

基于改进鸡群算法的微电网优化运行研究

胡汉梅, 李静雅, 黄景光

(三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要:文中主要考虑包含传统火电机组在内的冷热电三联供型微电网的经济运行。在充分利用新能源的前提下,验证“以热/冷定电”优化策略的正确性。首先建立包含传统火电机组在内的冷热电三联供型微电网的数学模型,综合考虑各出力源的运行维护成本、燃料费用、环境治理费用和购/售电费用后,采用改进鸡群算法进行算例仿真分析,算例结果表明,所述算法可行且“以热/冷定电”优化策略正确。

关键词:微网;经济运行;优化;改进鸡群算法

Optimization Operation of Micro-grid Based on Improved CSO

HU Hanmei, LI Jingya, HUANG Jingguang

(College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China)

Abstract: This article mainly considers the economic operation of the micro-grid combining cold, hot and electricity, which includes traditional thermal power unit. On the premise of making the best use of new energy sources, the optimization strategy of ‘regulating electricity by hot or cold’ will be verified. Firstly, the mathematical model of the micro-grid combining cold, hot and electricity, including the traditional thermal power will be built. After considering the operation maintenance cost of every output source, fuel cost, environment governance cost and the purchase/sale cost of electricity, the improved chicken algorithm will be used to make example simulation analysis, the result of which suggests that the algorithm is feasible and the optimization strategy of ‘stimulating electricity with hot and cold’ is correct.

Key words: micro-grid; economic operation; optimization; improved CSO

0 引言

国内外已经有不少针对微网经济性的研究,其中加强冷热电三联供系统的研究,使其能够经济、安全、可靠并且低污染的运行,对充分的利用新能源,实现能源的梯级利用,增加用户的利益等具有良好的经济和社会效益^[1-4]。文[5]改进了万有引力搜索算法,并利用其解决了目标多约束的微网优化运行问题,但缺乏对风电随机性的模拟;文[6]改进了非劣排序遗传算法,并利用其对基于多状态建模的独立型微网多目标优化配置模型进行了求解,但未考虑并网运行时的情况;文[7]采用小生境的遗传算法对多目标模型进行求解,得到微电网中的最优运

行情况,但未对算法一陷入收敛的缺点来进行算法改进;文[8]采用粒子群算法和细菌觅食算法相结合的算法求解一种综合效益最大的多目标微电网运行优化调度的模型,但缺少对电网安全性约束进行考虑;文[9]采用遗传算法对并网和孤网两种模式下的微电网的运行优化调度模型进行仿真求解,比较分析两种运行方式下微电网的运行成本。缺少对传统发电方式的考虑;文[10]提出基于实数编码的改进自适应遗传算法,并对孤网运行和并网运行的微电网系统进行数值求解,优化各个微电源运行中的功率输出,只考虑了新能源发电;文[11]制定了优化微电网运行的不同策略,建立微电网优化运行模型,采用基于自适应的遗传算法对模型进行求解,验证优化策略的准确性,对新能源发电方式未进行

收稿日期:2016-07-21; 修回日期:2016-09-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51477090)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51477090).

全面的分析;文[12]研究了微电网动态调度问题,通过改进常规细菌觅食算法,对微电网优化运行调度模型进行求解,但缺少对火力发电的考虑。

文中主要考虑了新能源利用效率和冷热电三联产效益等多因素,提出了微网的经济运行控制策略,建立包含传统火电机组在内的冷热电三联供型微电网,采用改进鸡群算法,对该模型进行并网和孤网两种运行方式下的经济运行分析计算,通过优化结果验证文中提出的经济运行控制策略及优化算法的有效性和可行性。

1 微网运行数学模型及控制策略

1.1 微网经济运行控制策略

并网运行方式下,文中研究的含冷热电三联供系统的微网并网运行经济运行控制策略如下:

1)“风光优先”;

2)遵循“以冷/热定电”的原则,由冷/热负荷确定微型燃气轮机的出力;

3)当风力发电机和光伏电池尽量发电,微型燃气轮机满足了冷/热负荷需求,而无法满足电负荷需求时,比较微燃机和火电机组发电成本和购电电价进行比较,当发电成本大于购电电价时考虑购电,反之,则该出力源继续出力;

