

含热电联供系统的微网经济运行

吴 雄,王秀丽,别朝红,王建党

(西安交通大学 电气工程学院,陕西 西安 710049)

摘要: 为了分析热电联供系统和储能技术的经济节能作用,在分时电价以及微网并网运行的环境下,建立包含光伏、风电、热电联供系统、燃料电池以及储能系统的微网经济优化模型。采用方程线性化的方法将优化问题转化为混合整数线性规划(MILP)问题。算例分析验证了模型与算法的准确性,并比较了微网采用与不采用热电联供系统以及采用储能单元的经济效益,结果表明热电联供系统具有显著的经济效益,电储能带来的经济效益比热储能高。

关键词: 热电联供; 微网; 蓄电池; 热储能设备; 经济运行; 模型; 储能

图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.08.001

0 引言

微网是一种由负荷和微型电源共同组成的系统,相对于外部大电网其表现为单一的可控单元,能同时满足用户对电能质量和供电可靠性、安全性的要求^[1]。作为一种新型能源网络化供应与管理技术,微网具有灵活的运行方式和可调度性能,可以实现需求侧管理,自我控制、保护以及能源最大化利用等功能。近年来,以微型燃气轮机 MT(Micro Turbine)为核心设备的热电联供 CHP(Combined Heat and Power)系统在微网中得到了广泛的应用,有效地解决了微网系统电能和热能的供应问题,同时实现了能源的梯级利用,具有良好的社会和经济效益,得到了国内外的广泛研究^[2-6]。

目前国内外对热电联供的微网的经济运行已有相关的研究。文献[3]建立了冷热电三联供系统的节能优化调度模型,重点研究了联供系统的生产成本、环境成本、协调成本对调度策略的影响。文献[4]提出冷电联供分布式供能系统的能量管理优化模型,主要考虑了电网购电价格、燃气价格等因素对微网经济运行的影响。文献[3-4]均侧重于联供系统的经济性分析,欠缺调度细节的研究。文献[5]考虑了可再生能源的随机波动性,建立了热电联供型微网经济调度的随机规划模型,文献[6]在文献[5]的基础上进一步提出了考虑污染气体排放的多目标优化模型,实现了微源的动态调度,有效地减少运行费用及污染气体排放。文献[7]建立了含热电联供系统的微网经济优化模型,但缺乏对蓄电池动态运行特性的研究,且热平衡模型描述较简单。

文献[8]建立了微网独立运行的混合整数规划模型,分析了电动汽车换电站储能设备对微网运行的影响,其储能模型具有借鉴意义。

上述研究大都是以热电联供型微网的调度模型为基础,但各微源模型的约束仍不能满足实际的要求。本文在上述文献的基础上,研究了热电联供系统和储能技术在微网中的应用,在分时电价以及微网并网运行的环境下,建立了含热电联供系统的微网经济优化模型。对热电联供系统、燃料电池 FC(Fuel Cell)、蓄电池、热储能设备等电热微源分别建模,考虑了机组启停、爬坡约束、储能约束等以往文献中较少考虑到的实际约束条件。采用方程线性化的方法将优化问题转化为混合整数线性规划问题求解,通过算例仿真比较了微网在热电联供系统和单独供电系统 2 种模式下各自的经济效益。仿真结果表明,热电联供系统具有十分显著的经济效益。

1 微网分布式电源模型

1.1 热电联供经济模型

热电联供系统主要由微型燃气轮机、溴冷机组组成,其利用天然气燃烧做功驱动微型燃气轮机发电,燃烧后的高温烟气送入溴冷机进行制热,不足的热量由天然气补燃。其能量流动过程如图 1 所示。

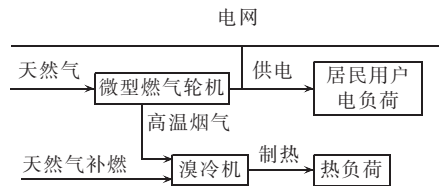


图 1 微型燃气轮机的热电联供系统
Fig.1 Combined heat and power system with micro turbine

热电联供系统的数学模型^[9]如下所示:

$$H_e = \frac{P_e(1-\eta_e-\eta_i)}{\eta_e} \quad (1)$$

$$H_{ho} = H_e \eta_{rec} \delta_{ho} \quad (2)$$

$$\eta_{rec} = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_0} \quad (3)$$

