

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201703057



采用矩阵建模方式的冷热电 联供系统运行优化

常雨芳, 王豪, 谢昊, 张力, 刘光裕

(湖北工业大学 太阳能高效利用湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430068)

摘要: 设计一种含风力发电的冷热电联供(CCHP-Wind)系统,建立该系统优化运行模型,设定矩阵建模的优化运行方式,并以综合指标作为衡量标准,与传统的运行方式进行比较.建立系统的优化运行数学模型,采用序列二次规划算法和遗传算法对系统运行优化模型进行求解,确立系统的最优运行方式.以武汉某宾馆作为研究对象,根据 4 个季节不同的冷热电需求和风力资源,对 CCHP-Wind 系统的优化运行进行实证分析.结果表明:所设定的矩阵建模优化运行方式与传统的运行方式相比,不仅能够合理分配系统的能量流动,满足系统的各项需求,而且能够有效避免能源浪费.

关键词: 冷热电联供; 风力发电; 矩阵建模; 序列二次规划; 运行方式

中图分类号: TM 715 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2018)02-0233-07

Operation Optimization of Combined Cooling Heating and Power Systems Using Matrix Modeling Approach

CHANG Yufang, WANG Hao, XIE Hao,
ZHANG Li, LIU Guangyu

(Hubei Collaborative Innovation Center for High-Efficient Utilization of Solar Energy,
Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: This paper designs combined cooling heating and power systems with wind power generation (CCHP-Wind) systems, and establishes the optimal operation model of the system. The optimal operation mode of matrix modeling is set up and the comprehensive index is used as the measurement standard compared with the traditional operation mode. Establishing the optimization operation mathematical model in system, sequential quadratic programming methods and genetics algorithm were used to solve the optimization model, determine the optimal operation mode of the system. Taking a hotel in Wuhan as the research object, according to the different cooling heating and power demand of four seasons and wind resources, the CCHP-Wind system optimal operation was empirically analyzed. The results showed that: matrix model to optimize the operation mode of the set by compared with the traditional operation mode, can not only reasonable distribution system of energy flow, and satisfying the demand of the system, but also and can effectively avoid energy waste.

Keywords: combined cooling heating and power; wind power generation; matrix modeling; sequential quadratic programming; operation mode

收稿日期: 2017-03-24
通信作者: 常雨芳(1980-),女,副教授,博士,主要从事智能配电系统与微网、能源系统优化设计与控制的研究. E-mail:changyf@hbut.edu.cn.
基金项目: 湖北省自然科学基金资助项目(2016CFB512);湖北省太阳能省级协同创新中心开放基金资助项目(HB-SKFMS2014002)

相比于传统分供系统,冷热电联供(combined cooling heating and power,CCHP)系统效率高,污染排放少,可以实现能源的阶梯利用.CCHP 系统同时为用户提供冷、热和电的需求,可将能源利用率从传统供能的 40%提高到 70%以上^[1-2].目前,环境问题和能源问题逐渐受到人们的关注,发展风能等可再生能源可以解决环境污染,以及化石能源危机所带来的问题^[3].风能作为近几年大力发展的绿色能源之一,无污染且蕴量巨大.从能源、环境和可持续发展的角度出发,发展风能具有很大的价值^[4-6].文献[7]设计了太阳能综合利用的 CCHP 系统,在通常的 CCHP 系统中加入了太阳能的综合利用.文献[8]设计一种含可再生能源的热电联供型系统,在传统的热电联供中,增加了风电机组、光伏电池和蓄电池来满足电负荷.文献[9]提出将风能运用在 CCHP 系统的案例,但与文中在结构上有所不同,其系统的运行方式更依赖风能.本文设计基于矩阵建模,含风力发电的冷热电联供(CCHP-Wind)系统的优化运行方式,并与两种传统运行方式进行对比.