4)当风力发电机和光伏电池尽量发电,微型燃气轮机满足了冷/热负荷需求,且电负荷需求也满足时,电量还有剩余,比较微电源的发电成本和售电电价,发电成本小于售电电价时,考虑售电获取收益降低成本。

孤网运行时无需考虑与主网之间的电能交易问题,微网内负荷需求完全由微电源来满足。

1.2 微网经济运行数学模型

1.2.1 目标函数

$$F(P)=\sum_{i=1}^T\left\{\sum_{i=1}^N C_i[P(t)]+\sum_{i=1}^N OM_i[P(t)]+\sum_{i=1}^N ENC_i[P(t)]+[C_b(t)\times P_b(t)]-\sum_{i=1}^N (C_{sh}-C_{sci})\right\} \quad (1)$$

式(1)中: $F(P)$ 为并网运行时微网经济运行成本; $C_i[P(t)]$ 为微型燃气轮机和火电机组的燃料成本, i 表示种类; $OM_i[P(t)]$ 为微型燃气轮机和火电机组的运行维护成本,同理 i 表示种类; $ENC_i[P(t)]$ 为微型燃气轮机和火电机组的环境成本函数; $C_b(t)$ 为 t 时刻的购电价; $P_b(t)$ 为购买的电量; C_{sh} 、 C_{sci} 为微型燃气轮机的制冷制热收益; N 为微源数量; T 为整个优化周期时段。

孤网运行方式下的微网经济调度数学模型则

不包含购售电环节。

1.2.2 约束条件

1)功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^N P_i+P_{buy}-P_{sell}=P_{load} \quad (2)$$

2)电源输出容量约束

$$P_i^{\min}<P_i<P_i^{\max} \quad (3)$$

3)火电机组爬坡率约束

$$\text{增负荷时 } P_{i,t}-P_{i,t-1}\leq P_{up,i}; \quad (4)$$

$$\text{减负荷时 } P_{i,t-1}-P_{i,t}\leq P_{down,i} \quad (5)$$

4)火电机组启停次数约束

在优化约束时间内起或停次数为

$$n<T/24 \quad (6)$$

5)最小启停时间约束

$$\begin{cases} t_{on}\leq t_{up} \\ t_{off}\leq t_{down} \end{cases} \quad (7)$$

式(2)-(7)中: P_i 为微源的输出功率; P_{buy} 和 P_{sell} 分别为购入和售出电量; P_{load} 为总负荷; $P_i^{\min}$ 和 $P_i^{\max}$ 分别为机组最小出力和最大出力; $P_{up,i}$ 和 $P_{down,i}$ 分别为负荷上升和下降的爬坡率; t_{on} 和 t_{off} 为机组运行、停运的时间; t_{up} 和 t_{down} 为规定的机组最小运行、停机时间。

孤网运行时的约束条件与并网运行时相同。

2 改进鸡群算法

2.1 原理

鸡群算法(CSO)^[13-14]作为一种模拟鸡群智能搜索行为的生物智能优化算法,该算法把优化问题的解看作是具有经验和智慧的智能个体即鸡,将优化问题的目标函数值度量度为鸡群中个体对环境的适应能力,并根据各个个体适应度值的不同将其划分为公鸡、母鸡、小鸡3个类群,各类群都有各自不同的搜索方式。由此看来,该算法具有群优化思想和分类优化的特点,寻优过程中兼顾了全局搜索和局部优化。

鸡群算法中将适应度值好的个体定义为公鸡粒子,其个体搜索能力强,依据现实中鸡群的行为,确定每个搜索群中含有1只公鸡,即有多少个公鸡粒子就有多少个搜索群,其搜索方式的数学模型为:

$$x_{i,j}^{t+1}=x_{i,j}^t[1+Randn(0,\delta^2)]; \quad (8)$$

$$\delta^2=\begin{cases} 1 & f_i\leq f_s \\ e^{-\frac{(f_i-f_s)}{|f_i|+e}} & f_i>f_s \end{cases} \quad (9)$$

式(8)、(9)中: $x_{i,j}$ 为第 i 只公鸡位置在第 j 维中所处的位置,当前的迭代次数为 s ,是服从期望值为0,方差值为2的正态分布随机数; f_i 为第 i 只公鸡的适

