

含高温储能系统的微电网经济运行研究

罗毅,张丽娟

(华北电力大学控制与计算机工程学院,北京 102206)

[摘要] 高温储能系统以其高效、环保、节能等优点而有着广泛的应用前景,含高温储能系统的微电网经济运行日益引起关注。文中对高温储能系统、风机、光伏电池、蓄电池、微型燃气轮机以及燃料电池组成的微电网进行分析研究,在分时电价以及微网并网运行的环境下,基于各电源功率特性,建立了高温储能系统模型及微网经济运行模型。运用改进免疫粒子群算法进行模型求解,现场应用验证了其有效性,结果表明文中方法可使微网动态运行整体达到最优,高温储能系统参与热负荷供应,可以节省成本,具有显著的经济效益。

[关键词] 高温储能系统;微电网;经济运行;优化调度;免疫粒子群算法

[中图分类号] TM721 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2015)01-0074-07

1 前言

随着能源问题和环境问题的日益突出,开发清洁的可再生能源资源已经成为世界各国经济和社会可持续发展的重要战略^[1,2]。近年来,为了解决分布式电源与大电网的融合问题,微电网应运而生。但是,微电网中具有随机性、间歇性、波动性的可再生能源占很大比例,降低了其抗扰动能力^[3]。为了提高系统稳定性,改善电能质量,发展可靠的储能系统是必不可少的技术支撑。高温储能系统作为一种新型储能方式得到发展,既可以起到移峰填谷的作用,又可以弥补蓄电池成本太高、使用寿命短的不足,降低风电、光伏发电对蓄电池的充放电性能与容量等要求。因此,包含高温储能系统的微电网构成了热电联供型供给方式,从而提高能源的利用效率,减少有害气体的排放,降低系统运行成本,具有良好的社会效益和经济效益。

许多学者对微电网经济运行进行了一系列研

究。文献[4]中微电网动态优化考虑一个调度周期内的运行成本,以调度周期内的总收益最高或总成本最低为目标,优化系统运行。由于动态优化考虑了多时段设备运行之间的协调配合,对于通常含有储能、发电等时间耦合特性元件的微电网,优化效果更理想。文献[5,6]较为全面地建立了包括成本分析、可靠性分析、备用分析、线路潮流与利用率分析、负荷分析,投资效益分析等大量数据在内的电力规划评估指标体系,进而从不同的时间维度与分析维度实现对电网规划方案的分析与评估。这个体系对于微电网的设计与调度同样具有指导意义。文献[7]建立了冷热电联供系统的节能优化调度模型,重点研究了典型的联供系统的发电成本,但是所采用模型较简单。文献[8]针对间歇式电源的间歇性和波动性,引入模糊理论,将间歇式电源的出力 and 负荷用模糊参数表示,对传统确定型模型进行改进,但这种方法没有可信性指标参照,所得结果可能不满足可信性要求,在低可信性下的最优

[收稿日期] 2014-11-06

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目(61273144)

[作者简介] 罗毅,1969年出生,男,湖南新化县人,教授,主要研究方向为复杂系统建模与仿真、优化控制与决策;

E-mail: lyphzh@ncepu.edu.cn

解在实际决策时不会采用。文献[9]利用线性加权法和法将多目标问题转换为单目标问题,分析不同权重对结果的影响,但这种方法主观因素影响较大。文献[10]通过搭建简单的微网模型,模拟其离网运行情况,肯定了微网维持电能质量的能力,然而,该文没有对微网的调度策略进行分析,也未考虑微网运行的经济性。

上述研究大都是以热电联供型的调度模型为基础,各微源模型的约束仍不能满足实际的要求,而且这些研究没有涉及高温储能系统的使用情况,因此,针对以上问题,将着重研究高温储能系统的工作原理,建立其工作模型。并且在分时电价以及微网并网运行的环境下,综合考虑各微源的容量约束、爬坡约束、启停约束等约束条件,建立热电联供型微电网的经济运行模型。采用改进免疫粒子群算法对算例进行求解,以验证所建模型的有效性。供热过程中,通过对是否含有高温储热系统的运行优化结果进行对比,分析讨论高温储能系统对微电网带来的经济效益。

