

基于随机动态规划的多能联供系统冷热电经济分配模型

王亚楠, 吴杰康, 毛晓明

(广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510006)

摘要:建立了风力发电机组与燃气轮机联合驱动下含压缩空气储能装置的多能联供系统冷热电经济分配模型。该模型考虑风电输出功率和冷、热、电负荷的波动特性,利用概率密度函数对系统的随机变量进行拟合。以投资成本和运行成本作为目标函数,以冷、热、电负荷平衡及各设备出力特性作为约束条件,采用随机动态规划对系统能源进行合理的调度和分配以达到最优经济效益,并通过控制系统的制冷比和风电输出功率平抑系数,实时调整系统各设备的容量及运行状态。实例的计算结果表明,压缩空气储能能够有效地平抑风电输出功率的波动,减少弃风经济损失;相比于固定能量分配,采用动态规划对系统的能量进行分配具有更多的价值和优势。

关键词:多能联供系统;冷热电经济分配;压缩空气储能;随机动态规划;模型

中图分类号:TM 732

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.06.003

0 引言

在过去的 2 个世纪内,由于人口增长、技术进步,能源消耗迅速增加,能源部门公布的数据显示,住宅区和商业区用于供暖、制冷、供电所占的能耗为总能耗的 16%,能耗的增加也相继带来许多的环境、经济问题^[1-2]。相比于传统的分供系统,多能联供及冷热电联供(CCHP)系统具有节能、环保、高效等优点^[3-5]。

为了设计更多的环境友好型多能联供系统,在传统的煤、天然气等单能源驱动的情况下,逐渐发展了风能、太阳能以及生物质能等可再生能源与一次性能源联合驱动的 CCHP 系统^[6-10]。其中具有多种可再生能源互补的 CCHP 系统的性能受太阳能辐射强度、环境温度和沼气中甲烷含量等的影响较大,需在合适的环境参数下才能保证系统稳定、高效的运行^[11]。构建具有多种可再生能源互补的 CCHP 系

统不仅可以降低生产成本,还极大地增加了系统稳定性和可靠性^[12],在环境保护等方面也获益良多。

针对多能联供系统,国内外专家学者在经济、环境以及热力学性能等方面做了大量的分析和评估^[13-15]。分析实验结果可知,通过梯级利用化石燃料燃烧所释放的能量可提高一次性能源利用率至 80%,此外,燃料经过燃烧分解循环利用可减少 30% 的温室气体排放量^[16]。大量研究通过对多能联供系统进行设计与运行优化,并与分供系统进行比较,可得结论:相比于传统分供系统,联供系统具有经济效益优、环境友好、一次性能源利用率高等优势^[17]。

在对多能联供系统进行多目标优化时,常用的模型有线性规划、非线性规划以及动态规划模型。文献[18]罗列了 11 种典型多能联供系统的结构,选取电气、烟气、蒸汽、热水、空气作为基本母线,并对其结构中的能量流通进行表述,以系统总运行费用最小为目标,采用混合整数线性规划方法进行求解;文献[19]对系统的经济、环境以及热力学性能方面进行了多目标综合优化,并采用粒子群优化算法对模型进行求解;文献[20]运用动态规划方法优化 CCHP 系统的运行策略,从而达到最小化总成本的目的;文献[21]提出一种风机、压缩空气储能装置相结合的 CCHP 系统,并对该系统中各设备的火用效率进行分析;文献[22]针对 CCHP 系统中负荷的随机性、不确定性等特征,建立负荷随机模糊模型。

结合上述文献的研究思路,本文将风能和压缩空气储能系统相结合,并将其加入传统的 CCHP 系统中,这样既可以充分利用可再生清洁能源,又利用了压缩空气储能装置改善风能的随机性与不确定性因素对电网造成的电压波动等影响。对系统中的随机变量进行机会约束建模,以初始投资和运行费用为目标,采用随机动态规划方法对能量进行分配和调度,以优化系统的经济性能。

收稿日期:2018-08-20;修回日期:2019-04-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51567002,50767-001);国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2007AA-04Z197);高等教育博士点专项研究基金资助项目(200945-01110002);广东自然科学基金资助项目(S2013010012431,2014A030313509);广东省公益研究与能力建设专项资金资助项目(2014A010106026);广东省应用型科技研发专项资金资助项目(2016B020244003)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51567002,50767001), the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2007-AA04Z197), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education(20094501110002), the Natural Science Foundation of Guangdong(S2013010012431,2014A03-0313509), Guangdong Special Fund for Public Welfare Study and Ability Construction(2014A010106026) and Guangdong Applied Science and Technology Research Foundation(2016B-020244003)