应度; f_s 为随机选取公鸡 s 的适应度。

适应度值稍差的个体定义为母鸡, 母鸡将跟随其所在群中的公鸡进行搜索, 同时也会受到其他搜索群中公鸡的影响, 其搜索方式的数学模型为:

$$x_{i,j}^{t+1} = x_{i,j}^t + k_1 \text{Rand}(x_{r_1,j}^t - x_{i,j}^t) + k_2 \text{Rand}(x_{r_2,j}^t - x_{i,j}^t); \quad (10)$$

$$k_1 = e^{(f_i - f_r) / |f_i - f_r|}; \quad (11)$$

$$k_2 = e^{f_i - f_r}. \quad (12)$$

式(10)–(12)中: Rand 是一个服从[0, 1]均匀分布的随机数; 该母鸡的伙伴公鸡 r_1 的适应度值为 f_r ; 其伙伴公鸡对其的影响因子为 k_1 ; f_r 为其他公鸡和母鸡中随机选取个体 r_2 的适应度值; 其他鸡对其的影响因子为 k_2 。

适应度值最差的个体定义为小鸡, 小鸡只跟随其母亲母鸡进行搜索, 其搜索方式的数学模型为

$$x_{i,j}^{t+1} = x_{i,j}^t + P(x_{m,j}^t - x_{i,j}^t). \quad (13)$$

式(13)中: $x_{m,j}$ 为母亲母鸡 m 在第 j 维中所处的位置; 随机函数随机生成的 P 为母亲母鸡的位置对小鸡位置的影响因子, 取值范围一般为(0, 2)。

由式(8)–(13)可以看出, 母鸡和小鸡在进行搜索时都要受到公鸡位置的影响, 如果只是每 G (每次迭代) 进行适应度排序, 更新鸡群的等级制度, 只是少数公鸡粒子陷入局部最优, 鸡群算法能改善传统智能算法陷入局部最优的问题, 则多数公鸡粒子陷入局部最优时, 会导致算法无法跳出局部最优。

因为母鸡的数量最多, 而且母鸡既受公鸡位置的影响也会对小鸡的位置有影响, 对算法有绝对性的影响, 由母鸡搜索方式的数学模型可得, 在母鸡搜索方式中, 在搜索开始时, k_1 取较大值、 k_2 取较小值, 增强自身搜索群中学习经验, 使得母鸡的全局搜索能力强; 在搜索后期, k_1 取较小值、 k_2 取较大值, 增强母鸡的社会经验, 使得母鸡的局部搜索能力增强。但是, 忽略了上一时刻母鸡位置对此时母鸡位置的影响, 为了提高算法的搜索速度, 在母鸡搜索方式的数学模型中加入惯性权重 ω , 惯性权重 ω 体现的是粒子继承先前的位置的能力, 一个较大的惯性权重有利于全局搜索, 较小的惯性权重则更有利于局部搜索。为了更好地平衡算法的全局搜索与局部搜索能力, ω 从 0.9 到 0.4 指数递减, 母鸡搜索方式的数学模型变成:

$$x_{i,j}^{t+1} = \omega x_{i,j}^t + k_1 \text{Rand}(x_{r_1,j}^t - x_{i,j}^t) + k_2 \text{Rand}(x_{r_2,j}^t - x_{i,j}^t); \quad (14)$$

$$k_1 = e^{(f_i - f_r) / |f_i - f_r|}; \quad (15)$$

$$k_2 = e^{f_i - f_r}; \quad (16)$$

$$\omega(t) = \omega_{\max} - \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min})}{t_{\max}} \times t^2. \quad (17)$$

式(17)中, $t_{\max}$ 为最大迭代次数。

2.2 改进鸡群算法的目标函数求解

用文中提出的改进鸡群算法, 求解目标函数的具体步骤如下:

1) 数据初始化。置迭代次数初值 $t=0$, 最大迭代次数 $t_{\max}=300$; 种群更新代数 $G=10$, 个体位置的维度 $D=6$; 公鸡个体所占比例为 20%, 母鸡个体(包含母亲母鸡)所占比例为 60%, 小鸡个体所占比例为 20%, 母亲母鸡所占比例为 10%; 鸡群大小 $N=100$ 。

2) 初始化鸡群。计算鸡群中各个个体的适应度, 并进行适应度值优劣排序, 前 RN 个个体为公鸡, 最后 CN 个个体为小鸡, 其余为母鸡。鸡群分成 RN 个搜索群, 母鸡随机分配到个群中, 确定公鸡和母鸡的伙伴关系。随机选取 MN 个个体为母鸡, 随机统领小鸡, 确定母亲母鸡与小鸡的母子关系。

