

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.10.024

含电动汽车混合储能系统的微网多目标经济优化运行

黄 山, 程启明, 张 强, 褚思远, 杨小龙

(上海电力学院自动化工程学院, 上海 200090)

摘要: 为了实现分布式电源组成的微网能以更为经济、灵活和环保的方式运行, 充分发挥分布式电源的发电优势。针对微网优化调度的问题, 提出以电动汽车同时作为负荷和发电单元且计及制热收益的微网多目标优化模型, 以经济效益最大化、环境成本最小化作为微网多目标优化问题。应用非劣排序遗传算法NSGA-II, 进行多目标优化求解, 求得Pareto前端解, 从而获得微网最优调度策略。通过算例验证了所提模型、策略和算法的有效性。

关键词: 微网; 多目标优化; 电动汽车; 热电联产; 混合储能; 优化调度

Multi-objective Economic Optimization of Microgrid Operation with Electric Vehicles Hybrid Energy Storage System

HUANG Shan, CHENG Qiming, ZHANG Qiang, ZHU Siyuan, YANG Xiaolong

(College of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: In order to ensure the microgrid with distributed power to operate in a more economical, flexible and environmental way, the superiority of distributed power can be given full play. Optimal scheduling for energy Internet issues, to propose multi-objective optimization function model of microgrid with electric vehicles which is a load and power generation unit at the same time, and economic operated CHP, which aims to maximize the economic benefit and minimize the environmental cost of multi-objective optimization of microgrid. Use the non-objective sorting genetic algorithm NSGA-II, solve the multi-objective optimization problems, obtain the Pareto front-end methods, and get the best dispatch strategy of microgrid. The validity of the proposed model, dispatch strategy and algorithm is proved by the examples.

Key words: microgrid; multi-objective optimization; electric vehicles; combined heat and power; hybrid energy storage; optimal scheduling

0 引言

近些年来在电力改革的大背景下, 微网能量优化管理越来越收到重视。文[1]提出, 构建全球能源互联网, 推动能源技术革命和体质革命的战略思想, 主张充分利用能源互联网的共享信息, 对能源互联网中的多种能源进行合理规划利用。微网能量

优化调度通过对分布式发电(distributed generation, DG)的微源、储能单元、各种负荷和当前微网运行状态以及历史数据进行充分分析, 继而做出科学的评估和预测; 根据微网系统内各类型分布式电源拥有的优先调度权分级、负载分类和主网电价情况不同的选择, 不同的能源调度策略, 以确定相应的最优调度模型, 不同的能源调度策略, 进而确定相应的最优调度模型。使用一个有效的算法来解决未来的周期不同的调度优化操作计划, 包括对微网内可调

收稿日期: 2017-04-19; 修回日期: 2017-06-23

基金项目: 国家自然科学基金(61304134); 上海市重点科技攻关计划(14110500700); 上海市电站自动化技术重点实验室(13DZ2273800); 上海市自然科学基金(13ZR1417800)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (61304134), The Key Science and Technology Plan of Shanghai Science and Technology Commission (14110500700), Shanghai Key Laboratory Power Station Automation Technology Laboratory (13DZ2273800), Shanghai Natural Science Foundation (13ZR1417800).

度型单元的日前出力计划、储能单元日前调度计划和实时调度计划,向用户同时提供电能和热能,实现热电联产(combined heat and power, CHP)^[2-5]。对于电动汽车(electric vehicles, EV)用户既可以是微网的负荷,也是可以作为电源。EV 有效合理接入微网,对于经济、环境及能源安全问题等具有重要意义^[6-7]。