1 带压缩空气储能装置的多能联供系统

1.1 多能联供系统的结构

风能作为清洁型能源,具有间歇性、波动性等特征,将带有压缩空气储能装置的风力发电机组与 CCHP 系统相结合,既充分利用了可再生清洁能源,又有效地减少了风力发电机组输出功率的间歇性给用电系统带来的影响。

图 1 为本文所提 CCHP 系统的结构图。其中能量以冷、热、电 3 种形式流通,一部分风能经风力发电机组产生电能可送入电网或供应区域电负荷,而过剩风能经压缩机存入储气罐中,当储气罐中的内能达到一定的程度后解压缩并进入燃烧室内燃烧以供燃气轮机发电。燃气轮机发电的同时产生的热能被余热锅炉吸收,可供应区域热负荷或被吸收式制冷机吸收产生冷能。当吸收式制冷机产生的冷能不足时,由电制冷机提供冷能;而当余热锅炉输出的热量不足时,由燃气锅炉补足;当系统输出电量大于电负荷时,可将多余电量售给电网,从而为系统盈利;当系统输出电量小于负荷电量时,可从电网购电,并将购电费用计入系统运行总消耗费用。

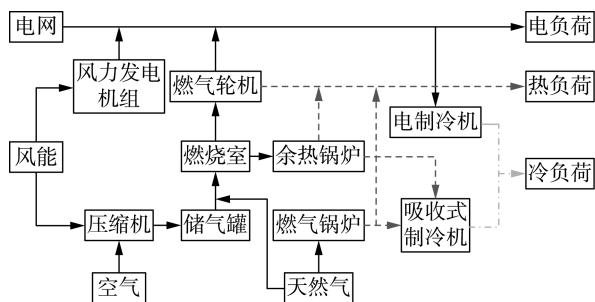


图 1 多能联供系统结构

Fig.1 Structure diagram of multi-energy supply system

1.2 系统能量流及其约束

1.2.1 热能平衡约束

系统的热能量输出应不小于热能量需求,即余热锅炉、燃气锅炉的产热总和应不小于吸收式制冷机吸收的热量与系统热负荷之和。热能平衡约束为:

$$Q_{H,t} + Q_{B,t} \geq Q_{A,t} + U_{H,t} \quad (1)$$

其中, $Q_{H,t}$ 、 $Q_{B,t}$ 、 $Q_{A,t}$ 分别为 t 时段余热锅炉的产热量、燃气锅炉的产热量和吸收式制冷机吸收的热量; $U_{H,t}$ 为 t 时段系统的热负荷。

1.2.2 电能平衡约束

系统的电能与电网产生交互,当系统发电量大于电负荷时,向电网输送电能;当系统发电量小于电负荷时,向电网购买电能。电能平衡约束为:

$$P_{W,i,t} + P_{GT,j,t} + P_{gd,t} \geq P_{E,t} + U_{E,t} \quad (2)$$

其中, $P_{W,i,t}$ 、 $P_{GT,j,t}$ 、 $P_{E,t}$ 分别为 t 时段节点 i 处风力发电机的输出功率、节点 j 处燃气轮机的输出功率和电制冷机吸收的电能; $U_{E,t}$ 为 t 时段系统的电负荷;

$P_{gd,t}$ 为 t 时段系统与电网的交互电量。

1.3 随机变量的机会约束

风力发电机组的出力具有随机性和不确定性,同时,园区内的冷、热、电负荷预测也不完全准确。在此情况下提出随机机会约束,随机机会约束是指:当随机变量在一定范围内波动时,满足约束条件的概率应不小于所给定的置信水平。将 CCHP 系统中的冷、热能量约束表达为机会约束形式,见式(3)。

$$\begin{cases} P\{Q_{H,t} + Q_{B,t} \geq Q_{A,t} + U_{H,t}\} \geq \alpha \\ P\{P_{W,i,t} + P_{GT,j,t} + P_{gd,t} \geq P_{E,t} + U_{E,t}\} \geq \beta \end{cases} \quad (3)$$