3) 迭代开始, 如果 $t \% G = 1$ 适应度值重新排序, 重新建立鸡群等级制度, 重新对鸡群进行搜索群分组, 否则进行各种个体的位置更新。

4) 个体位置更新。各种个体按照自己的搜索方式的数学模型进行位置更新。

5) 计算新位置的适应度值, 与未更新位置时对应的适应度值比较, 若新位置的适应度值优于未更新位置时的适应度值时, 则更新个体位置, 否则放弃该次更新。

6) 计算此时各个个体的适应度值, 重新进行适应度值排序, 重新建立鸡群等级制度, 重新对鸡群进行搜索群分组。

7) 对各个参数约束条件进行判断, 若各个参数满足约束条件, 则进行 8), 否则回到 1)。

8) 置 $t=t+1$, 若 $t < t_{\max}$, 转 2), 否则进行 9)。

9) 输出结果, 并退出程序。

算法流程见图 1。

3 算例分析

文中针对 10 kV 微网案例典型日进行分析, 微网结构见图 2, 仿真时长为 24 h, 单位时间段长度为 1 h。能源价格表详见文[15], 设备技术性能参数详见文[16], 环境效益折价详见文[17–19]。夏季典型日冷电负荷曲线的数据来源于文[20]。风速、环境温度、光照强度、电池板温度、热电负荷、冷电负荷曲线分别见图 3–8。