1 CCHP-Wind 系统结构设计

所设计的含风力发电的冷热电联供(CCHP-Wind)系统结构,如图 1 所示.图 1 中: $E_{\text{grid}}, E_w, E_t, E_N, E_{\text{ec}}$ 分别为电网供电量、风力发电机供电量、燃气轮机供电量、系统电负荷和电制冷消耗电量; F_m, F_t, F_b 分别为天然气消耗总量、燃气轮机消耗天然气量、燃气锅炉消耗天然气量; $Q_b, Q_a, Q_r, Q_{\text{ac}}, Q_{\text{ec}}, Q_h, Q_c$ 分别为燃气锅炉供热量、分给吸收式制冷机的热能、热回收装置供热量、吸收式制冷机供冷量、电制冷机供冷量、系统热负荷和系统冷负荷.

系统运行时,燃气轮机以天然气作为燃料,为用户提供电能.热回收装置回收利用燃气轮机产生的余热,将一部分热能提供给用户,满足用户的热负荷,另一部分热能提供给吸收式制冷机,满足用户的冷负荷需求.燃气锅炉作为热能的备用装置,在燃气轮机产生的热能不够时启动工作,产生热能.该热能一部分直接提供给系统的热负荷,另一部分提供给吸收式制冷机以满足用户的冷负荷需求.当燃气轮机提供的电和热不能满足用户的电和热需求时,不足的电由风力发电机和电网提供.

2 系统矩阵建模

2.1 系统设备的效率矩阵

定义系统设备 k 的输入向量 $V_{k,i}=[F_{k,i} \ E_{k,i} \ Q_{k,c,i} \ Q_{k,h,i}]^T$,输出向量 $V_{k,o}=[F_{k,o} \ E_{k,o} \ Q_{k,c,o} \ Q_{k,h,o}]^T$.其中: F, E, Q_c 和 Q_h 分别表示天然气量、电量、制冷量和制热量.因此,设备 k 的输入与输出关系表示为

$$V_{k,o} = H_k \cdot V_{k,i} \tag{1}$$

式(1)中: H_k 表示设备 k 的效率矩阵.

燃气轮机的输入和输出关系可以用矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} 0 \\ E_{t,o} \\ 0 \\ Q_{t,h,o} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \eta_t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1-\eta_t & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{t,i} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = H_t \cdot V_{t,i} \tag{2}$$

式(2)中: η_t 表示燃气轮机的制电效率,计算过程中设定为常数,其他设备的转换效率也设定为常数.同理,可得出燃气锅炉、热回收装置、电制冷机和吸收式制冷机的效率矩阵.

2.2 调度矩阵

由图 1 可知:天然气总量 F_m 被分为两个部分,分别提供给燃气轮机和燃气锅炉.因此, α_t 和 α_b 分别为燃气轮机和燃气锅炉的调度因子,则有 $F_t=\alpha_t F_m, F_b=\alpha_b F_m$.由此可得, $\alpha_t+\alpha_b=1$.

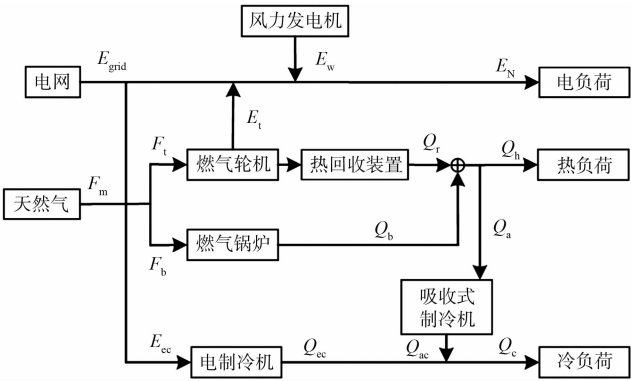


图 1 CCHP-Wind 系统结构图
Fig.1 Structure of CCHP-Wind systems

由图 1 可知, 系统电能输入由电网和风力发电机共同提供, 则有

$$E_{\text{grid}} + E_{\text{w}} = E_{\text{e}}. \tag{3}$$

式(3)中: E_{e} 为系统总输入电量。

为了方便下文的计算优化, 将各设备的输入向量改写为与系统总输入向量相关联的形式。燃气轮机的输入向量, 有

$$\mathbf{V}_{\text{t}, \text{i}} = \begin{bmatrix} \alpha_{\text{t}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{\text{m}} \\ E_{\text{e}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{D}_{\text{t}} \cdot \mathbf{V}_{\text{i}}. \tag{4}$$