其中, α 、 β 为机会约束成立的置信度。

2 冷热电经济分配模型

2.1 目标函数

2.1.1 年初始投资费用

年初投资费用的计算表达式为:

$$F_1 = R \sum_{m=1}^M N_m C_m \quad (4)$$

其中, R 为投资回收系数; N_m 为系统内第 m 台设备的容量; C_m 为系统内第 m 台设备的单位容量初投资费用; M 为设备总数。

2.1.2 年运行费用

系统的年运行费用包括系统维护费用(见式(5))、系统能耗费用(见式(6))两方面,其中维护费用是指因设备损耗进行维修造成的费用;能耗费用是指系统消耗燃料的费用及向电网购电的费用。

$$F'_2 = \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^3 T_s \sum_{t=1}^{24} C_{o,m,t} P_{m,t} \quad (5)$$

$$F''_2 = \sum_{s=1}^3 T_s \sum_{t=1}^{24} (P_{gd,t} C_{gd,t} + m_{f,t} C_a) \quad (6)$$

$$F_2 = F'_2 + F''_2 \quad (7)$$

$$C_{gd,t} = \begin{cases} c_{gb} & P_{gd,t} < 0 \\ c_{st} & P_{gd,t} \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中, s 为系统运行过程中夏季、冬季及春秋的典型日; T_s 为第 s 个典型日运行的天数; $C_{o,m,t}$ 为第 m 台设备在 t 时段的维护费用; $P_{m,t}$ 为 CCHP 系统中第 m 台设备在 t 时段的出力; c_{st} 、 c_{gb} 分别为购电、售电电价; C_a 为天然气价格; $m_{f,t}$ 为 t 时段的天然气消耗量。

2.2 约束条件

系统约束条件包括基于随机机会约束的热能平衡约束(式(1))、系统电能平衡约束(式(2))以及设备运行约束(式(9))。

$$P_{\min}^m \delta_{m,t} \leq P_{m,t} \leq P_{\max}^m \delta_{m,t} \quad (9)$$

其中, $P_{\min}^m$ 、 $P_{\max}^m$ 分别为第 m 台设备的最小输出功率和最大输出功率; $\delta_{m,t}$ 为 t 时段第 m 台设备是否工作

的状态变量,工作时取值为1,不工作时取值为0。

2.3 随机机会约束条件函数的处理

系统负荷服从正态分布,因此式(3)可转化式(10)及(11)进行计算。

$$\begin{cases} Q_{H,t} + Q_{B,t} - Q_{A,t} \geq Z_1 \\ P_{W,i,t} + P_{GT,j,t} + P_{gd,t} - P_{E,t} \geq Z_2 \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} Z_1 = \mu_{U_H} + z_{(1-\alpha)/2} \sigma_{U_H} \\ Z_2 = \mu_{U_E} + z_{(1-\beta)/2} \sigma_{U_E} \end{cases} \quad (11)$$

其中, μ_{U_H} 、 σ_{U_H} 分别为系统热负荷的期望值和标准差; μ_{U_E} 、 σ_{U_E} 分别为系统电负荷的期望值和标准差; $z_{(1-\alpha)/2}$ 、 $z_{(1-\beta)/2}$ 分别为标准正态分布的 $(1-\alpha)/2$ 、 $(1-\beta)/2$ 分位数。

3 随机动态规划

3.1 随机动态规划的基本理论

动态规划是由美国数学家 Bellman 等人^[23]提出的用于求解控制变量的最优化问题。但在实际问题中,控制变量往往会受到随机因素的影响,使问题的求解超出动态规划的适用范围。为了解决该类随机动态过程的最优控制问题,在当前状态下选用某一决策后,其下一状态从确定状态变为符合某种概率分布。随机动态规划的状态转移过程如图2所示。图中, x 为阶段状态; k 为状态阶段; V 为目标函数; A 为随机变量的集合; Q 为概率密度函数。