其中, H_e 为微型燃气轮机烟气余热; P_e 为单台微型燃气轮机的功率; η_e 为微型燃气轮机发电效率; η_l 为微型燃气轮机散热损失系数; H_{ho} 为微型燃气轮机烟气余热提供的制热量; η_{rec} 为烟气余热回收效率; δ_{ho} 为溴冷机的制热系数; T_1 、 T_2 分别为余热烟气进、出溴冷机的温度; T_0 为环境温度。

对于热电联供系统, 其热电输出比 θ 一般为常数, 其表达式如下:

$$\frac{H_{ho}}{P_e} = \frac{(1 - \eta_e - \eta_l)(T_1 - T_2)}{\eta_e(T_1 - T_0)} \delta_{ho} = \theta \quad (4)$$

1.2 微型燃气轮机及燃料电池经济模型

微型燃气轮机为小型的燃气轮机, 其利用天然气发电, 可以产生数 kW 至数 MW 的功率。微型燃气轮机的发电费用主要包括燃料和维护费用, 它的总费用与输出功率之间的关系如下^[10]:

$$C_{mt} = a_{mt}P + b_{mt} \quad (5)$$

其中, C_{mt} 为微型燃气轮机发电总费用; P 为输出功率; a_{mt} 、 b_{mt} 为费用系数。

燃料电池^[11]是一种将化学能高效、无污染地转化为电能的发电装置。燃料电池的运行特征与微型燃气轮机相似, 都具有较小的体积和较高的操作灵活性, 启停迅速且机组出力可控。它的总运行费用与式(5)类似, 但具有不同的系数。

1.3 热储能设备和蓄电池模型

由于热电负荷之间的不匹配, 热储能设备能将联供系统多生产的热能存储起来供热负荷高峰期用。其数学模型^[12]如下:

$$L(t) = L(t-1)\eta_L + \Delta TH_{in}(t)\eta_{in} - \Delta TH_{out}(t)/\eta_{out} \quad (6)$$

其中, $L(t)$ 为热储能设备 t 时段的储能容量; $H_{in}(t)$ 和 $H_{out}(t)$ 分别为 t 时段输入和输出热能; η_L 、 η_{in} 和 η_{out} 分别为热储能设备的存储、输入和输出转化效率; ΔT 为单位时段长。

蓄电池模型与热储能装置类似, 其 t 时段的容量与 $t-1$ 时段的放电容量有关, 其数学模型^[13]如下。

当系统发电量大于负荷时, 蓄电池充电, 有:

$$E(t) = E(t-1)(1 - \delta) + \Delta TP_{ch}(t)\eta_{ch} \quad (7)$$

当系统发电量小于负荷时, 蓄电池放电, 有:

$$E(t) = E(t-1)(1 - \delta) - \Delta TP_{dis}(t)\eta_{dis} \quad (8)$$

其中, $E(t)$ 为蓄电池 t 时段的总能量; δ 为蓄电池的自放电率, 数值很小; $P_{ch}(t)$ 和 $P_{dis}(t)$ 分别为蓄电池 t 时段的充电和放电功率; η_{ch} 和 η_{dis} 分别为蓄电池的充、放电效率。

2 微网总效益优化模型

微网的经济优化运行要求微网的运行费用最

少。目前, 微网的电能质量还达不到向电网输电功率的要求, 因此微网与电网并网只考虑电网向微网单向供电。此外, 微网中光伏、风电利用自然资源发电, 属于绿色能源, 可认为其没有发电成本。因此微网运行过程中的费用主要有微型燃气轮机的发电费用、机组启动费用、从电网的购电费用以及供热燃料费用。本文研究的优化周期为一天 24 h, 单位时间间隔为 1 h。其目标函数为:

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [C(P_i^{CG}(t)) + C_{si}^{CG}(t)] + \sum_{t=1}^T P_{buy}(t)C_{grid}(t) + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_b} C_{gas} H_i^{Bo}(t) / \eta_{Bo} \quad (9)$$

$$C_{si}^{CG}(t) = \max \{0, U_i(t) - U_i(t-1)\} C_{s,i}^{CG} \quad (10)$$

其中, T 为运行周期; CG 代表可控机组; N 为可控机组的数量; $P_i^{CG}(t)$ 为可控机组 i 在 t 时段的出力; $C(P_i^{CG}(t))$ 为可控机组 i 在 t 时段的发电费用; $C_{si}^{CG}(t)$ 为可控机组 i 在 t 时段的启动费用; $U_i(t)$ 为可控机组 i 在 t 时段的开停机状态, 其值为 0 表示停机状态, 为 1 表示开机状态; $C_{s,i}^{CG}$ 为可控机组 i 每次启动的费用; $P_{buy}(t)$ 为微网在 t 时段的购电; $C_{grid}(t)$ 为 t 时段的购电价格; N_b 为锅炉数量; $H_i^{Bo}(t)$ 为锅炉 i 在 t 时段的产热量; C_{gas} 为天然气价格; η_{Bo} 为锅炉效率。

目标函数满足系统电热能约束、分布式发电机组约束、储能设备约束等。

2.1 电能约束

a. 系统电能平衡约束:

$$\sum_{i=1}^N P_i^{CG}(t) + \sum_{i=1}^M P_i^{RG}(t) + P_{buy}(t) + P_{bat}(t) = \tilde{P}_L(t) \quad (11)$$

b. 联络线约束:

$$0 \leq P_{buy}(t) \leq P_{line, max} \quad (12)$$

其中, RG 代表可再生能源机组; M 为可再生能源机组的台数; $P_i^{RG}(t)$ 为可再生能源机组 i 在 t 时段的出力; $P_{bat}(t)$ 为蓄电池在 t 时段的出力, 视其充放电状态而定; $\tilde{P}_L(t)$ 为 t 时段的负荷值; $P_{line, max}$ 为微网与电网联络线上允许的最大传输功率。

c. 分布式机组约束^[14]。

发电约束:

$$P_{i, min}^{CG} U_i(t) \leq P_i^{CG}(t) \leq P_{i, max}^{CG} U_i(t) \quad (13)$$

爬坡约束:

$$-R_i^{down} \leq P_i^{CG}(t) - P_i^{CG}(t-1) \leq R_i^{up} \quad (14)$$

启停时间约束:

$$\begin{cases} X_i^{CG}(t) \geq T_{Ui} & X_i^{CG}(t) \geq 0 \\ -X_i^{CG}(t) \geq T_{Di} & X_i^{CG}(t) < 0 \end{cases} \quad (15)$$

其中, $P_{i, min}^{CG}$ 、 $P_{i, max}^{CG}$ 分别为可控机组 i 的最小和最大发电值; R_i^{down} 、 R_i^{up} 分别为可控机组 i 的下爬坡和上爬坡速度; $X_i^{CG}(t)$ 为可控机组 i 在 t 时段开机或停机状态持续时间, 其值为正时, 为开机持续时间, 为负时, 为停机持续时间; T_{Ui} 和 T_{Di} 分别为可控机组 i 的最

小开、停机时间。

d. 蓄电池约束。

容量约束:

$$E_{\min} \leq E(t) \leq E_{\max} \quad (16)$$

出力约束:

$$0 \leq P_{\text{dis}}(t) \leq P_{\text{d,max}} \quad (17)$$

$$0 \leq P_{\text{ch}}(t) \leq P_{\text{c,max}} \quad (18)$$

$$P_{\text{bat}}(t) = \begin{cases} P_{\text{dis}}(t) & P_{\text{bat}}(t) \geq 0 \\ -P_{\text{ch}}(t) & P_{\text{bat}}(t) < 0 \end{cases} \quad (19)$$

一个周期始末电储能平衡约束:

$$E(0) = E(T) \quad (20)$$

其中, $E_{\min}$ 和 $E_{\max}$ 分别为蓄电池的最小储能容量和最大储能容量; $P_{\text{d,max}}$ 和 $P_{\text{c,max}}$ 分别为蓄电池放电和充电最大限值。

2.2 热能约束

a. 系统热能量平衡约束:

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{CH}}} H_i^{\text{CH}}(t) + \sum_{i=1}^{N_{\text{b}}} H_i^{\text{Bo}}(t) + H_{\text{out}}(t) - H_{\text{in}}(t) = H_{\text{D}}(t) \quad (21)$$