同理, 可得出燃气锅炉、热回收装置、电制冷机, 以及吸收式制冷机的调度矩阵 $\mathbf{D}_{\text{b}}, \mathbf{D}_{\text{r}}, \mathbf{D}_{\text{ec}}, \mathbf{D}_{\text{ac}}$ 。

2.3 CCHP-Wind 系统的变换矩阵

由图 1 可知, 系统的输入可以表示为

$$\mathbf{V}_{\text{i}} = [F_{\text{m}} \quad E_{\text{e}} \quad Q_{\text{c}, \text{i}} \quad Q_{\text{h}, \text{i}}]^{\text{T}} = [F_{\text{m}} \quad E_{\text{e}} \quad 0 \quad 0]^{\text{T}}. \tag{5}$$

从式(5)中的第二个等式可以看出, 系统并没有制冷量和热能的输入, 虽然输入中不存在制冷量和热能, 但文中依然在输入向量中保留这两个元素, 目的是统一矩阵的形式。因此, 系统的输出可以表示为

$$\mathbf{V}_{\text{o}} = [F_{\text{o}} \quad E_{\text{N}} \quad Q_{\text{c}} \quad Q_{\text{h}}]^{\text{T}} = [0 \quad E_{\text{N}} \quad Q_{\text{c}} \quad Q_{\text{h}}]^{\text{T}}. \tag{6}$$

从式(6)中可以看出, 系统没有天然气输出。因此, CCHP 系统的变换矩阵 \mathbf{H} 可以表示为

$$\mathbf{V}_{\text{o}} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{V}_{\text{i}}. \tag{7}$$

假定电能传输时没有损失, 则系统的电负荷可以表示为

$$E_{\text{N}} = (E_{\text{e}} + E_{\text{t}})\alpha_{\text{N}} = E_{\text{e}}\alpha_{\text{N}} + E_{\text{t}}\alpha_{\text{N}}. \tag{8}$$

在系统制冷方面, 由图 1 可得

$$\begin{aligned} Q_{\text{c}} &= Q_{\text{ec}} + Q_{\text{ac}} = \alpha_{\text{ec}}E_{\text{e}}\text{COP}_{\text{ec}} + \alpha_{\text{ec}}\text{COP}_{\text{ec}} + \alpha_{\text{t}} = \\ &\eta_{\text{t}}F_{\text{m}} + [\eta_{\text{r}}(1 - \eta_{\text{t}})\alpha_{\text{t}} + \eta_{\text{b}}(1 - \alpha_{\text{t}})]\alpha_{\text{a}}F_{\text{m}}\text{COP}_{\text{ac}}. \end{aligned} \tag{9}$$

在系统制热方面, 由图 1 可得

$$Q_{\text{h}} = (Q_{\text{b}} + Q_{\text{r}})\alpha_{\text{h}} = [\eta_{\text{r}}(1 - \eta_{\text{t}})\alpha_{\text{t}} + \eta_{\text{b}}\alpha_{\text{b}}]\alpha_{\text{h}}F_{\text{m}}. \tag{10}$$

由式(8)~(10)可得出系统的变换矩阵为

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_{\text{t}}\alpha_{\text{N}}\eta_{\text{t}} & \alpha_{\text{N}} & 0 & 0 \\ \alpha_{\text{ec}}\text{COP}_{\text{ec}}\alpha_{\text{t}}\eta_{\text{t}} + [\eta_{\text{r}}(1 - \eta_{\text{t}})\alpha_{\text{t}} + \eta_{\text{b}}(1 - \alpha_{\text{t}})]\alpha_{\text{a}}\text{COP}_{\text{ac}} & \alpha_{\text{ec}}\text{COP}_{\text{ec}} & 0 & 0 \\ [\eta_{\text{r}}(1 - \eta_{\text{t}})\alpha_{\text{t}} + \eta_{\text{b}}\alpha_{\text{b}}]\alpha_{\text{h}} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \tag{11}$$

