci}$, $n_{N+1} = v_{co}$ 。

风速小于 v_{ci} 或大于切出风速 v_{co} 时, 风机的出力为0, 该状态下的风速可认为等于

$$v(N+1) = 0 \quad (6)$$

此时风机的出力为第 $N+1$ 个状态, 可计算出该状态发生的概率

$$D_W(N+1) = \int_0^{v_{ci}} f(v) dv + \int_{v_{co}}^{+\infty} f(v) dv \quad (7)$$

风速介于额定功率 v_{cr} 和切出风速 v_{co} 之间时, 风机以额定功率输出, 该状态下的风速可认为等于

$$v(N+2) = v_{cr} \quad (8)$$

此时风机出力为第 $N+2$ 个状态, 可计算出该状态发生的概率为

$$D_W(N+2) = \int_{v_{cr}}^{v_{co}} f(v) dv \quad (9)$$

由此可计算出每个仿真时刻包含多台风机的风力发电系统各个状态下出力的大小及其对应的状态概率。

2.2 太阳能PV/T机组出力的不确定性建模

PV/T技术是一种将太阳能PV组件与集热器相结合的技术。在吸收太阳能集热获得热能的同时进行光伏发电。这种将太阳能光伏组件、集热组件集为一体的结构设计避免了在不同冷热电负荷需求下, 太阳能光伏发电机和集热器的容量配比的优化难题, 提高了能源利用率, 并大幅度降低系统成本和安装面积。

光照强度采用Beta分布模型, 其中PV/T输出电功率 P_{PV} 为

$$P_{PV} = A_{PV} \eta_{el} I \quad (10)$$

式中, P_{PV} 为PV/T机组输出电功率; A_{PV} 为机组的光照有效面积; η_{el} 为光伏电池的发电效率; I 为光照强度。

PV/T发电概率密度函数 p_e 可表示为

$$p_e = \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{P_{PV}}{P_{PVmax}} \right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{P_{PV}}{P_{PVmax}} \right)^{\beta-1} \quad (11)$$

式中, P_{PV} 为PV/T机组输出电功率; α 、 β 为贝塔分布的形状参数。

PV/T供热功率 Q_{PV} 为

$$Q_{PV} = A_{PV} \eta_{th} I \quad (12)$$

式中, Q_{PV} 为PV/T机组热输出功率; η_{th} 为供热效率。PV/T供热概率密度函数可表示为

$$D_W(N+2) = \int_{v_{cr}}^{v_{co}} f(v) dv \quad (13)$$

式中, Q_{PVmax} 为PV/T机组最大热输出功率。

假设光伏逆变器起动的最低光照强度为 I_{min} 。

光照强度介于 I_{min} 和额定光照强度 I_s 之间时, 将此区间的光照强度划分为 R 个状态, 通过Wasserstein距离指标最优离散化方法分别得到发电供热概率分布最优分位点 z_j 和 b_j ($j=1, 2, \dots, R$)可由下式得到

$$\int_{I_{min}}^{z_j} p_e(I)^{1/(1+r)} dI = \frac{2j-1}{2R} \int_{I_{min}}^{I_s} p_e(I)^{1/(1+r)} dI \quad (14)$$

$$\int_{I_{min}}^{z_j} p_h(I)^{1/(1+r)} dI = \frac{2j-1}{2R} \int_{I_{min}}^{I_s} p_h(I)^{1/(1+r)} dI \quad (15)$$

发电各状态发生的概率为

$$D_G(j) = \int_{\frac{z_{j-1}+z_j}{2}}^{\frac{z_j+z_{j+1}}{2}} p_e(I) dI \quad (16)$$

供热各状态发生概率为

$$D_H(j) = \int_{\frac{z_{j-1}+z_j}{2}}^{\frac{z_j+z_{j+1}}{2}} p_h(I) dI \quad (17)$$