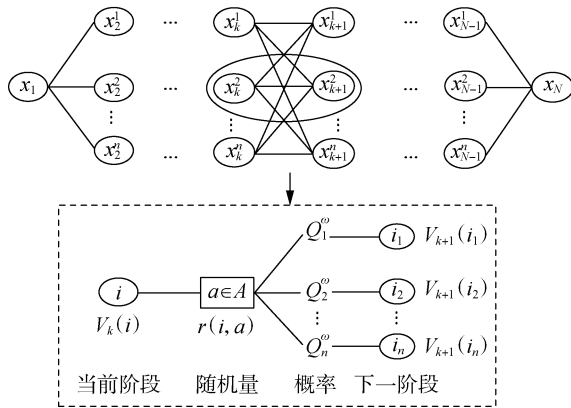


图2 系统状态转移过程

Fig.2 Transfer process of system state

3.2 基于随机动态规划的冷热电经济分配模型

由于风能具有随机性、不确定性等特征,风力发电机组输出功率产生波动,给用户带来电能质量、稳定等多方面的影响。《风电场接入电力系统技术规定》提出^[24]:对于装机容量小于30 MW的风电场而言,其10 min功率最大变化率不得超过10 MW。为了平抑风电场输出功率,本文加入压缩空气储能装置^[25]对风电场的功率进行调节。风电输出功率平抑系数为储能系统吸收风能的比例 θ_1 。而系统制冷比为吸收式制冷机提供的冷量占总冷负荷的

百分比 θ_2 。通过分配 θ_1 、 θ_2 的值来提高系统的经济性。

多能联供系统中的随机变量包括风电输出功率和冷、热、电负荷,状态变量为各设备出力,决策变量为风电输出功率平抑系数 θ_1 和制冷比 θ_2 。在 t 时段系统的状态为 x_t ,则 $t+1$ 时段系统的状态 x_{t+1} 是在随机变量 ω_t 的输入条件下做出的相关决策,其相关量的表达式为:

$$x_{t+1} = T(x_t, \omega_t, u_t) = x_t + \omega_t - u_t \quad (12)$$

其中, u_t 为决策变量; ω_t 为随机变量。

设置时段 $t \in [1, 24]$,以状态变量 x_t 的总消耗费用最小为目标函数,制定动态规划中各时段的决策变量值。各时段的最优策略决定了系统的总消耗费用,且目标函数和最优序列满足方程:

$$f(x_t) = \min_{u_k} \{f(x_{t-1}) + T(x_t, \omega_t, u_t)\} \quad (13)$$

其中, f 为最小经济损耗值。

按照上述递推公式,以1 d为计算周期,每小时为计算节点,从第1个节点到第24个节点的计算工程中,每次计算开始时首先输入扰动因子即随机变量 ω_t 的值,并结合约束条件,完成决策变量的制定。按照每个节点计算得到的最优决策方案,组成最优经济分配点。

3.3 求解步骤

根据上述分析,采用随机动态规划算法求解多能联供系统的经济分配模型的流程如图3所示。图中, i 为节点数; j 为迭代次数; N_1 为最大迭代次数; $\Pi = \Pi \setminus \mu$ 表示集合 Π 中除去 μ 后剩余的决策变量集合; δ 为随机变量的干扰项值。

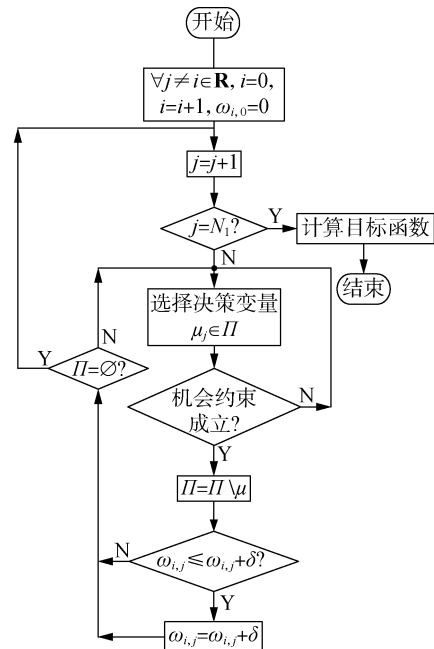


图3 随机动态规划求解流程

Fig.3 Flowchart of stochastic dynamic programming

4 算例分析

4.1 冷、热、电负荷

为了简化计算,本文以某地区夏季、冬季和过渡季的典型日为例,夏季、冬季、过渡季对应的天数分别为 94 d、88 d、183 d,典型日的负荷曲线见图 4。由图 4 可看出,该地区的电负荷在一年内变化幅度很小,每日的用电量不受季节变化的影响,而冷、热负荷在冬季、过渡季与夏季呈相反状态。根据负荷需求,采用 3 台额定功率为 750 kW 的风力发电机组和 2 台额定功率为 1 210 kW 的燃气轮机进行联合供应。本文算法设置周期为 1 d,将其分为 24 个时段(各时段时长 1 h),状态变量为系统冷、热、电能量的产出与负荷需求的差值,决策变量为系统中风电输出功率平抑系数 θ_1 、系统制冷比 θ_2 。