文中的主要目标就是找出适当的调度因子和系统的输入向量, 使系统所设定的目标函数值最小。

3 运行方式优化

3.1 综合指标的优化

为了更加客观地对运行进行比较, 通过综合指标进行分析。综合指标是由不同比例的能源指标、环境指标和经济指标组成。

3.1.1 能源指标 能源指标(Y_{PEC})表示系统消耗的电网电能和天然气化为统一标准后一次能源消耗量, 即

$$Y_{\text{PEC}} = E_{\text{grid}}\sigma_{\text{e}} + F_{\text{m}}\sigma_{\text{f}}. \tag{12}$$

3.1.2 环境指标 环境指标(Y_{CDE})表示消耗电网电能和天然气时所排放的 CO_2 总量, 即

$$Y_{\text{CDE}} = E_{\text{grid}}\mu_{\text{e}} + F_{\text{m}}\mu_{\text{f}}. \tag{13}$$

3.1.3 经济指标 经济指标(Y_{COST})由系统购买一次能源的费用(包括购买电网电量和天然气的费用)、系统运行排放 CO_2 所需要交纳的费用, 以及系统设备运行后所需要的维护费用组成, 有

$$Y_{\text{COST}} = E_{\text{grid}}C_{\text{e}} + F_{\text{m}}C_{\text{f}} + Y_{\text{CDE}}C_{\text{c}} + \sum_k P_k C_k. \tag{14}$$

式(14)中: P_k 和 C_k 分别表示各设备运行时所产生的能量(电能或者热能)和所对应的运行维护费用.

3.1.4 综合指标 对系统进行综合评估时,各项指标所占比例通常都不相同.文中构建了能源、环境、经济 3 项指标的综合指标(Y_c),也是所要研究的目标函数,即

$$Y_c = \omega_1 Y_{PEC} + \omega_2 Y_{CDE} + \omega_3 Y_{COST}. \tag{15}$$

式(15)中: $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 分别表示能源指标、环境指标和经济指标的比例系数.它们的取值范围为 $0 \leq \omega_1, \omega_2, \omega_3 \leq 1$ 且 $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$.

3.2 目标函数优化

对 CCHP-Wind 系统的优化要满足以下两个方面:1) 调度因子的优化;2) 系统输入向量的优化.优化的目的是为了满足不同系统负荷需求的同时也满足目标函数达到最小值.文中研究的调度因子为 $\alpha_t, \alpha_N, \alpha_a$, 3 个因子之间是相互独立的.因此,定义调度因子的向量为 $\alpha = [\alpha_t \quad \alpha_N \quad \alpha_a]^T$.此外,系统输入端向量可定义为 $\beta = [F_m \quad E_{grid} \quad E_w]^T$. α 和 β 都是所要研究的优化向量,因此,可以合并为

$$x = [\alpha^T \quad \beta^T]^T. \tag{16}$$

3.2.1 目标函数 函数 Y_c 可以用包含 x 的一个函数表示,即

$$Y_c(x) = \omega_1 ax + \omega_2 bx + \omega_3 (cx + e). \tag{17}$$

式(17)中: $a = [0 \quad 0 \quad 0 \quad \sigma_f \quad \sigma_e \quad 0]; b = [0 \quad 0 \quad 0 \quad \mu_f \quad \mu_e \quad 0]; c = [0 \quad 0 \quad 0 \quad c_f + \mu_f C_c \quad C_e + \mu_e C_c \quad C_w]; e = \sum_k P_k C_k$. 式(17)是一个结合能源、环境、经济三个方面的目标函数, $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 可以根据不同的需求进行选择.文中设定经济指标作为第一指标,能源指标作为第二指标,环境指标作为第三指标.因此,在下文计算中, $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 值分别为 0.4, 0.1, 0.5.