式中, $z_0 = b_0 = I_{min}$; $z_{R+1} = b_{R+1} = I_s$ 。

光照强度低于 I_{min} 时, PV/T出力为0, 该状态下的光照强度可认为等于

$$I(R+1) = 0 \quad (18)$$

此时PV/T发电、供热出力为第 $R+1$ 个状态, 可计算出该状态发生的概率为

$$D_G(R+1) = \int_0^{I_{min}} p_e(I) dI \quad (19)$$

$$D_H(R+1) = \int_0^{I_{min}} p_h(I) dI \quad (20)$$

光照强度大于等于 I_s 时, PV/T以额定热电功率输出, 该状态需下的光照强度可认为等于

$$I(R+2) = I_s \quad (21)$$

此时PV/T发电、供热出力为第 $R+2$ 个状态, 可计算出该状态发生的概率为

$$D_G(R+2) = \int_{I_s}^{+\infty} p_e(I) dI \quad (22)$$

$$D_H(R+2) = \int_{I_s}^{+\infty} p_h(I) dI \quad (23)$$

由此可得出每个仿真时刻PV/T机组发电和集

热的功率及概率。

2.3 冷热电负荷不确定性建模

冷热电负荷均存在一定不确定性，可近似服从正态分布，故假设各个时刻的负荷分布在距离该时刻负荷平均值3个标准差之内，即

$$P_L(t) \in [\mu_L(t) - 3\sigma_L(t), \mu_L(t) + 3\sigma_L(t)] \quad (24)$$

式中， $P_L(t)$ 为 t 时刻冷热电负荷的大小； $\mu_L(t)$ 和 $\sigma_L(t)$ 分别为 t 时刻冷热电负荷的均值和标准差。利用Wasserstein距离指标得到最优分位点 $c_k(k=1, 2, \dots, S)$

$$\int_{\mu_L - 3\sigma}^{c_k} f(P_L)^{1/(1+r)} dP_L = \frac{2k-1}{2S} \int_{\mu_L - 3\sigma}^{\mu_L + 3\sigma} f(P_L)^{1/(1+r)} dP_L \quad (25)$$

式中， $f(P_L)$ 为负荷的概率密度函数。

冷热电负荷各状态概率为

$$D_L(k) = \int_{\frac{S_{k-1} + S_k}{2}}^{\frac{S_k + S_{k+1}}{2}} f(P_L) dP_L \quad (26)$$

式中， $c_0 = \mu_L - 3\sigma$ ； $c_{S+1} = \mu_L + 3\sigma$ 。

综上所述，则冷热电联供系统各时刻的总状态数为

$$U = (N+2)(R+2)^2 S \quad (27)$$

相应的状态空间概率为

$$D(i, j, k) = D_W(i) D_G(j) D_H(j) D_L(k) \quad (28)$$

式中， $i = 1, 2, \dots, N+2$ ； $j = 1, 2, \dots, R+2$ ； $k = 1, 2, \dots, S$ 。

3 基于不确定性建模的优化配置模型

3.1 目标函数

3.1.1 经济性

选择冷热电联供系统全生命周期成本期望值作为经济性优化目标，包括系统消耗的燃气和电量费用 C_{PUR} 、运行维护成本 C_{OM} 和安装成本 C_{DC} 。

$$F_1(X) = \min C_{COST} = \min (C_{DC} + C_{OM} + C_{PUR}) \quad (29)$$

$$C_{DC} = \sum_{i=1}^N C_{DCi} O_i \frac{d(1+d)^{l_i}}{(1+d)^{l_i} - 1} \quad (30)$$

$$C_{OM} = \sum_{i=1}^N C_{OMi} O_i \quad (31)$$

$$C_{PUR} = E_{buy} C_b + F_G C_f + F_B C_f - E_{sell} C_s \quad (32)$$

式中， C_{DCi} 为出力单元 i （出力单元包括风机、

PV/T机组和燃气轮机）单位容量价格； C_{OMi} 为出力单元 i 单位功率的运行维护系数； O_i 为出力单元 i 容量； d 为利率； l_i 为各个出力单元寿命； $i = 1, 2, \dots, N$ ； N 为系统的出力单元数； E_{buy} 为年购电量； C_b 、 C_s 为系统向电网购电与售电价格； F_G 和 F_B 分别为燃气轮机和锅炉年天然气消耗量； C_f 为天然气价格。