3.1 冬季并网运行结果

冬季并网运行时微电网中各微源出力曲线图和微电网与外部电网交互功率曲线图见图 9、10。

如图 9(b)所示, 仅在 18–20 时的峰时段中, 微燃机在满足冷负荷需求后继续发电满足电负荷需求。

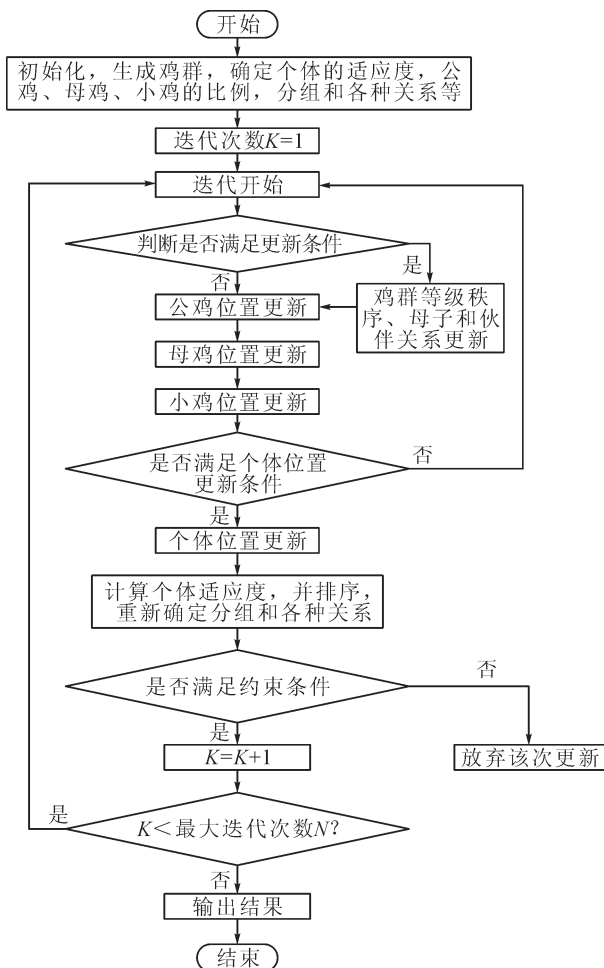


图1 算法流程

Fig. 1 The process of algorithm

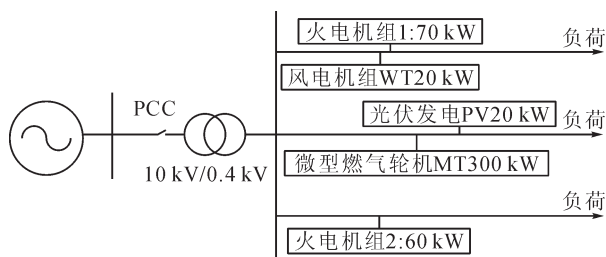


图2 系统仿真图

Fig. 2 System simulation diagram

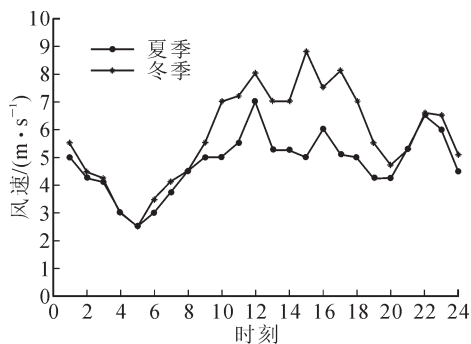


图3 风速曲线

Fig. 3 Wind velocity curve

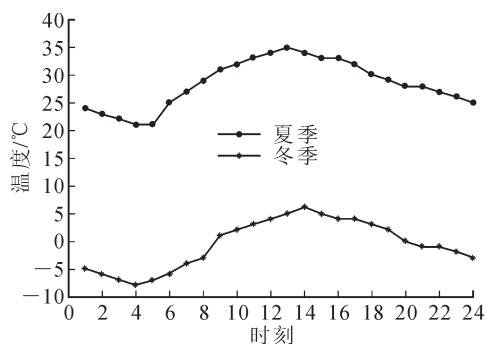


图4 环境温度曲线

Fig. 4 Ambient temperature curve

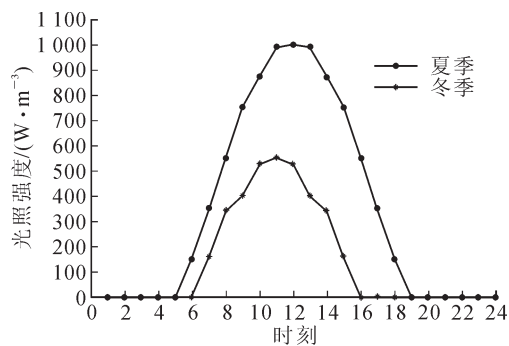


图5 光照强度曲线

Fig. 5 Light intensity curve

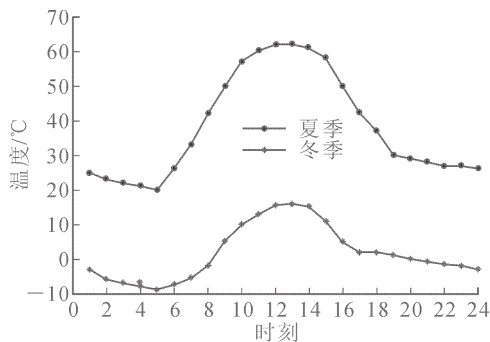


图6 电池板温度曲线

Fig. 6 Ambient temperature curve

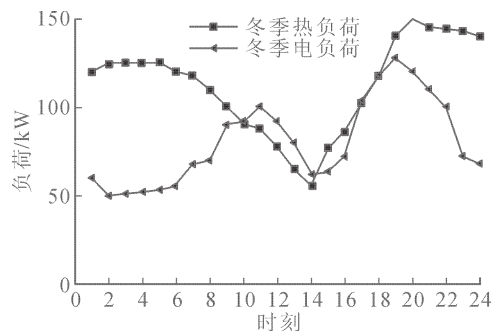


图7 热电负荷曲线

Fig. 7 Hot electric load curve

对比图 9(a)、(b)可知,两台火电机组出力与交互功率曲线走向均由分时电价决定,售电电价比火电机组发电成本高时,火电机组出力多,满足电负荷后向主网售电,购电电价比火电机组发电成本低,则增