3.2.2 非线性等式约束 等式约束表示系统各设备之间的供应和需求方面的平衡,包括燃料、电能、热能和制冷量.文中唯一非线性等式约束为

$$HV_i - V_o = 0. \tag{18}$$

文中并没有对输入的能源和系统需求量做出约束,所需要约束的元素都包含在变换矩阵 H 中.变换矩阵 H 中的元素可以用矩阵 x 表示,因此有

$$H = (d_{211}P_{22} + d_{311}P_{33} + d_{313}P_{32} - d_{411}P_{43})xx^TQ_{11} + (d_{312}P_{33} + d_{314}P_{31} + d_{411}P_{41} - d_{412}P_{43})xT_{11} + (d_{211}P_{22} + d_{321}P_{33})xT_{12} + (L_{COP_{ec}} + L_{\eta_b}). \tag{19}$$

式(19)中: P, T 和 Q 分别为满足等式的 01 矩阵; $L_{COP_{ec}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & COP_{ec} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; L_{\eta_b} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \eta_b & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$

$d_{211} = \eta_t; d_{221} = 1; d_{312} = \eta_b COP_{ac}; d_{313} = -\eta_t COP_{ec}; d_{321} = -COP_{ec}; d_{314} = \eta_t COP_{ec}; d_{311} = (\eta_f - \eta_t \eta_f - \eta_b) COP_{ac}; d_{411} = \eta_f - \eta_t \eta_f - \eta_b; d_{412} = \eta_b.$

同时,系统输入端 V_i 也可以用 x 表示,即

$$V_i = S \cdot x. \tag{20}$$

式(20)中: $S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \eta_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$. 因此,非线性等式约束为

$$(d_{211}P_{22} + d_{311}P_{33} + d_{313}P_{32} - d_{411}P_{43})xx^TQ_{11}S \cdot x + (d_{312}P_{33} + d_{314}P_{31} + d_{411}P_{41} - d_{412}P_{43})xT_{11}S \cdot x + (d_{211}P_{22} + d_{321}P_{33})xT_{12} + (L_{COP_{ec}} + L_{\eta_b})S \cdot x - V_o = 0.$$

3.2.3 非线性不等式约束 不等式约束主要集中在参数特性方面,包括各设备运行工作时的额定功率(上界)及设备输出的下界.因为当系统遇到能量分流的情况时,每一部分的能量只能占总能量的一定百分比,而每部分能量的总和必定等于分流前的总能量(不考虑系统在能量传输过程中存在损耗现象),因此,调度因子 α 应当不小于 0 并且不大于 1.同时,系统输入端只有能量流入系统而没有能量流出, F_m, E_{grid}, E_w 应当都不小于 0,可以得出 $0 \leq \alpha \leq 1, \beta \geq 0$. 这就是线性不等式约束,但它们可以看作是非线性不

等式约束的特殊情况,也可以理解为文中优化变量的上限和下限.

各设备的输出上限设定为设备的额定功率,因此,先给出燃气轮机、燃气锅炉、热回收装置、电制冷机、吸收式制冷机和风力发电机的输出上界为

$$\left\{ \begin{aligned} \underline{\mathbf{V}}_{t,o} &= \begin{bmatrix} 0 \\ \overline{E}_{t,o} \\ 0 \\ \overline{Q}_{t,h,o} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ N_t \eta_t \\ 0 \\ N_t (1 - \eta_t) \end{bmatrix}, & \underline{\mathbf{V}}_{b,o} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \overline{Q}_{b,h,o} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ N_b \eta_b \end{bmatrix}, \\ \underline{\mathbf{V}}_{r,o} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \overline{Q}_{r,h,o} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ N_t (1 - \eta_t) \eta_r \end{bmatrix}, & \underline{\mathbf{V}}_{ec,o} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \overline{Q}_{ec,co} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ N_{ec} \text{COP}_{ec} \\ 0 \end{bmatrix}, \\ \underline{\mathbf{V}}_{ac,o} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \overline{Q}_{ec,co} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ N_{ac} \text{COP}_{ac} \\ 0 \end{bmatrix}, & \underline{\mathbf{V}}_{w,o} &= \begin{bmatrix} 0 \\ \overline{E}_{w,o} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ N_w \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \end{aligned} \right.$$

文中设定 $\underline{\mathbf{V}}_{t,o}, \underline{\mathbf{V}}_{b,o}, \underline{\mathbf{V}}_{r,o}, \underline{\mathbf{V}}_{ec,o}, \underline{\mathbf{V}}_{ac,o}$ 分别为燃气轮机、燃气锅炉、热回收装置、电制冷机和吸收式制冷机的输出下界. 通常情况下,设定输出下界为 0.