3.1.2 环保性

选择年 CO_2 排放量期望值 E_{CO_2} 作为环保性优化目标。

$$F_2(X) = \min E_{CO_2} \quad (33)$$

$$E_{CO_2} = \frac{E_{buy}}{E_{gen}} \mu_e + (F_G + F_B) \mu_f \quad (34)$$

式中， μ_e 和 μ_f 分别为每 $kW \cdot h$ 的煤炭量和天然气所对应的 CO_2 转换系数； η_{gen} 为火电厂发电效率。

3.1.3 自平衡能力

系统在自身电力供应不足时，需要从大电网购电，会对电网造成一定影响。而在冷热负荷需求不能满足时，需要启动锅炉供热，而锅炉的起停成本较高，所以系统应减少对电网供电和锅炉供热的依赖。本文定义了在一定周期内，联供系统不额外从大电网购电和启动锅炉供热所产生的能量与冷热电负荷的总需求量的比值来表示联供自平衡能力，即

$$F_3(X) = \max R_{self} = \frac{W_{self}}{W_{total}} \times 100\% = \left(\frac{W_{total} - E_{buy} - Q_B}{W_{total}} \right) \times 100\% \quad (35)$$

式中， R_{self} 为自平衡率； W_{self} 为系统自身满足的负荷量； W_{total} 为冷热电负荷的总需求量； Q_B 为锅炉供热。

3.1.4 可再生能源渗透率

为评估比较不同方法下配置方案能源利用率，以可再生能源渗透率为指标。定义为：风机和太阳能PV/T机组全年提供的热电总量占全年冷热电负荷总量的百分比。

3.2 约束条件

(1) 设备容量约束

$$O_{i\min} \leq O_i \leq O_{i\max} \quad (36)$$

式中, $O_{i\min}$ 和 $O_{i\max}$ 分别为系统允许的第 i 种出力单元的最小和最大安装容量

(2) 自平衡率约束

为讨论不同自平衡能力水平对联共系统优化的影响,在不同计算场景中,需对自平衡率水平进行限定,可表示为

$$R_{\text{low}} \leq R_{\text{self}} \leq R_{\text{high}} \quad (37)$$

式中, R_{low} 为设定的自平衡率下限; R_{high} 为设定的自平衡率上限。

如何设定上下限:考虑到其他两目标的合理性,算例中设置在40%~95%。

(3) 电平衡约束

$$P_{\text{grid}} + P_{\text{G}} + P_{\text{PV}} + P_{\text{WT}} = P_{\text{LE}} \quad (38)$$

式中, P_{LE} 为电负荷。

(4) 热平衡约束

$$Q_{\text{PV1}} + Q_{\text{bl}} + Q_{\text{rl}} = Q_{\text{LQ}} \quad (39)$$

式中, Q_{LQ} 为热负荷。

(5) 冷平衡约束

$$Q_{\text{C}} = Q_{\text{LC}} \quad (40)$$

式中, Q_{LC} 为冷负荷。

4 运行策略及模型的求解

4.1 电跟随运行策略

1) 当电负荷需求小于或等于风力发电机、太阳能PV/T最大出力时 ($P_{\text{LE}} \leq P_{\text{PV}}^{\text{max}} + P_{\text{WT}}^{\text{max}}$), 风电机组和太阳能PV/T机组运行。此时燃气轮机不运行, 用户的冷热负荷由风力发电机、太阳能PV/T和燃气锅炉提供满足。

2) 当电负荷需求大于风力发电机、太阳能PV/T最大出力, 小于等于风力发电机、太阳能PV/T和燃气轮机最大供电之和时 ($P_{\text{PV}}^{\text{max}} + P_{\text{WT}}^{\text{max}} < P_{\text{LE}} \leq P_{\text{PV}}^{\text{max}} + P_{\text{WT}}^{\text{max}} + P_{\text{G}}^{\text{max}}$) 风电机组, 太阳能PV/T机组满负荷运行。燃气轮机根据用户的电负荷需求和风光最大电力输出差运行。用户冷热负荷由太阳能PV/T机组和热回收装置提供的热量满足。如果热需求大于太阳能PV/T机组和燃气轮机回收热量之和, 不足部分由燃气锅炉提供。

3) 当电负荷需求大于燃气轮机和风光最大电

力供应之和时 ($P_{\text{LE}} > P_{\text{PV}}^{\text{max}} + P_{\text{WT}}^{\text{max}} + P_{\text{G}}^{\text{max}}$), 风力发电机、太阳能PV/T和燃气轮机满荷运行, 不足电力由电网提供。提供冷热负荷方式同情况2)。