其中, N_{CH} 为热电联产机组的数量; $H_i^{\text{CH}}(t)$ 为热电联产机组 i 在 t 时段的产热量; $H_{\text{D}}(t)$ 为 t 时段的热负荷。

b. 锅炉约束。

产热能力约束:

$$0 \leq H_i^{\text{Bo}}(t) \leq H_{i,\max}^{\text{Bo}} \quad (22)$$

热能爬坡约束:

$$|H_i^{\text{Bo}}(t) - H_i^{\text{Bo}}(t-1)| \leq R_i^{\text{Bo}} \quad (23)$$

其中, $H_{i,\max}^{\text{Bo}}$ 为锅炉 i 的最大产热量; R_i^{Bo} 为锅炉 i 的热爬坡速度。

c. 热储能设备约束。

储热容量约束:

$$0 \leq L(t) \leq L_{\max} \quad (24)$$

输入、输出热能约束:

$$0 \leq H_{\text{in}}(t) \leq H_{\text{in,max}} \quad (25)$$

$$0 \leq H_{\text{out}}(t) \leq H_{\text{out,max}} \quad (26)$$

一个周期始末热储能平衡约束:

$$L(0) = L(T) \quad (27)$$

其中, $L_{\max}$ 、 $H_{\text{in,max}}$ 和 $H_{\text{out,max}}$ 分别为热储能设备的最大容量、最大热能输入值、最大热能输出值。

3 优化模型的求解

该优化问题包含离散变量和连续变量,属于一个混合整数规划问题,通过适当的线性化处理,可以将该优化问题转化为一个混合整数线性规划 MILP (Mixed Integer Linear Programming) 问题,并通过相应的软件求解。

目标函数中发电费用的线性化:

$$\begin{aligned} C(P_i^{\text{CG}}(t)) &= (a_i P_i^{\text{CG}}(t) + b_i) U_i(t) = \\ & a_i P_i^{\text{CG}}(t) U_i(t) + b_i U_i(t) = \\ & a_i P_i^{\text{CG}}(t) + b_i U_i(t) \end{aligned} \quad (28)$$

其中, a_i 、 b_i 为分布式电源 i 的发电费用系数。

对于启动费用表达式 (10) 可以进行如下线性化处理:

$$C_{\text{st}}^{\text{CG}} \geq 0 \quad (29)$$

$$C_{\text{st}}^{\text{CG}} \geq (U_i(t) - U_i(t-1)) C_{\text{st},i}^{\text{CG}} \quad (30)$$

约束条件当中需要对蓄电池的约束条件进行线性化处理,为此引入状态变量 $B_{\text{ch}}(t)$ 、 $B_{\text{dis}}(t)$, 分别表示充电和放电的状态,为 0 时表示非,为 1 时表示是。

$$E(t) = E(t-1) + \Delta T P_{\text{ch}}(t) \eta_{\text{ch}} - \Delta T P_{\text{dis}}(t) / \eta_{\text{dis}} \quad (31)$$

$$0 \leq P_{\text{ch}}(t) \leq P_{\text{c,max}} B_{\text{ch}}(t) \quad (32)$$

$$0 \leq P_{\text{dis}}(t) \leq P_{\text{d,max}} B_{\text{dis}}(t) \quad (33)$$

$$B_{\text{ch}}(t) + B_{\text{dis}}(t) \leq 1 \quad (34)$$

$$P_{\text{bat}} = P_{\text{dis}}(t) - P_{\text{ch}}(t) \quad (35)$$

对于机组的启停约束参照文献 [15] 中的方法。

最小开机时间表述为:

$$\begin{aligned} \sum_{t=1}^{G_i} (1 - U_i(t)) &= 0 \\ G_i &= \min \{T, (T_{\text{Ui}} - T_{\text{U0}}) U_i(0)\} \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \sum_{k=t}^{t+T_{\text{Ui}}-1} U_i(k) &\geq T_{\text{Ui}} (U_i(t) - U_i(t-1)) \\ t &= G_i + 1, \dots, T - T_{\text{Ui}} + 1 \end{aligned} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} \sum_{k=t}^T [U_i(k) - (U_i(t) - U_i(t-1))] &\geq 0 \\ t &= T - T_{\text{Ui}} + 2, \dots, T \end{aligned} \quad (38)$$