目前对于微网的优化调度问题,国内外学者都做过积极探索。文[8]具体分析了分布式电源的优缺点并建立了优化数学模型,对微网中的分布式电源进行了优化管理,采用了一种小生境进化的多目标免疫算法(immune algorithm, IA)来优化分布式电源的出力,但它并没有考虑微网中电动汽车、联络交换功率以及储能设备的充放电指标,并且对于微网中的约束条件和价值成本也考虑较少;文[9]对于具体的动态调度问题,采用了经典遗传算法(genetic algorithm, GA),通过对微网中设备容量关系以及发电成本关系确定了运行调度方案,但上述微网的结果比较简单,并未考虑多种储能设备的出现以及电动汽车在微网中的作用;文[10]在考虑燃料电池、蓄电池有功和无功,同时满足二者的平衡、电能质量以及蓄电池充放电深度等约束条件的基础上,实现考虑制热收益的综合成本最低,但上述所用的 GA 算法主要针对单目标,并未涉及多目标进化算法,不适用于多目标直接求解。文[11-12]充分考虑了包含电动汽车和充电站随机调度问题,运用了线性规划方法求解了问题,但并没有真正的考虑优化问题,也没有建立优化模型。

上述文献对于具体的微网网络构架考虑不够全面具体,且一般只考虑微网的调度问题或只考虑优化问题,并没有同时考虑优化和调度两方面;另外,没有考虑能源互联的问题,大多只是单一的研究热电联产的优化,或是电动汽车在微网中的调度。

在这样的研究背景下,文中以经济和环境成本最小为目标,建立了含电动汽车(EV)、光伏阵列(photovoltaic cell, PV)、风机(wind turbine, WT)、微型燃气轮机(micro turbine, MT)、燃料电池(fuel cell, FC)、蓄电池(storage battery, SB)以及同时包含热负荷的微网多目标优化(multi-objective optimization, MO)调度模型,在考虑电动汽车同时作为负荷和发电单元,且计及热电联产制热收益的基础上,并采用 NSGA-II 多目标优化算法进行求解,求解出 24 h 内优化调度方案,并与单目标优化算法进行对比,说明了模型的科学性和调度策略的经济性。

1 风—光—热—储混合微网数学模型

1.1 微源数学模型

1.1.1 电动汽车模型

文中为 EV 运行提供能量的为超级电容器,忽略超级电容的自放电率,那么 EV 储能单元的模型为

$$S = \frac{Q}{Q_N} = \frac{C(U_C - U_{\min})}{C(U_{\max} - U_{\min})} = \frac{U_0 + \frac{1}{C} \int_0^t I_C dt - U_{\min}}{U_{\max} - U_{\min}} \quad (1)$$

EV 中储存的能量为

$$W = \frac{1}{2} C (U_{\max}^2 - U_{\min}^2) \quad (2)$$

式(1)-(2)中: S 为 EV 充放电后的剩余电量; Q 为超级电容存储的实际电荷量; Q_N 为超级电容存储的最大电荷量; $U_{\max}$ 、 $U_{\min}$ 分别为超级电容器最高工作电压和最低工作电压; U_0 为超级电容器初始电压; I_C 为充放电电流。

1.1.2 微型燃气轮机模型

微型燃气轮机^[12]数学模型为

$$Q_{MT}(t) = P_e(t) [1 - h_e(t) - h_l] / h_e(t) \quad (3)$$

式(3)中: $Q_{MT}(t)$ 为 t 时刻燃气轮机余热量; $P_e(t)$ 为 t 时刻燃气轮机输出的电功率; $h_e(t)$ 为 t 时刻燃气轮机的发电效率; h_l 为 t 时刻燃气轮机的散热损失系数。

$$Q_{he}(t) = Q_{MT}(t) K_{he} \quad (4)$$

式(4)中: $Q_{he}(t)$ 为 t 时刻燃气轮机烟气余热供给的制热量; K_{he} 为溴冷机制热系数。

$$V_{MT} = \sum [P_e(t) \Delta t / (h_e(t) L)] \quad (5)$$

式(5)中: V_{MT} 为燃气轮机消耗的天然气的量; Δt 为燃气轮机的运行时间; L 为天然气低热值,取为 $9.7 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。