4.2 热跟随运行策略

1) 热负荷和吸收式制冷机的热需求 (用 Q_{PC} 表示) 小于等于太阳能PV/T机组最大输出时 ($Q_{\text{LQ}} + Q_{\text{PC}} \leq Q_{\text{PV}}^{\text{max}}$), PV/T机组根据用户冷热负荷变化运行, 燃气轮机和燃气锅炉不运行, 电负荷需求由风力发电机、PV/T机组和电网满足。

2) 热负荷和吸收式制冷机的热需求大于PV/T机组最大输出, 而小于等于PV/T机组和燃气轮机输出的最大热量之和 ($Q_{\text{PV}}^{\text{max}} < Q_{\text{LQ}} + Q_{\text{PC}} \leq Q_{\text{PV}}^{\text{max}} + Q_{\text{G}}^{\text{max}}$) 时, 太阳能PV/T机组满荷运行, 燃气轮机根据冷热负荷需求与太阳能PV/T最大输出之差运行。电负荷由风力发电机、太阳能PV/T和燃气轮机提供。若不能满足, 由电网提供补充差额。

3) 热负荷和吸收式制冷机无法由太阳能PV/T机组和燃气轮机满足时 ($Q_{\text{LQ}} + Q_{\text{PC}} > Q_{\text{SC}}^{\text{max}} + Q_{\text{PGU}}^{\text{max}}$), 太阳能PV/T机组和燃气轮机满荷运行, 不足热力部分由燃气锅炉补充。若用户电力需求大于风力发电机、太阳能PV/T和燃气轮机最大电力输出之和, 不足部分由电网补充。

4.3 模型的求解

冷热电联供系统的多目标优化配置具有多目标、非线性等特点, 采用NSGA-II对模型进行求解, 算法流程图如图3所示。

5 算例分析

算例选取北方某地的冷热电联供系统为研究对象, 采用全年8 760 h风速、光照强度和负荷数据, 如图4、表1所示。待选风机的参数: $v_{\text{ci}} = 4 \text{ m/s}$, $v_{\text{cr}} = 12 \text{ m/s}$, $v_{\text{co}} = 24 \text{ m/s}$ 。待选PV/T机组参数: $I_{\text{min}} = 0.1 \text{ km/m}^2$ 。NSGA-II参数设置: 最大迭代次数为100, 交叉率为0.85, 变异率为0.15。风和负荷的多状态划分: 风速 $D_{\text{W}} = 6$, 光照强度 $D_{\text{H}} = 4$, $D_{\text{G}} = 4$, 冷热电负荷的 $D_{\text{L}} = 4$ 。以1 h为时间步长, 分别对采暖季(1~3月和11~12月共5个月), 制冷季(6~8月共3个月), 过渡季(4~5