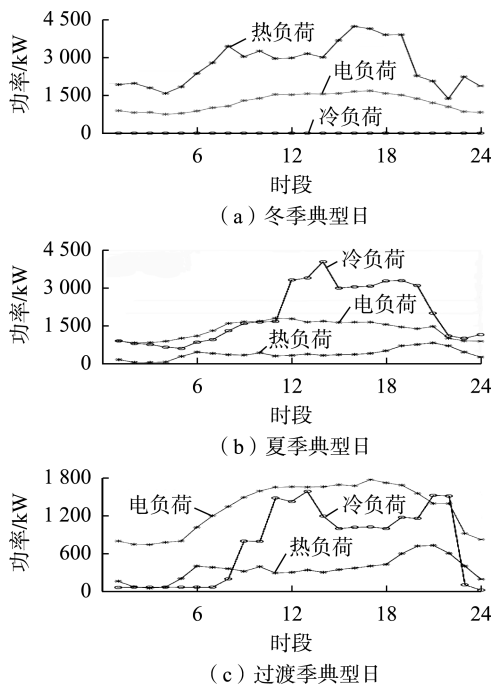


图 4 典型日的冷、热、电负荷曲线

Fig.4 Cooling, heating and electrical load curves of typical days

4.2 计算结果分析

当 θ_1 、 θ_2 变化时,冬季、过渡季和夏季典型日系统运行费用的仿真结果如图 5 所示。

由仿真结果可以看出,随着 θ_1 的增加,系统运行费用逐渐趋于稳定,而 θ_2 的变化对系统运行费用的影响受天气因素的限制。冬天冷负荷需求为 0,因此系统运行费用不受 θ_2 变化的影响;在过渡季节,前期 θ_1 变化对系统经济消耗的影响较大,而 θ_2 的变化对系统经济消耗的影响较小;在夏季, θ_1 的变化对系统经济消耗的影响较小,而随着 θ_2 的增加,系统经济消耗逐渐降低且在后期有增加的趋势。

对多能联供系统的冷、热、电进行经济分配,得

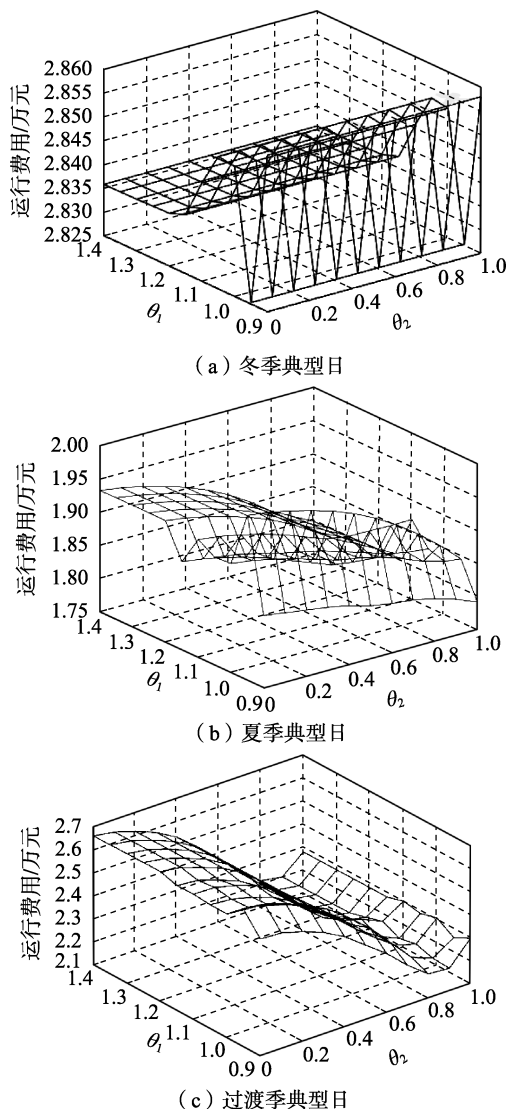


图 5 典型日系统运行费用的计算结果

Fig.5 Calculative results of system operation costs in typical days

到典型日每个时段不同 θ_1 和 θ_2 值下系统运行费用的计算结果,分别如表 1—3 所示。

表 1 冬季典型日不同 θ_1 和 θ_2 值下系统运行费用的计算结果

Table 1 Calculative results of system operation costs under different values of θ_1 and θ_2 in typical winter day