在确定了输出的上界和下界之后,可以得到不等式约束为

$$\underline{\mathbf{V}}_{k,o} \leq \mathbf{H}_k \mathbf{V}_{k,i} \leq \overline{\mathbf{V}}_{k,o}.$$

并可得出

$$\underline{\mathbf{V}}_k \leq \mathbf{H}_k \mathbf{D}_k \mathbf{P} \mathbf{x} \leq \overline{\mathbf{V}}_k.$$

同理, \mathbf{D}_k 也可以用 \mathbf{x} 表示,即

$$\begin{cases} \mathbf{D}_t = \mathbf{P}_{11} \mathbf{x} \mathbf{T}_{11}, & \mathbf{D}_b = \mathbf{I}_{11} - \mathbf{P}_{11} \mathbf{x} \mathbf{T}_{11}, & \mathbf{D}_r = r_1 \mathbf{P}_{41} \mathbf{x} \mathbf{T}_{11}, \\ \mathbf{D}_{ec} = \mathbf{I}_{22} - \mathbf{P}_{22} \mathbf{x} \mathbf{T}_{12}, & \mathbf{D}_{ac} = r_2 \mathbf{P}_{43} \mathbf{x} \mathbf{x}^T \mathbf{Q}_{11} + r_3 \mathbf{P}_{43} \mathbf{x} \mathbf{T}_{11}. \end{cases}$$

式中: $\mathbf{P}_{11} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{I}_{11} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{I}_{22} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; r_1 = 1 - \eta_t, r_2 = d_{411}, r_3 = d_{412}.$

由此,构成了目标函数式(17)的非线性不等式约束条件.

3.3 矩阵建模的运行方式

在运行矩阵建模的方式时,同时满足系统的电负荷 E_N 、热负荷 Q_h 和冷负荷 Q_c . 只考虑系统的输入端和输出端,系统内部进行矩阵建模,将输出端作为已知量,系统内部满足能量守恒,通过计算得出系统输入端的数值,进而得到该运行方式下的综合指标.

3.4 优化算法

文中所设定的运行方式中,虽然目标函数是一个线性函数,但其中包含一个非线性等式约束和多个非线性不等式约束. 针对此类问题,选择序列二次规划算法,优化仿真将在 Matlab 上进行,计算机配置是单核频率为 2.6 GHz 的四核 Intel 处理器和 8 GB 的内存.

针对传统的 CCHP 系统的两种运行方式,文中选择遗传算法进行优化求解,目标函数与所设定运行算法相同. 文献[10-13]中在解决冷热电联供优化问题上选取了遗传算法,证明遗传算法在解决 CCHP 系统优化问题方面具有可靠性.

4 算例分析

为了验证系统运行方式的可靠性,选取武汉某宾馆作为研究对象,春、夏、秋、冬季各取 1 d(24 h)作

为实验时间,时间间隔为 1 h. 为了方便计算,将热量单位 kJ 均换算成 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 进行计算. 根据本次实验数据,燃气轮机的额定功率选取 30 kW,燃气锅炉、电制冷机和吸收式制冷机的额定功率都选取 120 kW. 系统参数如表 1 所示.

表 1 系统参数
Tab.1 System parameter values

参数	数值	参数	数值	参数	数值
$\mu_e/\text{kg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$	0.968	$C_w/\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$	0.08	σ_e	3.426
$\mu_t/\text{kg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$	0.220	$C_{ec}/\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$	0.05	σ_t	1.156
$C_{ac}/\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$	0.06	$C_t/\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$	0.24	η_c	0.3
$C_i/\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$	0.40	$C_b/\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$	0.04	η_r	0.8
$C_c/\text{元} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.20	COP_{ec}	3.0	η_b	0.8
$C_e/\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$	0.70	COP_{ac}	0.7		

因为风力发电机的最大输出功率受风速和风向的影响,因此,风力发电机在不同时刻的实际功率会发生变化. 文中选取额定功率为 100 kW 的风力发电机,根据天气状况及风力发电机特性,所得 4 个季节某天不同时刻的额定输出功率(P_r),如图 2 所示.