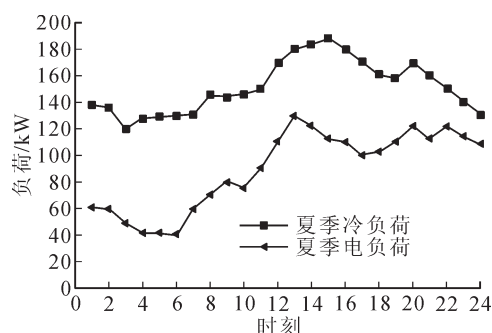
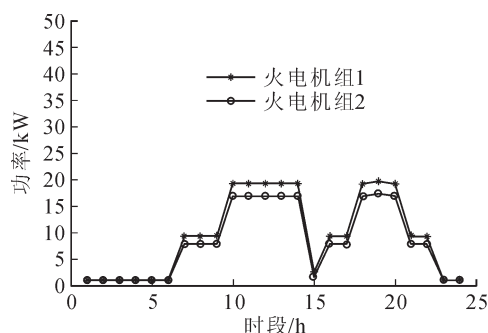
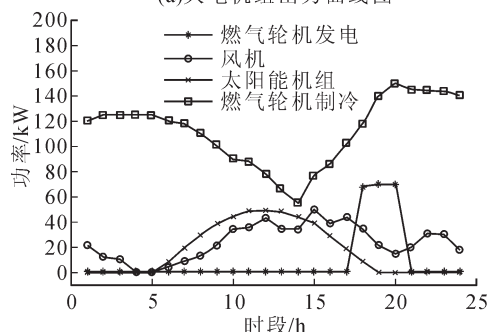


图8 冷电负荷曲线

Fig. 8 Cold electric load curve



(a)火电机组出力曲线图



(b)微源出力曲线图

图9 冬季并网运行时电源出力曲线图

Fig. 9 Winter grid runtime power output curve

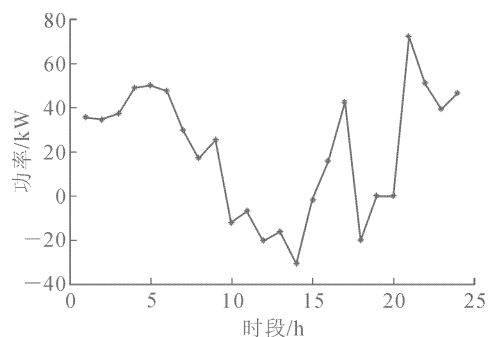


图10 交互功率曲线图

Fig. 10 Interactive power curve

加与主网的交互,降低火电出力。

冬季并网时微燃机不同制热功率的成本曲线见图11。明显的,微网运行成本随着微燃机制热功率的降低而增加。实际运行中,影响微燃机制热/制冷效率的因素非常复杂,因此为了减少系统的发电

成本,应尽量使其以冷/热定电,不足的电量可调度其余机组或向主网购电;当微燃机制热功率超出所需负荷时会造成废热,无法获得制热收益同时也增加燃料消耗、运维成本和环境治理费用,因此从经济性角度考虑是不允许出现的。

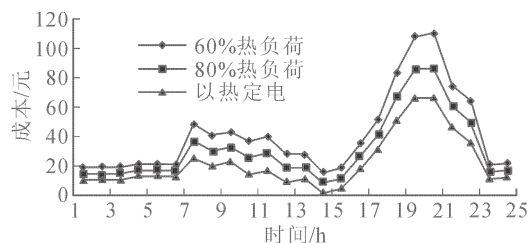
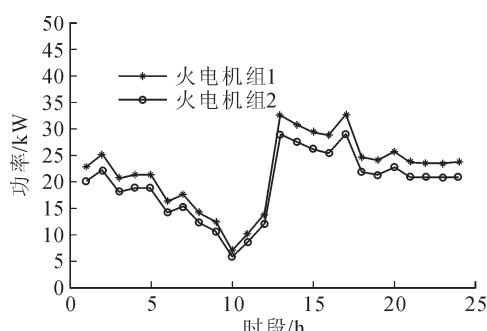


图11 微燃机制热功率不同时成本对比图

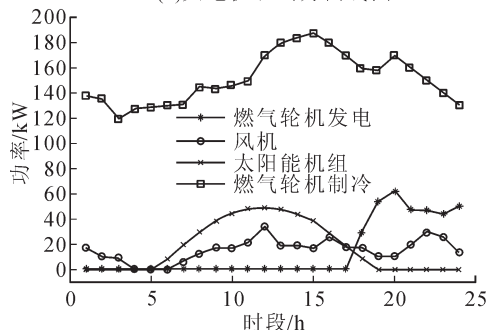
Fig. 11 The heating power cost comparison chart at the same time

3.2 夏季孤网运行

夏季孤网运行时微网内微源的出力情况见图12。用MATLAB编程时加入虚拟制冷机组,得到微燃机制冷功率曲线,对比夏季典型日冷电负荷曲线可知,此时微燃机完全按照冷负荷出力,1-17时满足冷负荷需求后不再出力,17时以后进入晚高峰,负荷增加,微燃机继续发电。风机与太阳能机组出力完全受环境因素影响,火电机组出力曲线与电负荷出力曲线趋势基本一致。