2 微电网系统建模

本文将包含光伏电池(photovoltaic, PV)、风机(wind turbine, WT)、微型燃气轮机(micro turbine, MT)、蓄电池(storage battery, SB)、燃料电池(fuel cell, FC)、高温储能系统以及热电负荷的微电网作为研究对象,其结构如图1所示。整个微网相对外部电网来说是一个整体,通过一个静态开关和上级电网的变电站相联系。本文根据不同微源的出力-发电成本特性及其约束条件,建立了各个微源的经济性数学模型。

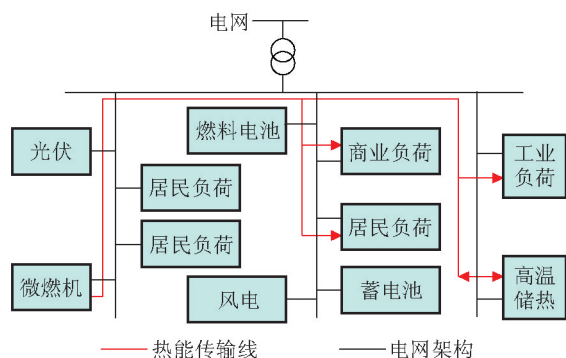


图1 微网系统结构图

Fig. 1 System configuration of microgrid

2.1 高温储能系统模型

2.1.1 高温储能系统的特点

高温储能系统是将风、光伏发电系统的不平衡电力或者电网低谷电转化为高温热能储存,用于供热、供冷及炊事(建筑供暖、供冷,工业供热,海水淡化,生活热水及炊事,工业余热利用)或者用于再发电实现平滑输电。高温储能系统具有以下特点:a. 储能容量大,通过增加或者减少其中的储能介质来控制储能的容量;b. 储能密度大,约为720 Wh/L;c. 温度高,在常压下,储热可以达到800℃以上;d. 效率高,电能转换为热效率近100%,热能转换成热效率保持在97%左右;e. 造价低,制造成本低;f. 安全可靠及经济性好,没有潜在的爆炸或着火危险,没有燃烧、没有水、没有废弃物排放,运行无噪音,经济环保;g. 使用寿命长。储能介质热传导率高,比热值大,耐高温氧化强;h. 选址自由度大,可全自动封闭运行,占地面积小,节省空间,易于安装和维修。

2.1.2 高温储能系统的工作过程

1) 电能转换为热能可以概括为:

$$H_{ih} = P_e \cdot \eta_{eh} \quad (1)$$

式(1)中, P_e 为输入蓄热系统的电能; H_{ih} 为输入高温储能系统的热能; η_{eh} 为电能转换为热能的转换效率,与加热管等材料有关。

2) 热能的输出过程可以概括为:

$$H_{oh} = \sum \frac{n \cdot m \cdot C \cdot T_{max}}{t_c \cdot 3600} \Delta t \quad (2)$$

式(2)中, H_{oh} 为蓄热系统输出的热能总量; C 为储能介质的比热容,取值为1.2 kJ/(kg·℃); m 为每块蓄热介质的质量,单位为kg; n 为蓄热介质的数量; T_{max} 为储热砖的额定蓄热温度上限; t_c 为蓄热系统的充电时长; Δt 为单位时间长度。由于热转换效率在97%左右,所以 H_{ih} 与 H_{oh} 的值几乎相同。

3) 高温储能系统可以将存储的热能转换为电能,与其他微电源一起发电以满足微电网中的电负荷。与余热发电的工作原理类似,只是转换效率不是很高,因此只有特殊情况下才会这样使用。

综上所述,其数学模型为:

$$L(t) = L(t-1)\eta_L + \Delta t H_{ih}(t)\eta_{in} - \Delta t H_{oh}(t)/\eta_{out} \quad (3)$$