因为季节的不同,系统中电、热、冷负荷的需求也具有较大差异. 本次实验在 4 个季节各选取一天系统的负荷作为实验数据,通过 Matlab 仿真可以得出以热定电、以电定热和矩阵建模等 3 种运行方式在春、夏、秋、冬 4 个季节的综合指标(Y_c)比较,如图 3 所示.

从图 3 可以看出:矩阵建模优化的运行方式下的综合指标均不高于其他两种 CCHP 传统运行方

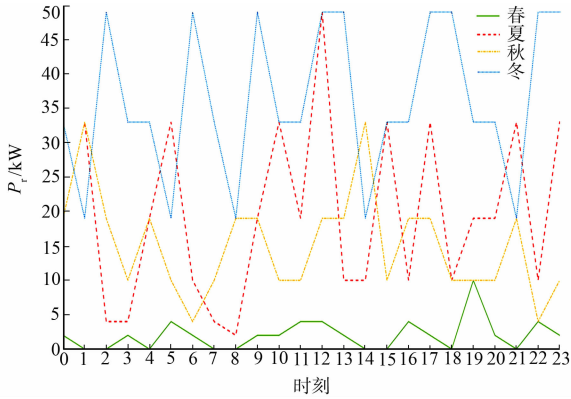


图 2 不同时刻的风力发电机额定输出功率
Fig. 2 Output power of wind power generation in each time period

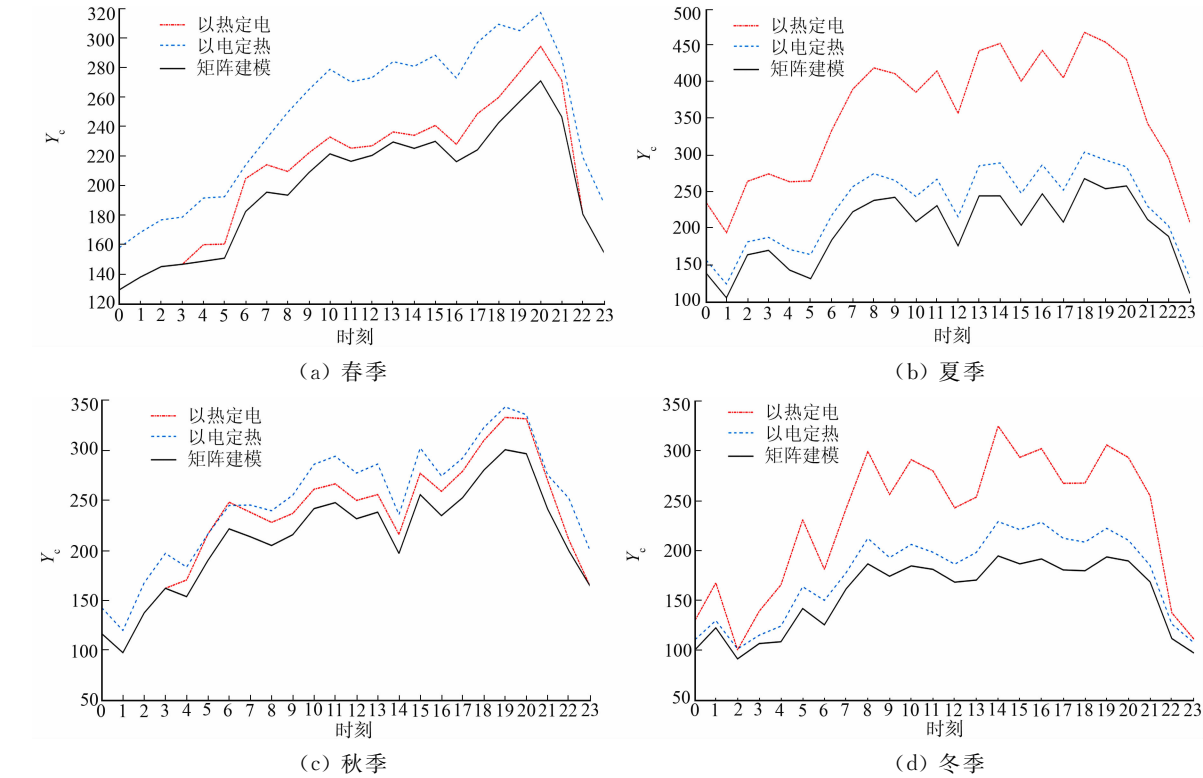


图 3 不同运行方式在四季的综合指标比较
Fig. 3 Comparison of different operating modes in four seasons