微型燃气轮机的燃料成本计算方式为

$$C_{MT} = (C_{nl}/L) \sum [P_e(t) \Delta t / (\eta_e(t))] \quad (6)$$

式(6)中: C_{MT} 为燃气轮机燃料成本; C_{nl} 为天然气价格,文中取 $0.5 \text{ \$/m}^3$ 。

光伏电池模型见文[13-14],风力发电机模型参见文[15],燃料电池和蓄电池模型参见文[16-18]。

1.2 目标函数的建立

1.2.1 运行成本函数

文中采用常规的日前调度模型,目标函数为微网一天内发电成本 F_1 微网运行的总成本,包括安装成本、运行维护成本、燃料成本与外网购售电成本;同时实现污染物排放最小 F_2 ^[14]。

$$\min F_1 = \sum_{i=1}^{T_1} \sum_{j=1}^N [(C_i^{\text{Install}} + C_{i,j}^{\text{OM}} + C_{i,t}^{\text{Fuel}}) + C_{i,t}^{\text{Grid}}] \quad (7)$$

式(7)中: F_1 微网运行的总成本; C_i^{Install} 为第 i 种分

布式发电单元的安装费用; C_i^{OM} 为第 i 种分布式发电单元的运行维护费用; C_i^{Fuel} 为第 i 种分布式发电单元的所用燃料费用; $C_{i,t}^{\text{Grid}}$ 为微网与大电网之间交换功率的费用; N 为分布式发电单元的装机总数。

1)安装成本为

$$C_i^{\text{Install}}=R_i^{\text{Install}} \times S_i \quad i=1, \dots, N. \quad (8)$$

式(8)中: R_i^{Install} 为第 i 种分布式发电单元的单位安装成本,元/kW; S_i 为第 i 种分布式发电单元的初始安装容量,kW。

2)运行维护成本为

$$C_{i,t}^{\text{OM}}=R_{i,t}^{\text{OM}} \times P_{i,t} \quad i=1, \dots, N; t=1, \dots, T_i. \quad (9)$$

式(9)中: $R_{i,t}^{\text{OM}}$ 为第 i 台分布式发电单元的单位运行维护费用,元/(kW·h); $P_{i,t}$ 为第 i 台分布式发电单元单位时间,1 h 发电量或蓄电池单位时间充放电功率,kW。

3)燃料成本为

$$C_{i,t}^{\text{Fuel}}=R_{i,t}^{\text{Fuel}} \times P_{i,t} \quad i=1, \dots, N; t=1, \dots, T_i. \quad (10)$$

式(10)中: $R_{i,t}^{\text{Fuel}}$ 为第 i 台分布式发电单元的单位燃料费用,元/(kW·h),可再生能源分布式发电单元由于不需要使用燃料,该项取 0。

4)与外电网购售电成本为

$$C_{i,t}^{\text{Grid}}=R_{\text{Grid},t} \times P_{\text{Grid},t} \quad t=1, \dots, T_i. \quad (11)$$

式(11)中: $R_{\text{Grid},t}$ 为 t 时间段内外电网的实时电价; $P_{\text{Grid},t}$ 为 t 时间段内微网与外电网交互电量,当微网向外电网购电时取正,当微网向外电网售电时取负。

1.2.2 最小化污染物排放

$$\min F_2 = \sum_{t=1}^{T_i} \left[\sum_{j=1}^W \mu_j \left(\sum_{i=1}^N K_{ij} P_{i,t} + K_{\text{Grid},j} P_{\text{Grid},t} \right) \right]. \quad (12)$$

式(12)中: F_2 为污染物处理费用; μ_j 为第 j 种污染物(CO_2 、 SO_2 、 NO_x)处理费用; K_{ij} 为第 i 个分布式发电单元第 j 类污染物排放系数; $K_{\text{Grid},j}$ 为大电网第 j 类污染物排放系数,可再生能源分布式发电单元不存在污染物排放,该项取 0。

1.2.3 综合考虑经济和环境效益

将运行成本 F_1 和污染物治理费用 F_2 进行加权,可把 F_1 、 F_2 多目标问题转化为单目标 F_3 问题来求解。

$$\min F_3 = w F_1 + (1-w) F_2 \quad (13)$$

式(13)中, w 为权重系数, $0 \leq w \leq 1$,可以根据设计者的偏好进行调整。

1.3 约束条件

1.3.1 等式约束

1)有功功率平衡约束为

$$\sum_i P_{i,t} + P_{\text{SB},t} + P_{\text{Grid},t} - P_{\text{Load},t} = 0 \quad t=1, \dots, T_i. \quad (14)$$