时段	θ_1	θ_2	运行费用/元	时段	θ_1	θ_2	运行费用/元
1	0.95	—	757.04	13	1.15	—	784.12
2	1.40	—	667.23	14	1.05	—	756.04
3	0.90	—	653.06	15	1.00	—	776.83
4	1.20	—	674.42	16	0.90	—	779.35
5	0.90	—	655.82	17	1.15	—	840.64
6	1.20	—	657.74	18	1.10	—	1 062.32
7	1.25	—	679.60	19	0.95	—	1 004.31
8	1.40	—	726.39	20	1.05	—	966.12
9	1.00	—	765.86	21	1.05	—	744.57
10	0.95	—	964.67	22	1.40	—	697.82
11	1.20	—	907.30	23	1.05	—	661.66
12	0.90	—	889.03	24	1.10	—	652.97

表2 过渡季典型日不同 θ_1 和 θ_2 值下系统运行费用的计算结果

Table 2 Calculative results of system operation costs under different values of θ_1 and θ_2 in typical day of transition season

时段	θ_1	θ_2	运行费用/元	时段	θ_1	θ_2	运行费用/元
1	0.95	0.9	156.86	13	1.10	0.6	514.87
2	1.40	0	151.38	14	1.15	0.6	452.25
3	0.90	0	132.92	15	1.00	0.4	414.00
4	1.20	0	158.28	16	1.05	0.3	403.80
5	0.90	0	170.70	17	1.15	0.6	480.44
6	1.40	0.4	232.02	18	0.90	1.0	759.41
7	1.25	0.8	259.00	19	0.95	1.0	695.32
8	1.00	0	275.53	20	1.05	1.0	661.69
9	0.90	0.1	325.85	21	1.10	0.6	547.25
10	0.95	1.0	664.81	22	1.00	0.3	478.25
11	1.30	0.9	549.50	23	1.05	0.1	218.84
12	0.9	0.8	532.08	24	0.95	1.0	161.03

表3 夏季典型日不同 θ_1 和 θ_2 值下系统运行费用的计算结果

Table 3 Calculative results of system operation costs under different values of θ_1 and θ_2 in typical summer day

时段	θ_1	θ_2	运行费用/元	时段	θ_1	θ_2	运行费用/元
1	0.95	0.6	281.46	13	1.10	0.5	732.29
2	1.00	0	166.13	14	1.15	0.5	793.74
3	0.95	0	183.27	15	1.00	0.4	614.44
4	1.35	0.1	176.34	16	1.05	0.4	627.61
5	1.10	0	235.83	17	1.00	0.5	693.91
6	1.00	0	298.99	18	0.90	0.6	801.22
7	1.40	0.6	407.07	19	1.20	0.6	803.56
8	0.95	0.4	434.18	20	1.00	0.6	779.24
9	0.90	0.4	468.66	21	1.00	0.5	621.63
10	1.15	0.8	634.78	22	1.20	0	337.35
11	1.30	0.7	576.16	23	0.90	0.2	300.98
12	1.15	0.6	768.78	24	1.00	0.2	272.10

由表1可看出,在冬季典型日,通过仿真得出 θ_2 的变化对系统各时段的运行费用没有影响,根据不同的负荷及风速变化情况适当地调整风力发电机组的滤波系数有利于减少系统运行费用。在过渡季节、夏季通过实时调整 θ_1 和 θ_2 的值,可达到降低系统运行费用的目的。

在对多能联供系统的冷、热、电能进行经济分配的模型中,与固定能量分配方法相比,本文所提计算方法计算所得冬季、过渡季和夏季典型日的系统运行费用分别减少了 9 649.24 元、8 892.38 元以及 11 555.08 元,年总费用减少了 35.626 万元。