其中, T_{U0} 为机组 i 的初始开机时间; G_i 为开始时刻机组 i 要求的开机时间。

关机时间约束处理方法类似,这里不再赘述。

4 算例分析

本文选取中国北方某地区微网设计案例,其电热传输网络结构如图 2 所示,包含光伏 (PV)、风电 (WT)、微型燃气轮机热电联供系统、燃料电池、蓄电池、锅炉及热储存设备。

算例的数据 [16] 包括冬季典型日电负荷和热负荷的预测曲线,风机与光伏预测出力如图 3 所示。

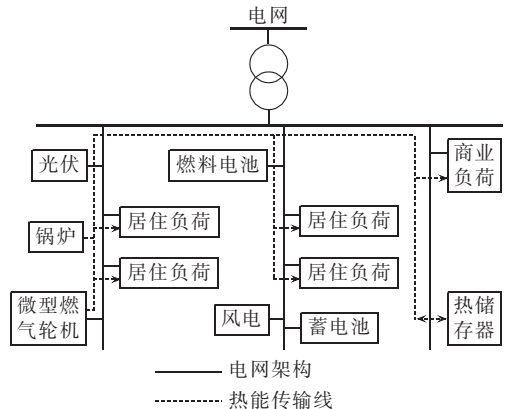


图 2 微网系统结构图

Fig.2 System configuration of microgrid

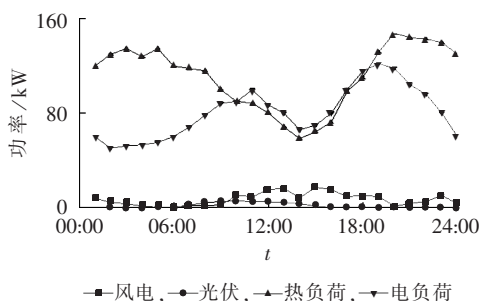


图 3 冬季典型日光伏、风电以及电、热负荷预测出力
Fig.3 Forecasted photovoltaic & wind power outputs and electric & heat loads for a typical winter day

微网系统的相关参数如表 1 所示,其中, $P_{\min}$ 、 $P_{\max}$ 分别为功率下限、上限。令微型燃气轮机和燃料电池的初始状态均为停运状态,微型燃气轮机和燃料电池的一次启动费用^[17]分别为 1.94 元和 2.72 元。

表 1 微网系统运行参数
Tab.1 Operational parameters of microgrid

类型	$P_{\min}/\text{kW}$	$P_{\max}/\text{kW}$	$R^{\text{down}}/(\text{kW}\cdot\text{min}^{-1})$	$R^{\text{up}}/(\text{kW}\cdot\text{min}^{-1})$	T_{U}/h	T_{D}/h
MT	5	65	5	10	6	2
FC	5	40	2	2	6	2
WT	0	20	—	—	—	—
PV	0	10	—	—	—	—
电网	0	70	—	—	—	—

为了方便说明,本文中的热量单位 kJ 均换算成 kW 来计量。锅炉的额定功率为 100 kW,其产热效率为 0.8,天然气价格为 0.25 元/(kW·h);热储存器的额定容量为 100 kW·h,额定热量输入、输出值均为 50 kW,其存储、输入和输出转化效率分别为 0.98、1、0.9,假设热储存器的初始热储量均为 0;对于热电联供系统,取 $\eta_1=0.03$, $\eta_{\text{rec}}=0.55$, $\delta_{\text{ho}}=1.2$, $\eta_e=0.26$;蓄电池的容量为 100 kW·h,额定充电放电功率为 20 kW,蓄电池的最小容量 $E_{\min}$ 取为最大容量 $E_{\max}$ 的 20%,初始容量 $E(0)=E_{\min}$, η_{ch} 和 η_{dis} 均取 0.9, δ 忽略不计。

本文实行分时电价政策,峰时段为 10:00—15:00 和 18:00—21:00,平时段为 07:00—10:00、15:00—18:00 以及 21:00—23:00,谷时段为 00:00—07:00、23:00—24:00,平均电价为 0.5 元/(kW·h)。算例中峰、平、谷时段电价分别为 0.83、0.49、0.17 元/(kW·h)。