式(3)中, $L(t)$ 为高温储能系统 t 时刻的储能容量; $H_{ih}(t)$ 、 $H_{oh}(t)$ 分别为 t 时刻输入和输出的热能; η_L 、 η_{in} 和 η_{out} 分别为高温储能系统的存储、输入和输出转化效率。

本文选取的高温储能系统的相关参数如表1所示。其中,功率造价和容量造价分别代表安装高温储能系统每千瓦及每千瓦时所需费用。

表1 高温储热系统的相关参数

Table 1 Parameters of high temperature energy storage system

参数	数值
额定功率/kW	100
额定容量/kcal	688 000
功率造价/(元·kW ⁻¹)	1 600
容量造价/(元·kW ⁻¹)	200
效率/%	97
寿命/年	25

注:1 cal≈4.1875 J

2.2 蓄电池模型

蓄电池具有平抑可再生能源发电功率波动的作用,本文选用功率大、效率高的钒电池。

蓄电池放电时, $P_{sb}(t) \geq 0$, t 时刻的电池的剩余容量为:

$$C_{soc}(t) = C_{soc}(t-1) - P_{sb}(t)/\eta_F - D_B Q_B^S \quad (4)$$

蓄电池充电时, $P_{sb}(t) \leq 0$, t 时刻的剩余容量为^[11]:

$$C_{soc}(t) = C_{soc}(t-1) - P_{sb}(t)/\eta_C - D_B Q_B^S \quad (5)$$

式(4)、式(5)中, $C_{soc}(t)$ 为 t 时刻蓄电池的剩余容量, $P_{sb}(t)$ 为 t 时刻蓄电池的充、放电功率; η_F 、 η_C 分别为放、充电效率; D_B 为蓄电池每小时的自放电比例; Q_B^S 为蓄电池的总容量。

2.3 微型燃气轮机模型

含微型燃气轮机的热电联产系统的数学模型为:

$$\begin{cases} Q_{MT} = \frac{P_m(t)}{\eta_m}(1 - \eta_m(t) - \eta_l) \\ Q_{ho}(t) = Q_{MT}(t)K_{ho} \\ V_{MT} = \sum(P_m(t)\Delta t/\eta_m L) \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中, $Q_{MT}(t)$ 为 t 时刻燃气轮机排气余热; $P_m(t)$ 为 t 时刻燃气轮机输出的电功率; $\eta_m(t)$ 为 t 时刻燃气轮机的发电效率; η_l 为燃气轮机的散热损失系数; $Q_{ho}(t)$ 为 t 时刻燃气轮机烟气余热提供的制热量; K_{ho} 为溴冷机的制热系数; V_{MT} 为燃气轮机消耗的天然气体积; Δt 为燃气轮机的运行时间,本文取为1 h; L 为天然气低热值,取9.7 kWh/m³。

微型燃气轮机的燃料成本为:

$$C_{MT} = C_{n1} \cdot V_{MT} \quad (7)$$

式(7)中, C_{n1} 为天然气价格,文中取2.5元/m³。具体

参数参见文献[11]。

2.4 燃料电池模型

燃料电池可以将存储在燃料和氧化剂中的化学能直接转换为电能,并且可以连续发电。燃料电池发电过程中的燃料消耗费用计算式为:

$$C_{FC} = C_{n1} \cdot \sum(P_{FC}(t)\Delta t/\eta_{FC}(t)L) \quad (8)$$

式(8)中, $P_{FC}(t)$ 、 $\eta_{FC}(t)$ 分别为 t 时刻燃料电池的输出功率和工作效率。具体参数参见文献[11]。

2.5 风机出力模型

由风轮机的空气动力学指示可以得到风轮机的输出功率为^[12]:

$$P_{WT} = \frac{1}{2}v^3 \cdot \rho \cdot \pi R_{WT}^2 \cdot C_p \quad (9)$$

式(9)中, R_{WT} 为风轮机叶片的半径; πR_{WT}^2 为叶片的扫落面积; ρ 为空气密度; v 为风速; C_p 为风能利用系数。

2.6 光伏电池模型

光伏电池^[13]的输出功率的计算式为:

$$P_{PV} = P_{STC} \frac{G_{AC}}{G_{STC}} [1 + k(T_c - T_r)] \quad (10)$$

式(10)中, P_{STC} 为STC(标准测试条件:太阳光入射强度1 000 W/m²,环境温度25℃)下的最大测试功率; G_{AC} 为光照强度; G_{STC} 为STC下光照强度,取1 000 W/m²; k 为功率温度系数,取0.47%/℃; T_c 为电池板工作温度; T_r 为参考温度,其值取25℃。