5 结论

本文建立了风力发电机组、燃气轮机联合驱动下的多能联供系统模型,并采用随机动态规划算法对系统的冷、热、电能源进行经济分配,所得结论如下。

(1) 加入压缩空气储能装置平抑风力发电机组输出功率的波动,提高了多能联供系统的能源分配和调度能力以及安全稳定性能。

(2) 采用随机机会约束处理风电、负荷随机性,保证了系统经济分配决策的可靠性;采用随机动态规划对多目标函数进行求解,能实时调整系统的运行状态,减少经济损失。

(3) 通过实验结果的分析、对比可得到,采用动态规划对多能联供系统的冷、热、电能进行合理分配和调度在经济性能方面较常规方法具有显著的优势。

参考文献:

- [1] 周晓倩,余志文,艾芊,等. 含冷热电联供的微网优化调度策略综述[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):26-33.
ZHOU Xiaolian, YU Zhiwen, AI Qian, et al. Review of optimal dispatch strategy of microgrid with CCHP system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 26-33.
- [2] CHO H, SMITH A D, MAGO P. Combined cooling, heating and power: a review of performance improvement and optimization[J]. Applied Energy, 2014, 136: 168-185.
- [3] JING Y Y, BAI H, WANG J J, et al. Life cycle assessment of a solar combined cooling heating and power system in different operation strategies[J]. Applied Energy, 2012, 92: 843-853.
- [4] 吴杰康,熊焰. 风、水、气互补发电模型的建立及求解[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 603-609.
WU Jiekang, XIONG Yan. Establishment and solution of the complementary power generation model of wind-energy, hydro-energy and natural gas[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 603-609.
- [5] 姜子卿,郝然,艾芊,等. 基于冷热电多能互补的工业园区互动机制研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 260-267.
JIANG Ziqing, HAO Ran, AI Qian, et al. Interaction mechanism of industrial park based on multi-energy complementation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 260-267.
- [6] XIA J X, WANG J F, LOU J W, et al. Thermo-economic analysis and optimization of a Combined Cooling and Power (CCP) system for engine waste heat recovery[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 128: 303-316.
- [7] 蒋润花,曾蓉,李洪强,等. 考虑气候条件及建筑类型等因素的分布式冷热电三联产系统的多目标优化及评估[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3206-3213.
JIANG Runhua, ZENG Rong, LI Hongqiang, et al. Multi-objective optimization and evaluation of distributed CCHP system considering influence of climate condition and building type[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3206-3213.
- [8] ELCI M, OLIVA A, HERKEL S, et al. Grid-interactivity of a solar combined heat and power district heating system[J]. Energy Procedia, 2015, 70: 560-567.
- [9] SINGH O K. Performance enhancement of combined cycle power plant using inlet air cooling by exhaust heat operated ammonia-water absorption refrigeration system[J]. Applied Energy, 2016, 180: 867-879.
- [10] 熊焰,吴杰康,王强,等. 风光气储互补发电的冷热电联供优化协调模型及求解方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3616-3625.
XIONG Yan, WU Jiekang, WANG Qiang, et al. An optimization coordination model and solution for combined cooling, heating and electric power systems with complimentary generation of wind, PV, gas and energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3616-3625.
- [11] 甘霖,陈瑜玮,刘育权,等. 含可再生能源的微网冷-热-电多能流协同优化与案例分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 275-281.
GAN Lin, CHEN Yuwei, LIU Yuquan, et al. Coordinative optimi-