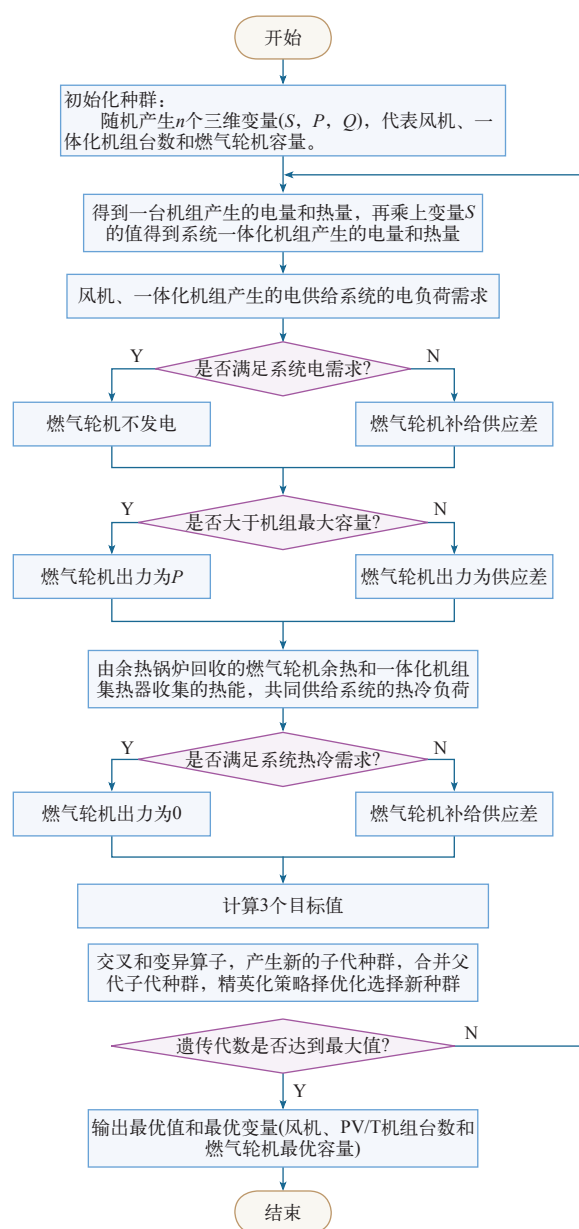


图3 算法流程

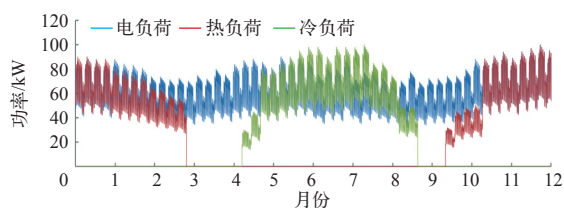


图4 全年的冷热电负荷

月和9~10月共4个月)中分别构造典型日。利用各典型日风速、光照强度和负荷概率密度函数,对每个时刻的风光出力 and 负荷进行建模,有效模拟出风机和PV/T机组出力及冷热电负荷随机性特

点,建立多目标优化配置模型。分别在电跟随和热跟随运行策略下对典型日进行仿真计算,得到两组Pareto最优解集 A_1 、 B_1 。

表1 设备生命周期清单数据

类型	寿命/年	安装成本/(万元/kW)	运行维护系数/(元/kW·h)	效率
空冷型PV/T	10	3.250	0.096	—
风力发电机	20	2.05	0.064	0.125
燃气轮机	20	1.250	0.032	—
燃料锅炉	20	4.015	0.03	0.65
余热回收装置	20	4.146	0.045	0.65
吸收式制冷机	15	3.05	0.048	0.65

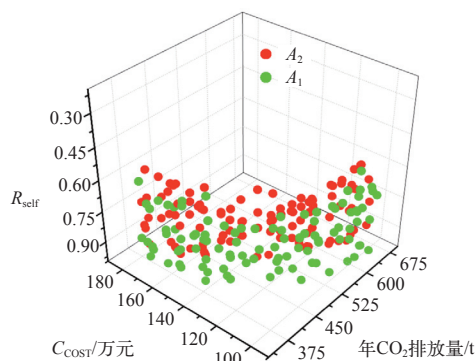
再采用已有的基于确定历史场景的优化配置方法,在相同的目标约束与运行策略下仿真得到Pareto最优解集 A_2 、 B_2 用以检验模型和方法有效性。

对各个时刻的风、光和冷热电负荷概率密度函数进行随机抽样,获得各季度随机场景数据。从而构造出两个随机场景,并在这些随机场景下比较分析最优解集 A_1 、 B_1 和最优解集 A_2 、 B_2 。

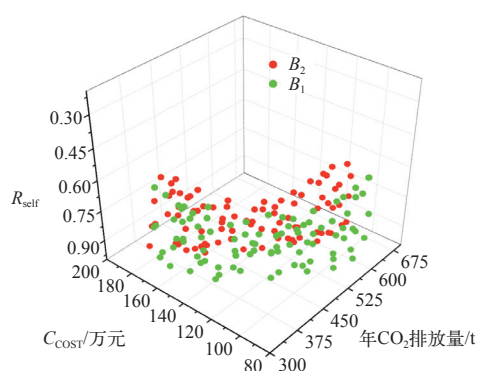
5.1 最优解集

在随机场景中择取两个具有一定代表性的随机场景,将不同运行策略下的两个最优解分别在这些随机场景下运行,得到结果如图5所示。

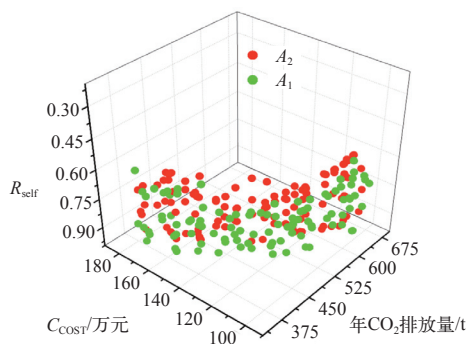
可发现采用电跟随策略下两个最优解集 A_1 、 A_2 与采用热跟随策略下两个最优解集 B_1 、 B_2 ,在各个随机场景下运行结果的大致趋势是相同的。即年运行成本 C_{COST} 和年 CO_2 排放量 E_{CO_2} 两个优化目标呈现互斥态势,年运行成本 C_{COST} 和自平衡能力 R_{self} 两