(a)火电机组出力曲线图



(b)微源出力曲线图

图12 夏季孤网运行时微源出力曲线图

Fig. 12 Summer isolated grid runtime power output curve

夏季孤网运行时微燃机不同制热功率的成本曲线见图13。微网运行成本随着微燃机制冷功率的

降低而增加。当微燃机按照“以冷/热定电”的控制策略运行,也就是制冷功率等于冷负荷时,24 h的总成本为 909.67 元;微燃机满足 80%的冷负荷时,成本为 1 447.99 元;而当微燃机仅满足 60%热负荷需求时,总成本增加至 2 023.63 元。同冬季相同,夏季孤网实际运行中,影响微燃机制冷效率的因素非常复杂,因此为了减少系统的发电成本,应尽量使其以冷定电,不足的电量可调度其余机组出力;当微燃机制冷功率超出所需负荷时会造成废冷,无法获得制冷收益同时也增加燃料消耗、运维成本和环境治理费用,因此从经济性角度考虑是不允许出现的。

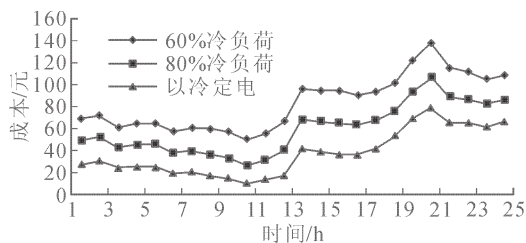


图 13 微燃机制冷功率不同时成本对比图

Fig. 13 The cooling power cost comparison chart at the same time

4 结语

文中建立包含传统火电机组在内的冷热电三联供型微电网的经济运行模型,考虑微电网经济性和环保性,提出负荷综合效益的运行策略,并首次使用改进鸡群算法实现微电网经济环保运行,针对优化结果进行具体成本分析和综合效益分析,分析显示微网的经济调度在降低发电成本方面产生良好的综合效益,具体表现为调度微燃机制冷/热功率使其等于系统所需冷/热负荷时可以降低微网总体运行成本,验证了所提策略的准确性和算法的可行性,这一结论对微网的投资、经济运行具有一定的参考意义。但随着电动汽车渗透力的增加,将电动汽车考虑到微电网经济运行中已经成为必然的趋势,同时,文中对算法的改进也只是考虑增加惯性权重,算法还有很大的空间可以进行改进。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 智能电网技术[M]. 北京:中国电力出版社,2010. LIU Zhenya. Smart grid technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [2] 李 鹏,张 玲,王 伟,等. 微网技术应用与分析[J]. 电力系统自动化,2009,33(20):109-115. LI Peng, ZHANG Ling, WANG Wei, et al. Application and analysis of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(20): 109-115.
- [3] 郭佳欢. 微网经济运行优化的研究[D]. 北京:华北电力大学,2010. GUO Jiahuan. Micro-grid economic operation optimization research[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2010.
- [4] 段绍辉,汪 伟,刘中胜,等. 含光伏的冷热电联供微网系统优化调度方案[J]. 电力系统及其自动化学报,2013, 25(4):150-155. DUAN Shaohui, WANG Wei, LIU Zhongsheng, et al. Research on optimal scheduling of combined cooling heating and power with photovoltaic power generation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(4): 150-155.
- [5] 李 鹏,余伟娜,周泽远,等. 基于改进万有引力搜索算法的微网优化运行[J]. 中国电机工程学报,2014,34(19): 3073-3079. LI Peng, YU Weina, ZHOU Zeyuan, et al. Operation optimization of micro grid based on improved universal search algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3073-3079.
- [6] 余金龙,赵文会,赵 波,等. 基于多状态建模的独立型微电网优化配置[J]. 电力系统自动化,2015,39(6):11-17. YU Jinlong, ZHAO Wenhui, ZHAO Bo, et al. Optimal configuration of independent micro-grid based on multi state modeling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(6): 11-17.
- [7] 路欣怡,黄扬琪,刘 念,等. 含风光柴蓄的海岛独立微电网多目标优化调度方法[J]. 现代电力,2014,31(5): 43-48. LU Xinyi, HUANG Yangqi, LIU Nian, et al. Multi-objective optimization scheduling method for islanded micro-grid with PV, wind turbine, diesel generation and storage batteries[J]. Modern Electric Power, 2014, 31(5): 43-48.
- [8] 薛贵挺,张 焰,刘玉娇,等. 基于克隆选择算法的微电网多目标运行优化[J]. 电力自动化设备,2014,34(3):16-21. XUE Guiting, ZHANG Yan, LIU Yujiao, et al. Multi-objective operation optimization based on clone selection algorithm for microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 16-21.
- [9] 周开乐,沈 超,丁 帅,等. 基于遗传算法的微电网负荷优化分配[J]. 中国管理科学,2014,22(3):68-73. ZHOU Kaile, SHEN Chao, DING Shuai, et al. Power economic dispatch of microgrid based on genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Management Science, 2014, 22(3): 68-73.
- [10] 王 晨. 基于混合蛙跳算法的微电网运行优化[D]. 兰州:兰州理工大学,2014. WANG Chen. Based on the micro grid operation and optimization on hybrid leapfrog algorithm[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014.
- [11] 赵媛媛,艾 芊,余志文,等. 考虑多种因素评的微电网优化调度[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(23):23-30.