3 微电网经济运行

为了使电网实现最优技术经济比、最大经济效益、最可靠的电力供给、最优环境保护、最佳可持续发展,根据微电网内可再生能源资源、负荷需求等情况,将对模型进行优化,确定微电网内各分布式电源、储能系统的最佳容量配置方案^[14,15]。目前,微电网的电能质量还达不到向电网输送功率的要求,因此微网与电网并网只考虑电网向微网单向供电。其中,微电网中风电与光伏利用自然资源发电,认为其没有发电成本。本文研究的优化周期为24 h,单位时间间隔为1 h。

3.1 目标函数

考虑到微网运行状态变化快等特点,采用常规的日前调度模型。主要考虑发电单元的燃料成本、运行管理成本、投资折旧成本、微网与外网的交互成本、热电联产系统的制热收益成本。其函数为:

$$F_{\min} = \sum_{t=1}^{24} [C_f(t) + C_{OM}(t) + C_{DP}(t) + C_{grid}(t) - C_{sh}(t)] \quad (11)$$

其中:

$$C_f(t) = \sum_{i=1}^N f_i(P_i(t)) \quad (12)$$

$$C_{OM}(t) = \sum_{i=1}^N K_{OMi} \cdot P_i(t) \quad (13)$$

$$C_{DP}(t) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{C_{az,i}}{8760k_i} \cdot \frac{r(1+r)^{n_i}}{(1+r)^{n_i} - 1} \cdot P_i(t) \right] \quad (14)$$

$$C_{grid}(t) = C_b(t) \cdot P_b(t) \quad (15)$$

$$C_{sh}(t) = K_{ho} \cdot Q_{he}(t) \quad (16)$$

式(11)~式(16)中, t 为时间段数; N 为发电单元个数; $C_f(t)$ 为 t 时刻各电源的燃料成本, 主要包括MT和FC的燃料消耗; f_i 为第 i 个电源的燃料成本函数; $P_i(t)$ 为第 i 个电源 t 时刻的功率输出; $C_{OM}(t)$ 为 t 时刻各电源的运行管理成本; K_{OMi} 为第 i 个电源单位电量运行管理成本系数; $C_{DP}(t)$ 为 t 时刻各电源的投资折旧成本; $C_{az,i}$ 为第 i 个电源的单位容量安装成本; k_i 为第 i 个电源的容量因数; r 为年利率; n_i 为第 i 个电源的投资偿还期; $C_{grid}(t)$ 为 t 时刻微网与外网的交互成本; $C_b(t)$ 为 t 时刻微网向外网的购电价格; $P_b(t)$ 为 t 时刻微网向外网的购电量; $C_{sh}(t)$ 为 t 时刻的制热收益; K_{ho} 为单位制热量的售价; $Q_{he}(t)$ 为 t 时刻热电联产系统的制热量。

3.2 约束条件

1) 功率平衡约束:

$$P_{WT}(t) + P_{PV}(t) + P_{MT}(t) + P_{SB}(t) + P_{FC}(t) + P_{grid}(t) = P_{load}(t) \quad (17)$$

式(17)中, $P_{SB}(t)$ 放电时为正, 充电时为负; $P_{grid}(t)$ 为微电网从电网购电量; $P_{load}(t)$ 为 t 时段的负荷值。

2) 微电源的输出功率约束:

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (18)$$

式(18)中, P_i^{\min} 、 P_i^{\max} 分别为第 i 个电源输出功率的最小、最大值。

3) 可控机组的爬坡约束:

$$\text{增负荷时: } P_i(t) - P_i(t-1) \leq r_{up} \Delta t \quad (19)$$

$$\text{减负荷时: } P_i(t-1) - P_i(t) \leq r_{down} \Delta t \quad (20)$$

式(19)、式(20)中, r_{up} 、 r_{down} 分别为机组的向上、向下爬坡速率。

4) 蓄电池运行约束:

$$\text{蓄电池出力限制: } P_{SB}^{\min} \leq P_{SB}(t) \leq P_{SB}^{\max} \quad (21)$$

$$\text{蓄电池容量限制: } C_{SOC}^{\min} \leq C_{SOC}(t) \leq C_{SOC}^{\max} \quad (22)$$

式(21)、式(22)中, P_{SB}^{\min} 、 P_{SB}^{\max} 分别为蓄电池输出功率最小、最大值; C_{SOC}^{\min} 、 C_{SOC}^{\max} 分别为蓄电池最小、最大剩余电量。

5) 微网与外网交互功率约束:

$$P_{grid}^{\min} \leq P_{grid}(t) \leq P_{grid}^{\max} \quad (23)$$

式(23)中, P_{grid}^{\min} 、 P_{grid}^{\max} 分别为微电网与电网允许交互传输的最小和最大功率。

6) 高温储能系统约束:

容量约束:

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

输入输出热能约束:

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

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

式(24)~式(26)中, L_{max} 、 $H_{ih,max}$ 和 $H_{oh,max}$ 为系统最大容量、最大热能输入值、最大热能输出值。

7) 旋转备用约束。避免停电事故的发生是电力系统可靠性的最基本内涵。由于发电机组有可能发生意外故障, 且准确地预测负荷比较困难, 所以需要维持一定的备用容量尤其是旋转备用容量^[16,17]。系统的旋转备用容量包括储能的备用容量, 其表达式为:

$$P_{SB}^{sr} \leq \min \{ P_{SB}^{\max}, (C_{SOC}(t-1) - C_{SOC}^{\min} - D_B Q_B^s) \eta_F \} \quad (27)$$

因此, 系统的旋转备用容量可以描述为:

$$P_{WT}(t) + P_{PV}(t) + P_{MT}(t) + P_{SB}^{sr}(t) + P_{grid}^{\max} + U_{FC}(t) P_{FC}^{\max} + R_n \geq P_{load}(t) \quad (28)$$

式(28)中, U_{FC} 为FC的启停状态, 启动时为1, 否则为0; R_n 为所需旋转备用容量。

4 模型求解

本文采用改进免疫粒子群算法(CIPSO), 即在免疫粒子群算法的基础上采用动态调整的学习因子。粒子群速度公式中的 $c_1 \text{rand}_1(\cdot)(p_{ij} - x_{ij}(t))$ 代表“认知”部分, 表示粒子对自身的思考即粒子从自身的学习, $c_2 \text{rand}_2(\cdot)(p_{gj} - x_{ij}(t))$ 代表“社会”部分, 即粒子从群体中的学习, 表示与邻居粒子的比较和模仿, 实现粒子与粒子间信息共享与合作。传统算法中, 学习因子 c_1 和 c_2 的取值通常是固定的, 没有根据算法的不同阶段来设置不同的学习因子, 使得社会搜索和认知搜索权重相同, 这种做法忽略了学习因子变化的重要性, 算法的收敛速度和精度明显不如变化的学习因子, 甚至在单峰函数的寻优过程中过早陷入局部收敛, 无法找到全局最优解^[18]。改进后的算