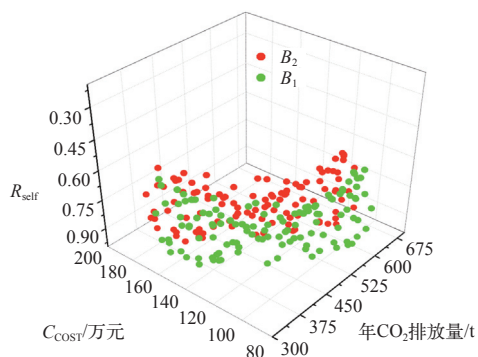
(a) 电跟随策略下随机场景1



(b) 热跟随策略下随机场景1



(c) 电跟随策略下随机场景2



(d) 热跟随策略下随机场景2

图5 两组最优解集运行结果比较

个优化目标呈现相同的变化态势。随着 C_{COST} 的增加,年 E_{CO_2} 排放量不断减少, R_{self} 不断上升。投资运行成本的提高减少了系统向大电网购电量和天然气购买量。随着自平衡能力的提高,系统的风光渗透率提高。因此,冷热电联供系统中可再生能源渗透率的提高需要经济成本的增加为代价。热跟随策略的 C_{COST} 要低于电跟随策略,但 E_{CO_2} 高于电跟随策略。

最优解集 A_1 、 A_2 与 B_1 、 B_2 ,在年 E_{CO_2} 相同时最优解集 A_1 、 B_1 的 C_{COST} 分别低于最优解集 A_2 、 B_2 的

C_{COST} ; C_{COST} 相同时,最优解集 A_1 、 A_2 的 E_{CO_2} 与 R_{self} 低于最优解集 B_1 、 B_2 的 E_{CO_2} 与 R_{self} 。可得出:联供系统在风速、光照强度和负荷发生一定程度波动的随机场景下,相对于基于确定历史场景优化配置方法得出的最优解集 A_2 、 B_2 ,本文提出的模型和方法在两种不同运行策略下得出的最优解集 A_1 、 B_1 在存在一定优势。

5.2 系统配置

从最优解集 A_1 和 A_2 中选出在 C_{COST} 为130万元左右的配置方案比较分析,下文将两个系统配置分别称之为配置 A_1 和配置 A_2 。

(1) 不同配置下可再生能源渗透率比较

对比采用配置 A_1 和配置 A_2 运行时,可再生能源渗透率的结果。如图6所示可再生能源渗透率随自平衡能力增大而提高。配置 A_1 的可再生能源渗透率略高于配置 A_2 。说明本文提出的方法可有效提升可再生能源渗透率。

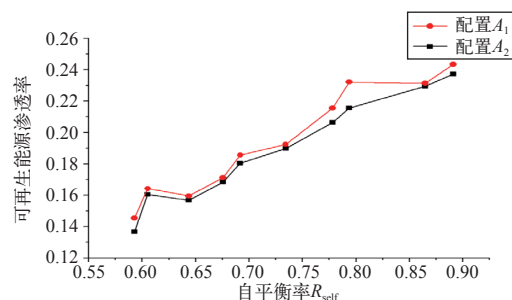


图6 两种配置下可再生能源渗透率

(2) 不同配置下的多目标比较

通过表2和表3可得出配置 A_1 与 B_1 的风机和PV/T机组容量少于配置 A_2 与 B_2 ,而燃气轮机容量多于 A_2 与 B_2 。再比较两种配置在历史场景与随机场景下的运行结果。

表2 电跟随策略下联供系统配置方案

设备	风机	PV/T机组	燃气轮机
配置 A_1 容量/kW	23.6	11.3	38.4
配置 A_2 容量/kW	25.2	12.8	40.7

表3 热跟随策略下联供系统配置方案

设备	风机	PV/T机组	燃气轮机
配置 B_1 容量/kW	21.2	12.6	41.8
配置 B_2 容量/kW	23.7	14.3	43.1

在历史场景下配置 A_1 的 C_{COST} 比配置 A_2 低8.35%，配置 B_1 比配置 B_2 低9.02%。年 CO_2 排放量配置 A_1 比配置 A_2 高3.67%，配置 B_1 比配置 B_2 高3.43%。自平衡率配置 A_1 比配置 A_2 高2.36%，配置 B_1 比配置 B_2 高2.59%。