- ZHAO Yuanyuan, AI Qian, YU Zhiwen, et al. Consider a variety of factors assessment of the micro grid optimizations cheduling[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23):23-30.
- [12] 彭春华, 谢 鹏, 詹骥文, 等. 基于改进细菌觅食算法的微网鲁棒经济调度[J]. 电网技术, 2014, 38(9):2392-2398. PENG Chunhua, XIE Peng, ZHAN Jiwen, et al. Robust economic dispatch of microgrid using improved bacterial foraging algorithm[J]. Power System Technology, 2014, 38(9):2392-2398.
- [13] MENG Xianbing, LIU Yu, GAO Xiaozhi, et al. A new bio-inspired algorithm: Chicken swarm optimization[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2014(8794):86-94.
- [14] SMITH C L, ZIELINSKI S L. The startling intelligence of the common chicken[J]. Scientific American, 2014, 310(2): 89-90.
- [15] 丁 明, 张颖媛, 茆美琴, 等. 包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2011, 3(4): 7-14. DING Ming, ZHANG Yingyuan, MAO Meiqin, et al. Contains sodium sulfur battery energy storage micro network system economic operation optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 3(4):7-14.
- [16] 张颖媛. 微网系统的运行优化与能量管理研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2011. ZHANG Yingyuan. Operation optimization and energy management of micro grid system[D]. Hefei: HeFei University of Technology, 2011.
- [17] MORGANTOWN W. Emission rates for new DG technologies. the regulatory assistance project, May 2001[EB/OL]. <http://www.raponline.org/ProjDocs/DREmsRul/Collfile/DG>, 2016-11-02.
- [18] PIPATTANASOMPORN M, WILLINGHAM M, RAHMAN S. Implications of on-site distributed generation for commercial/industrial facilities[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(1):206-212.
- [19] 魏学好, 周 浩. 中国火力发电行业减排污染物的环境价值标准估算[J]. 环境科学研究, 2003, 16(1):53-56. WEI Xuehao, ZHOU Hao. Evaluating the environmental value schedule of pollutants mitigated in China thermal power industry[J]. Research of Environmental Sciences, 2003, 16(1):53-56.
- [20] 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.

胡汉梅(1965—), 女, 教授, 硕士生导师, 从事电力系统及其自动化专业的科研与教学工作。

李静雅(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向是微电网的优化运行(通信作者)。

黄景光(1968—), 男, 博士, 副教授, 从事信号分析和电力系统继电保护方面的研究。

(上接第 18 页)

- field effects[J]. IEEE International Conference on Solid Dielectrics, 2013(4):1056-1059.
- [27] 汪 汛, 方 志, 邱毓昌. 高压直流 GIS 中绝缘子的表面电荷积聚的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 105-109. WANG Feng, FANG Zhi, QIU Yuchang. Study of charge accumulation on insulator surface in HVDC gas-insulated switchgear[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 105-109.
- 杜乾栋(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事 GIS 绝缘试验方面的研究。
- 张乔根(1965—), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事气体绝缘与放电等离子技术、大功率脉冲技术及应用的研究。