法克服以上问题的同时,又提高了解的精度。

粒子搜索的前阶段速度快,后期易过早收敛于局部极值。本文对学习因子 c_1 和 c_2 进行改进,通过调节学习因子,让粒子渐渐地少向自己的最优 p_{ij} 学习,而向社会最优 p_{gj} 学习多一点,使粒子向社会的最优靠拢。初期使粒子进行大范围搜索,以期获得具有更好多样性的高质量粒子,后期不断地向社会最优学习,尽可能摆脱局部极值的干扰,从而提高解的精度。学习因子的变化可分为同步变化和异步变化,其中异步变化的学习因子又可分为对称变化和非对称变化的学习因子,同步变化的学习因子可表示为^[19]:

$$c = c_1 = c_2 = c_{\max} - k \times (c_{\max} - c_{\min}) / k_{\text{iter}} \quad (29)$$

异步变化的学习因子 c_1 和 c_2 可以表示为:

$$c_1 = c_{1\max} - k \times (c_{1\max} - c_{1\min}) / k_{\text{iter}} \quad (30)$$

$$c_2 = c_{2\max} + k \times (c_{2\max} - c_{2\min}) / k_{\text{iter}} \quad (31)$$

式(29)~式(31)中, k 为当前迭代次数; k_{iter} 是最大迭代次数; $c_{1\max}$ 、 $c_{2\max}$ 分别为 c_1 、 c_2 的最大值; $c_{1\min}$ 、 $c_{2\min}$ 分别为 c_1 、 c_2 的最小值。

粒子经验信息对寻优轨迹的影响反映粒子之间的信息交换。较大的 c_1 值会使粒子过多的在局部搜索;较大的 c_2 值使粒子过早收敛到局部最优值。为了加快搜索速度的同时提高搜索精度,按照粒子逐渐少向自己的最优 p_{ij} 学习,多向社会最优 p_{gj} 学习,使粒子向社会最优 p_{gj} 靠拢的原则,本文采用非对称线性变化的学习因子^[20],使得进化初期群体能在较短时间内快速搜索到最优值,进化后期能够快速准确收敛到最优解。

5 现场应用

为了验证上文提出的模型及算法的可行性,选取中国北方某地区微电网进行实验分析。各微源的具体参数如表2所示。

表2 各微源的参数

Table 2 Parameters of various microsources

电源类型	投资安装成本/(万元·kW ⁻¹)	维护成本/(元·kW ⁻¹)	功率下限/kW	功率上限/kW
WT	1.2	0.045	0	24
PV	2	0.009 6	0	12
MT	1	0.047	12	65
FC	2.8	0.1	6	40
SB	0.066 7	0.026	-30	30

本文中的热量单位 kcal 将换算成 kW 来计算。

天然气价格为 2.5 元/m³;高温储能系统的存储、输入和输出转化效率分别为 0.98、1.0、0.97;本文实行分时电价政策,峰时段为 10:00—15:00, 18:00—21:00;平时段为 7:00—10:00、15:00—18:00 和 21:00—3:00;谷时段为 0:00—7:00、23:00—24:00。电价分别为 0.82 元/(kW·h)、0.47 元/(kW·h)、0.16 元/(kW·h)。算例的数据包括冬季典型日电负荷和热负荷的预测曲线,热电负荷及风光预测出力如图2所示。

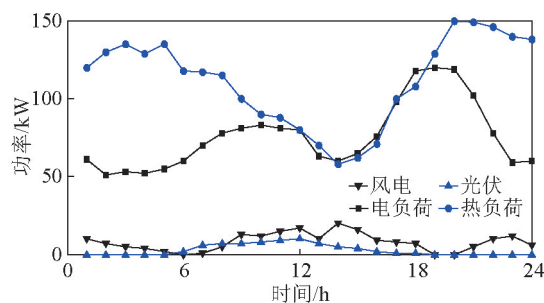


图2 热电负荷及风光预测出力

Fig. 2 Heating and electric loads, forecasted PV and WT output

5.1 不含高温储热系统的微电网运行结果

基于已建立的模型,经过算法求解,可以得到微电网中各可调节单元的调度出力,其出力情况如图3所示。其中:有功缺额=总电负荷-PV出力-WT出力-MT出力。

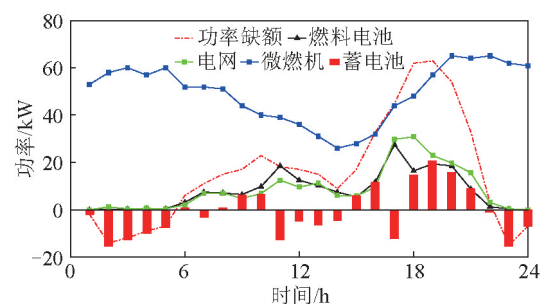


图3 不含高温储能系统的可控电源优化出力

Fig. 3 Dispatched output of controllable sources without considering high temperature energy storage system