4.1 含热电联供系统的微网经济运行结果

经过上述的线性化处理,本文采用 CPLEX 求解。通过计算可得微网中各可调节单元的调度出力,其电能调度出力以及热能调度出力分别如图 4 和图 5 所示。

从图 4 和图 5 中可以看出,微型燃气轮机在整个周期内除了谷时段 23:00—24:00 外,其一直处于发电状态。在初始 7 个小时内,微型燃气轮机出力较

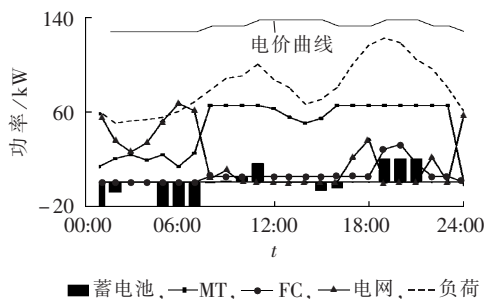


图 4 可控电源的调度出力
Fig.4 Dispatched output of controllable sources

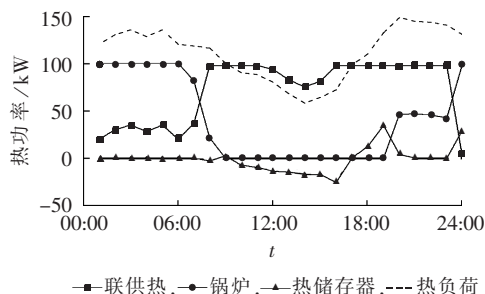


图 5 热电源的调度出力
Fig.5 Dispatched output of thermal sources

少,该时段电网电价处于谷时段,电负荷主要由便宜的电网电能来满足,微型燃气轮机在满足部分热负荷的发电需求外,不再多发电。07:00—23:00 时段,电价不再低廉,微型燃气轮机大部分时间以满足的状态满足电热的需求。燃料电池在初始 7 个小时停机,此时电负荷主要由便宜的电网电能来满足,接下来的 12 个小时,燃料电池开机满足部分电负荷需求,并在电价峰时段 18:00—21:00 有较大的出力。整个运行周期中蓄电池在电价峰时段放电,在谷时段充电,充分利用峰谷电价差减少系统运行的费用。在其他时段则不出力,减少充放电的损耗。

对于热平衡,从图 5 可以看出,热电联供系统供热占了主导地位,锅炉仅在初始 00:00—09:00 及 19:00—24:00 的热负荷峰值满发或部分出力,其余时间全由热电联供系统供热。热存储器则在热负荷低谷时期吸收联供系统多生产的热量,在热负荷高峰期释放热量,满足系统的需求。

经过以上分析可知,发电及产热单元根据系统需求,尽可能地降低微网运行费用,体现了微网经济运行的基本原则,也进一步验证了本文模型与算法的正确性。

4.2 热电联产系统的经济效益分析

当微网中不含热电联供系统时,微型燃气轮机只参与电负荷的生产,系统中的热负荷全由锅炉来满足。此时系统优化运行的结果如图 6 所示。

从图 6 可以看出,当微型燃气轮机不带热电联供系统时,微网中的负荷主要由电网中购电来满足,燃料电池参与部分负荷的发电。而微型燃气轮

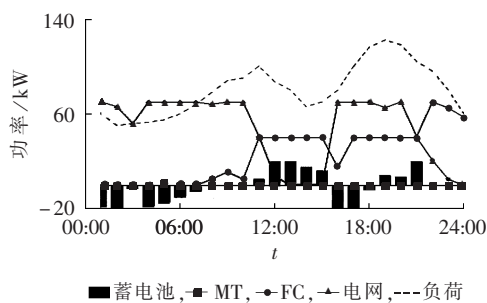


图 6 无热负荷时可控电源的调度出力
Fig.6 Dispatched output of controllable sources without heat load

机组在整个运行周期中都处于停运状态,这说明在微网并网时微型燃气轮机单独用来发电是不经济的。

含有热电联供系统的微网运行总费用为 1 410.55 元,当热电分离时微网总费用为 1 616.27 元,热电联供系统的节能效益达到了 12.7%,这种经济效益是十分显著的。因此,热电联供系统不仅推广了微型燃气轮机在微网上的应用,还提高了能源的利用率,具有很好的经济效益。