在两个随机场景下配置 A_1 、 B_1 的 C_{COST} 低于配置 A_2 、 B_2 。年 CO_2 排放量和自平衡率 A_1 、 B_1 略高于 A_2 、 B_2 。 B_1 的安装成本和运行维护成本低于配置 A_2 与 B_2 ，配置 A_1 与 B_1 的年 CO_2 排放量也略低于配置 A_2 与 B_2 。说明在风速、光照强度和负荷发生一定波动情况下，配置 A_1 、 B_1 在经济、环保和自平衡能力方面表现较优，更为适用合理。

最后得出：在风速、光照强度和负荷发生一定程度波动的不确定状态下，系统经济性、环保性和自平衡能力等指标不能保证处于最优状态，冷热电联供系统的优化配置需要考虑风光出力 and 负荷不确定性的影响。本文提出的考虑不确定性的含可再生能源冷热电联供系统优化的配置方法具有一定有效性。

6 结束语

本文考虑冷热电联供系统不确定性对冷热电联供系统优化配置的影响。首先采用基于Wasserstein距离的改进多状态理论对可再生能源不确定性建模，进而制定不同运行策略对系统配置的经济性、环保性和自平衡能力进行多目标优化。对比使用不同方法在各场景中仿真得出的优化配置方案的在各个指标下的优劣，结果表明所提出的优化配置模型和方法在冷热电联供系统多目标优化配置中具有一定优势，有效提高了系统经济性、环保性和自平衡能力。

参考文献

[1] 刘小军, 李进, 曲勇. 冷热电联供 (CCHP) 分布式能源系统建模综述 [J]. 电网与清洁能源, 2012 (7): 63-68.

[2] 荆有印, 白鹤, 张建良. 太阳能冷热电联供系统的多目标优化设计与运行策略分析 [J]. 中国电机工程学报, 2012 (20): 82-87.

[3] 赵峰, 张承慧, 孙波. 冷热电联供系统的三级协同整体优化设计方法 [J]. 中国电机工程学报, 2015 (15): 3785-3793.

[4] 吴红斌, 王东旭, 刘星月. 太阳能冷热电联供系统的策略评估和优化配置 [J]. 电力系统自动化, 2015 (21): 46-51.

[5] Hochreiter R, Pflug G C. Financial scenario generation for stochastic multi-stage decision processes as facility location problems [J]. Annals of Operations Research, 2007, 152 (1): 257-272.

[6] 王群, 董文略, 杨莉. 基于Wasserstein距离和改进K-medoids聚类的风电/光伏经典场景集生成算法 [J]. 中国电机工程学报, 2015 (11): 2654-2661.

[7] 余金龙, 赵文会, 赵波. 基于多状态建模的独立型微网优化配置 [J]. 电力系统自动化, 2015 (14): 3616-3625.

[8] 黎静华, 韦化, 莫东. 含风电场最优潮流的Wait-and-See模型与最优渐进场景分析 [J]. 中国电机工程学报, 2012 (22): 15-24.

[9] Wang J J, Zhai Z Q, Zhang C F, et al. Environmental impact analysis of BCHP system in different climate zones in China [J]. Energy, 2010, 35 (10): 4208-4216.

[10] Abdollahi G, Meratizaman M. Multi-objective approach in thermoenviromonic optimization of a small-scale distributed CCHD system with risk analysis [J]. Energy & Buildings, 2011, 43 (11): 3144-3153.

[11] 郑庆琳, 白路, 梁宗存. 不同结构PV/T系统的热电性能研究 [J]. 可再生能源, 2015 (11): 1603-1607.

[12] 荆树春, 朱群志, 段芮. 联合热泵的光伏光热一体化系统的性能评价 [J]. 可再生能源, 2013 (11): 1-4.

[13] 赵波, 张雪松, 洪博文. 大量分布式光伏电源接入智能配电网后的能量渗透率研究 [J]. 电力自动化设备, 2012 (8): 95-100.

(收稿日期: 2017-02-14) **EA**