式. 在春季和秋季的清晨和深夜, 矩阵建模优化的运行方式下综合指标和以热定电的运行方式时相同; 而在其他时刻时, 矩阵建模优化的运行方式下综合指标更优. 在夏季和冬季, 矩阵建模优化的运行方式下的综合指标在任何时刻都优于其他两种 CCHP 传统运行方式下的综合指标; 在夏季和冬季的清晨和深夜, 矩阵建模优化的运行方式下的综合指标与其他两种 CCHP 传统运行方式下的综合指标相差较小, 而在其他时段相差较大.

两种 CCHP 传统运行方式都会浪费一部分的能量. 当系统处于以电定热的运行方式时, CCHP 系统会先满足系统的电需求, 如果燃气轮机提供的热能不能满足系统热需求, 则燃气锅炉会补足热能; 但如果燃气轮机提供的热能超过了系统的热需求, 而超出的这部分热能将被浪费.

同理, 以热定电的运行方式也存在这种问题. 通过矩阵优化的运行方式可以更好地管理系统能量的输入和分配, 以此消除系统能量的浪费. 由式(17)可看出, CCHP 系统的输出端的等式约束与用户的需求可以精确匹配. 因此, 与两种 CCHP 传统运行方式相比, 矩阵建模的优化运行方式表现的更优.

5 结束语

设计一种含风力发电的冷热电联供系统, 设定以矩阵建模为基础的运行方式. 与传统的运行方式进行对比, 并采用序列二次规划算法对系统运行方式进行优化. 以武汉某宾馆为研究对象, 通过算例分析, 验证了系统模型及系统优化运行方式的有效性和可行性, 从而体现所提出的优化运行方式的优越性.

参考文献:

[1] 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, 32(20): 82-87.

[2] 张文, 车延博, 任晶鼎, 等. 冷热电联供系统的设计、运行及分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(12): 80-84. DOI: 10.3969/j. issn. 1003-8930. 2014. 12. 013.

[3] 黎灿兵, 刘玓, 曹一家, 等. 低碳发电调度与节能发电调度的一致性评估[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 94-101.

[4] 周超, 朱焯秋, 魏杰, 等. 我国风力发电发展现状和问题分析[J]. 能源研究与信息, 2012, 28(2): 69-75.

[5] 唐西胜, 苗福丰, 齐智平, 等. 风力发电的调频技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4304-4313.

[6] 罗承先. 世界风力发电现状与前景预测[J]. 中外能源, 2012, 17(3): 24-31.

[7] 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. DOI: 10.7500/AEPS20140626004.

[8] 王锐, 顾伟, 吴志. 含可再生能源的热电联供型微网经济运行优化[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 22-27.

[9] 周任军, 尹权, 康信文, 等. 风电并入冷热电联供系统的优化运行控制[J]. 电力科学与技术学报, 2014, 29(3): 45-51. DOI: 10.3969/j. issn. 1673-9140. 2014. 03. 008.

[10] 宋晓英, 王艳松. 基于协同进化遗传算法的微网经济环保调度[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 85-89.

[11] 魏大钧, 张承慧, 孙波. 计及变负荷特性的小型冷热电联供系统经济优化运行研究[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3240-3246. DOI: 10.13335/j. 1000-3673. pst. 2015. 11. 034.

[12] 王瑞琪, 李珂, 张承慧. 基于混沌多目标遗传算法的微网系统容量优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(22): 16-22. DOI: 10.3969/j. issn. 1674-3415. 2011. 22. 004.

[13] 阳琼芳, 孙如祥. 粒子群和遗传算法的混合算法[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2015, 36(6): 645-649. DOI: 10.11830/ISSN. 1000-5013. 2015. 06. 0645.

(责任编辑: 钱筠

英文审校: 吴逢铁)