- zation of multiple energy flows for microgrid with renewable energy resources and case study [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(6): 275-281.
- [12] WANG J J, YANG Y. Energy, exergy and environmental analysis of a hybrid combined cooling heating and power system utilizing biomass and solar energy [J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 124: 566-577.
- [13] 周任军, 康信文, 李绍金, 等. 冷热电联供系统能量流函数及运行策略[J]. *电力自动化设备*, 2014, 34(1): 1-5.
ZHOU Renjun, KANG Xinwen, LI Shaojin, et al. Energy flow function and operational strategy of CCHP system [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2014, 34(1): 1-5.
- [14] 杨永标, 于建成, 李奕杰, 等. 含光伏和蓄能的冷热电联供系统调峰调蓄优化调度[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(6): 6-12, 29.
YANG Yongbiao, YU Jiancheng, LI Yijie, et al. Optimal load leveling dispatch of CCHP incorporating photovoltaic and storage [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(6): 6-12, 29.
- [15] 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.
WANG Wei, DUAN Shaohui, ZHANG Zhaopeng, et al. Influential factors of optimal configuration for combined cooling heating and power systems [J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2013, 25(4): 156-161.
- [16] 刘星月, 吴红斌. 太阳能综合利用的冷热电联供系统控制策略和运行优化[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(12): 1-6.
LIU Xingyue, WU Hongbin. A control strategy and operation optimization of combined cooling heating and power system considering solar comprehensive utilization [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(12): 1-6.
- [17] CAO L Y, WANG J F, WANG H Y, et al. Thermodynamic analysis of a Kalina-based combined cooling and power cycle driven by low-grade heat source [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 111: 8-19.
- [18] 王成山, 洪博文, 郭力, 等. 冷热电联供微网优化调度通用建模方法[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(31): 26-33.
WANG Chengshan, HONG Bowen, GUO Li, et al. A general modeling method for optimal dispatch of combined cooling, heating and power microgrid [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(31): 26-33.
- [19] 刘元园. 冷热电联供系统容量配置研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
LIU Yuanyuan. Research on the capacity configuration of CCHP system [D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [20] FACCI A L, ANDREASSI L, UBERTINI S. Optimization of CHCP (Combined Heat Power and Cooling) systems operation strategy using dynamic programming [J]. *Energy*, 2014, 66(4): 387-400.
- [21] MOHAMMADI A, AHMADI M H, BIDI M, et al. Exergy analysis of a Combined Cooling, Heating and Power system integrated with wind turbine and compressed air energy storage system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 131: 69-78.
- [22] 国家电网公司. 分布式电源接入电网规定: Q/GDW 480—2010 [S]. 北京: 中国电力科学研究院, 2010.
- [23] 徐囡. 水库优化调度随机动态规划模型及其价值评估[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
XU Nan. Stochastic dynamic programming and value evaluation in reservoir optimal operation [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [24] 王伟胜, 迟永宁, 张占奎, 等. GB/T 19963—2011《风电场接入电力系统技术规定》解读[J]. *中国标准化*, 2016, 77(2): 86-89.
WANG Weisheng, CHI Yongning, ZHANG Zhankui, et al. Standard on connecting wind farms to power system [J]. *China Standardization*, 2016, 77(2): 86-89.
- [25] 谭譞, 李国杰, 唐志伟, 等. 基于压缩空气储能的风电场功率调节及效益分析[J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(8): 33-37.
TAN Jing, LI Guojie, TANG Zhiwei, et al. Design and economic analysis of compressed air energy storage based wind farm power regulation system [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(8): 33-37.

作者简介:



王亚楠

王亚楠(1991—),女,河南安阳人,博士研究生,主要研究方向为电力系统运行与控制、冷热电联供系统优化(E-mail: y1355584199@126.com);

吴杰康(1965—),男,广西南宁人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统运行与控制(E-mail: wujiekang@163.com);

毛晓明(1971—),女,湖北大冶人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统运行与控制(E-mail: mxmsunny@163.com)。

Economic distribution model of cooling, heating and power energy in multi-energy supply system based on stochastic dynamic programming

WANG Yanan, WU Jiekang, MAO Xiaoming

(School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The economic distribution model of cooling, heating and power energy in multi-energy supply system with compressed air energy storage device driven by wind turbines and gas turbines is established. Considering the fluctuation characteristics of wind power output, cooling load, heating load and power load, the probability density function is used to fit the random variables of the system. Taking the investment cost and operation cost as the objective function, the balance among cooling, heating and power load and the output characteristics of each equipment as the constraint conditions, the stochastic dynamic programming is adopted to reasonably dispatch and distribute the system energy to achieve the optimal economic benefits. The capacity and operation state of each equipment in the system are adjusted in real time by controlling the cooling ratio of the system and the smoothing coefficient of wind power output. The calculative results of actual example show that the compressed air energy storage can effectively smooth the wind power output fluctuations and reduce the wind curtailment economic loss. Compared with the fixed energy allocation, it is more valuable and advantageous to use dynamic programming to distribute the system energy.

Key words: multi-energy supply system; economic distribution among cooling, heating and power energy; compressed air energy storage; stochastic dynamic programming; models