由于遵循“以热定电”原则^[21],所以微燃机用来供热,与不可控电源风电、光伏发电均优先出力。图3中,当电网电价处于谷时段,如1—5和22—24时,微电网中电负荷较轻,PV,WT和MT发出的剩

余电量给蓄电池充电;当系统开始出现有功缺额,优先调用蓄电池进行功率补给,因此蓄电池几乎处于容量满发的状态。运行过程中,当微电网运行成本大于电网购电价格的时候,会及时对蓄电池充电,如11—14时段。蓄电池的出力范围不能满足微电网可靠运行,此时燃料电池出力与电网购电均增加,若此时处于峰时段,电价高于燃料电池发电成本,因此对燃料电池优先调用,不足则购电补充。整个运行过程中,蓄电池在缺负荷时放电,基于成本最小的原则,综合所有因素,选择合适的时刻进行充电,以减少运行费用。

5.2 含高温储热系统的微电网运行结果

含高温储能系统的微电网运行结果如图4所示。从图中可以看出,谷时段1—7时刻,微电网中电负荷较轻,PV、WT和MT发出的剩余电量给蓄电池充电,同时高温储能系统开始蓄热;8时开始,随着系统中电负荷增加,风光发电不能满足负荷,优先使用蓄电池进行放电,如果蓄电池运行范围内不能满足微电网正常运行,则增加对燃料电池出力与电网购电量;高温储热系统则是在谷时段集中充电,其余时刻进行放热,在不能满足热负荷的时刻,考虑到高温储能系统可以做到即充即用,因此此时需要比较其他微电源发电与电网购电价格,选择相对便宜的电源进行充电,虽然比谷时刻要价格高,但整个微电网的目标是为人提供便利,还是要以供热优先。

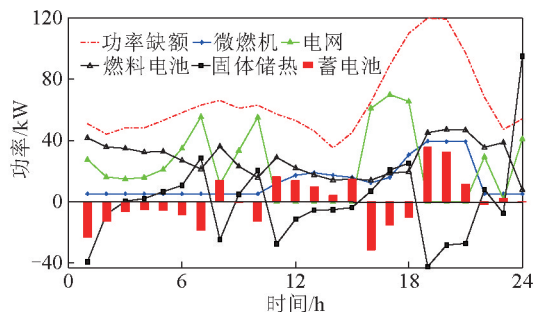


图4 微电网系统各微源的优化出力

Fig. 4 Dispatched output of sources in microgrid system

通过优化结果的成本对比,不同运行情况下费用见表3,含有高温储能系统的微电网的节能效益达到了10.2%,经济效益还是比较好的。

表3 不同运行情况下费用

Table 3 Costs of different operating conditions

不含高温储能系统运行成本/元	含高温储能系统运行成本/元
2 205.4	1 981.1

6 结语

本文首先根据高温储能系统的工作原理及特性,建立其机理模型。针对文中计及高温储能系统的混合微电网供电系统,利用预测到的风电、光伏、电负荷和热负荷的出力数据,建立了包含风电、光伏、微型燃气轮机、燃料电池等分布式电源以及高温储能系统的微电网优化运行模型。利用改进免疫粒子群算法对模型进行分析求解,验证了模型的有效性,得出了微电网系统的优化调度方案。实验结果表明,高温储能系统参与热负荷供应时,微电网运行成本更低,更节能、高效。