4.3 储能单元对微网经济效益的影响

储能单元能量可以双向流动,从而兼顾容量与功率的需求,在电力系统中起到平抑负荷波动、削峰填谷的作用,使系统得以优化运行。表 2 所示为微网在有无储能设备下几种运行状态下的效益。

表 2 3 种运行状态下的微网效益
Tab.2 Benefits of microgrid for three operating conditions

运行状态	运行费用/元
含蓄电池、热储能设备	1 410.55
不含蓄电池	1 454.48
不含热储能设备	1 426.77

从表 2 中可以看出,当系统不含蓄电池储能单元时,微网总运行费用升高 3.11%,这主要是因为蓄电池能利用峰谷电价差获得收益。当系统不含热储能设备时,系统的费用升高了 1.15%。对于同是 100 kW·h 的储能容量,蓄电池经济效益是热储能设备的 3 倍左右。因此从系统运行的角度看,蓄电池储能设备比热储能设备的经济效益更为显著,但是蓄电池投资成本较高,在实际当中依然需要从多方面综合衡量蓄电池与热储能设备的作用。

5 结语

本文研究了包含热电联供系统的微网的经济优化运行。在已知可再生能源以及电热负荷预测出力的基础上,建立了包含光伏、风机、微型燃气轮机、燃料电池等分布式电源以及电热储能单元的热电联供型微网的优化运行模型,通过将该优化问题

转化为 MILP 问题,应用线性规划软件 CPLEX 求解。算例仿真验证了方法和模型的有效性。根据仿真结果分析得出如下结论:

- a. 微型燃气轮机单独发电成本较高,并不经济;
- b. 微型燃气轮机的热电联供系统的节能效益在本文算例中达到了 12.7%,具有十分显著的经济效益;
- c. 从系统运行的角度分析,蓄电池储能设备比热储能设备的经济效益更为显著。

本文对含热电联供系统的微网优化运营作了研究。由于未考虑可再生能源出力的随机性,当其出力预测与实际出力差距较大时,应实时按实际数据更新其调度策略。另一种思路是考虑预测误差随时间尺度减小而变小的特点对微网进行超短期的调度,这是需要进一步研究的内容。

参考文献:

[1] 盛昆,孔力,齐智平. 新型电网——微电网(Microgrid)研究综述[J]. 继电器,2007,35(12):75-80.
SHENG Kun,KONG Li,QI Zhiping. A survey on research of microgrid—a new power system[J]. Relay,2007,35(12):75-80.

[2] HOUWING M,NEGENBORN R R,de SCHUTTER B. Demand response with micro-CHP systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2011,99(1):200-213.

[3] 周任军,冉晓洪,毛发龙,等. 分布式冷热电三联供系统节能协调优化调度[J]. 电网技术,2012,36(6):8-14.
ZHOU Renjun,RAN Xiaohong,MAO Falong,et al. Energy-saving coordinated optimal dispatch combined cool,heat and power supply[J]. Power System Technology,2012,36(6):8-14.

[4] 郭力,许东,王成山,等. 冷电联供分布式供能系统能量优化管理[J]. 电力系统自动化,2009,33(19):96-100.
GUO Li,XU Dong,WANG Chengshan,et al. Energy optimization and management of combined cooling and power distributed energy supply system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009,33(19):96-100.

[5] 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.
WANG Rui,GU Wei,WU Zhi. Economic and optimal operation of a combined heat and power microgrid with renewable energy resources[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(8): 22-27.

[6] 顾伟,吴志,王锐. 考虑污染气体排放的热电联供型微电网多目标运行优化[J]. 电力系统自动化,2012,36(14):177-185.
GU Wei,WU Zhi,WANG Rui. Multi-objective optimization of combined heat and power microgrid considering pollutant emission[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(14): 177-185.

[7] 牛铭,黄伟,郭佳欢,等. 微网并网时的经济运行研究[J]. 电网技术,2010,34(11):38-42.
NIU Ming,HUANG Wei,GUO Jiahuan,et al. Research on economic operation of grid connected microgrid[J]. Power System Technology,2010,34(11):38-42.