参考文献

- [1] 苏玲,张建华,王利,等.微电网相关问题及技术研究[J].电力系统保护与控制,2010(19):235-239.
- [2] 李富生,李瑞生,周逢权.微电网技术及工程应用[M].北京:中国电力出版社,2013.
- [3] 钱科军,袁越,石晓丹,等.分布式发电的环境效益分析[J].中国电机工程学报,2008,28(29):11-15.
- [4] 洪博文,郭力,王成山,等.微电网多目标动态优化调度模型与方法[J].电力自动化设备,2013,33(3):100-107.
- [5] 周鲲鹏,方仍存,颜炯,等.电网规划智能辅助决策系统的设计与实现[J].电力系统自动化,2013,37(3):77-82.
- [6] Marnay C, Asano H, Papathanassiou S, et al. Policymaking for microgrids[C]//Power and Energy Magazine, IEEE, 2008, 6(3):66-77.
- [7] 郭佳欢,沈宏,黄伟.含小型冷热电联产的微电网系统经济运行[J].电网与清洁能源,2009(10):21-24.
- [8] 熊虎,向铁元,陈红坤,等.含大规模间歇式电源的模糊机会约束机组组合研究[J].中国电机工程学报,2013,33(13):36-44.
- [9] 金鹏,艾欣,许佳佳.基于序列运算理论的孤立微电网经济运行模型[J].中国电机工程学报,2012,32(25):52-59.
- [10] 王凌,李培强,李欣然,等.微电源建模及其在微电网仿真中的应用[J].电力系统及其自动化学报,2010,22(3):32-38.
- [11] 李乐.微网的经济运行研究[D].北京:华北电力大学,2011.
- [12] Karki R, Hu P, Billinton R. A simplified wind power generation model for reliability evaluation[C]//IEEE Transactions on Energy Conversion,2006,21(2):533-540.
- [13] 陈洁,杨秀,朱兰,等.微网多目标经济调度优化[J].中国电机工程学报,2013,33(19):57-66.
- [14] Chen Changsong, Duan Shanxu, Cai Tao, et al. Smart energy management system for optimal microgrid economic operation

- [J]. IET Renewable Power Generation, 2011, 5(3): 258–267.
- [15] 徐 飞, 陈 磊, 金和平, 等. 抽水蓄能电站与风电的联合优化运行建模及应用分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 149–154.
- [16] 刘小平, 丁 明, 张颖媛, 等. 微网系统的动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 77–84.
- [17] 罗 毅, 刘明亮. 计及风险备用约束的孤网系统经济环保调度 [J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2705–2711.
- [18] 段其昌, 张广峰, 黄大伟. 加强学习与联想记忆的粒子群优化算法[J]. 计算机应用, 2012, 32(12): 3322–3325.
- [19] 鲁忠燕, 邓集祥, 汪永红. 基于免疫粒子群算法的电力系统无功优化[J]. 电网技术, 2008, 32(24): 55–58.
- [20] 张若含. 风光互补蓄能系统优化算法研究及应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [21] Chen Changsong, Duan Shanxu, Cai Tao, et al. Optimal allocation and economic analysis of energy storage system in microgrids[C]//Power Electronics, IEEE Transactions on, 2011, 26(10): 2762–2773.

Research on economic operation of microgrid with high temperature energy storage system

Luo Yi, Zhang Lijuan

(School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

[Abstract] With the advantages of high efficiency, environmental protection and energy conservation, the high energy storage system has extensive application prospect, economic operation is becoming a wide concerned issue on microgrid with high temperature energy storage system. By analyzing the microgrid with high temperature energy storage system, based on the characteristics of each micro-source, the model of high temperature energy storage system and economic operation model of the grid-connected microgrid are constructed with time-sharing electricity. The improved immune particle swarm algorithm is used to solve the proposed model, and then field application verifies the effectiveness of model. Results show that the proposed method and model can reach the globally optimal solution of dynamic microgrid, and it is of cost saving and significant economic benefit for high temperature energy storage system to participate in thermal load supplying.

[Key words] high temperature energy storage system; microgrid; economic operation; optimized dispatching; improved immune particle swarm algorithm