[8] 曹一家,苗铁群,江全元. 含电动汽车换电站的微网孤岛运行

- 优化[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):1-6.
- CAO Yijia, MIAO Yiqun, JIANG Quanyuan. Optimal operation of islanded microgrid with battery swap stations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 1-6.
- [9] 魏兵, 王志伟, 李莉, 等. 微型燃气轮机冷热电联产系统经济性分析[J]. 热力发电, 2007, 36(9): 1-5.
- WEI Bing, WANG Zhiwei, LI Li, et al. Analysis of economic efficiency for cold, heat, and electricity triple co-generation system with miniature gas turbine[J]. Thermal Power Generation, 2007, 36(9): 1-5.
- [10] PEPENMANS G, DRIESEN J, HAESELDONCKX D, et al. Distributed generation: definition, benefits and issues[J]. Energy Policy, 2005, 6(3): 787-798.
- [11] 衣宝廉. 燃料电池的原理、技术状态与展望[J]. 电池工业, 2003, 8(1): 16-22.
- YI Baolian. Fuel cell: fundamental, technology and prospect[J]. Chinese Battery Industry, 2003, 8(1): 16-22.
- [12] 徐立中, 杨光亚, 许昭, 等. 考虑风电随机性的微电网热电联合调度[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(9): 53-60.
- XU Lizhong, YANG Guangya, XU Zhao, et al. Combined scheduling of electricity and heat in a microgrid with volatile wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(9): 53-60.
- [13] MOHAMED F A, KOIVO H N. Online management of microgrids with battery storage using multiobjective optimization [C]//Proceedings of 2007 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. Setubal, Portugal: IEEE, 2007: 231-236.
- [14] PIERCE F E. Summary of results from testing a 30 kW microturbine and Combined Heat and Power(CHP) system[R]. [S.L.]: Federal Energy Management Program-U.S. Department of Energy, 2007.
- [15] CARRIÓN M, ARROYO J M. A computationally efficient mixed-integer linear formulation for the thermal unit commitment problem [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(3): 1371-1378.
- [16] 李乐. 微网的经济运行研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- LI Le. Research on economic operation of microgrid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [17] TSICALAKIS A G, HATZIARGYRION N D. Centralized control for optimizing microgrids operation [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(1): 241-248.
- [18] 苗轶群, 江全元, 曹一家. 考虑电动汽车及换电站的微网随机调度研究[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(9): 18-24, 39.
- MIAO Yiqun, JIANG Quanyuan, CAO Yijia. Microgrid stochastic dispatch considering electric vehicles and battery swap stations [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(9): 18-24, 39.
- [19] 唐西胜, 邓卫, 李宁宁, 等. 基于储能的可再生能源微网运行控制技术[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(3): 99-103, 108.
- TANG Xisheng, DENG Wei, LI Ningning, et al. Control technologies of micro-grid operation based on energy storage [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(3): 99-103, 108.
- [20] 汪少勇. 基于分布式电源的微网的设计与运行[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(4): 120-123.
- WANG Shaoyong. Design and operation of micro-grid based on distributed generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(4): 120-123.
- [21] 张双乐, 李鹏, 陈超, 等. 基于改进变尺度混沌优化算法的微网优化运行[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 70-74.
- ZHANG Shuangli, LI Peng, CHEN Chao, et al. Economic operation of microgrid based on improved mutative scale chaotic optimization [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 70-74.

作者简介:

吴 雄(1986-), 男, 湖南娄底人, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统运行和规划(E-mail: wuxiong432@126.com);

王秀丽(1961-), 女, 山西河曲人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要研究方向为电力系统规划和电力市场(E-mail: xiuliw@mail.xjtu.edu.cn);

别朝红(1970-), 女, 山东潍坊人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为电力系统可靠性评估。

Economic operation of microgrid with combined heat and power system

WU Xiong, WANG Xiuli, BIE Zhaohong, WANG Jianxue

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: For analyzing the economic and energy-saving effect of CHP(Combined Heat and Power) and energy storage, an economic optimal model including photovoltaic, wind power, CHP system, fuel cell and energy storage system is built for grid-connected microgrid with time-dependent electricity price. Equation linearization is used to convert the optimization problem into the MILP(Mixed-Integer Linear Programming) problem. Case analysis verifies the correctness of the proposed model and algorithm. The economic benefits are compared between the microgrids with and without the CHP system and energy storage unit, which shows that, CHP system has significant economic effect and the economic benefit brought by electric energy storage is higher than that by heat energy storage.

Key words: combined heat and power; microgrid; electric batteries; thermal storage; economic operation; models; energy storage