式(14)中: $P_{i,t}$ 为 t 时刻第 i 种分布式发电单元出力; $P_{\text{Grid},t}$ 为 t 时刻微网与外电网交换功率; $P_{\text{Batt},t}$ 为 t 时刻蓄电池放(充电)电量,放电取正,充电取负; $P_{\text{Load},t}$ 为 t 时刻负荷; T_i 是仿真优化总时长。

2)蓄电池一次充放电电量约束为

$$\text{SOC}_t - P_{\text{Batt},t} / \text{BAT}_{\text{cap}} = \text{SOC}_{t+1} \quad t=1, \dots, T_i. \quad (15)$$

式(15)中: SOC_t 为蓄电池第 t 时的值; BAT_{cap} 为蓄电池总容量。

1.3.2 不等式约束

1)发电机输出功率约束为

$$P_{i,t}^{\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,t}^{\max} \quad i=1, \dots, N; t=1, \dots, T_i. \quad (16)$$

式(16)中, $P_{i,t}^{\max}$ 、 $P_{i,t}^{\min}$ 为第 i 种分布式发电单元 t 时刻出力的上、下限。

2)蓄电池运行约束为

$$P_{\text{SB},\min} \leq P_{\text{SB}}(t) \leq P_{\text{SB},\max}; \quad (17)$$

$$-S_{\text{inv},\text{SB}} \leq P_{\text{SB}}(t) \leq S_{\text{inv},\text{SB}}. \quad (18)$$

式(17)–(18)中: $P_{\text{SB},\min}$ 为蓄电池最小有功功率; $P_{\text{SB},\max}$ 为蓄电池最大有功功率; $S_{\text{inv},\text{SB}}$ 为逆变器容量。

3)电动汽车充放电约束为

$$P_{\text{EV},\min} \leq P_{\text{EV}}(t) \leq P_{\text{EV},\max}; \quad (19)$$

$$-S_{\text{inv},\text{EV}} \leq P_{\text{EV}}(t) \leq S_{\text{inv},\text{EV}}. \quad (20)$$

式(19)–(20)中: $P_{\text{EV},\min}$ 为蓄电池最小有功功率; $P_{\text{EV},\max}$ 为蓄电池最大有功功率; $S_{\text{inv},\text{EV}}$ 为逆变器容量。

4)微网允许与外网交互功率约束

$$P_{\text{Grid},t}^{\min} \leq P_{\text{Grid},t} \leq P_{\text{Grid},t}^{\max} \quad (21)$$

式(21)中, $P_{\text{Grid},t}^{\min}$ 、 $P_{\text{Grid},t}^{\max}$ 为 t 时间段内微网与外电网交互功率上、下限。

2 微网调度策略以及算法

2.1 微网 24 h 优化调度策略

为实现并网模式下微网经济运行,不仅要考虑微网内各个微源的出力分配和电能调度并且要考虑微网与大电网之间的功率交互。通过混合储能系统的充放电,可以抑制由光照和风速等因素引起的光伏发电和风力发电功率的波动。在实现微网满足热、电负荷需求,电能质量可靠性和经济性及基础上,尽可能减少发电成本并使污染最小化。

文中采取的调度策略如下:

1)优先利用微网内部的风电(WT)、光伏(PV)发电等清洁能源来满足微网内负荷需求并且能与主网进行自由功率交换。

2)WT 和 PV 发电工作于最大功率点跟踪模式。

3)热电联产系统(MT)工作在以热定电运行方式,由热负荷确定 MT 的有功出力。

4)当 WT、PV 和 MT 的有功出力满足全部电负

荷时,首先给电动汽车(EV)和蓄电池(SB)充电,同时监测蓄电池的充放电状态,其次再给燃料电池(FC)进行充电,当EV充满时可以考虑依次切除部分发电成本较高的WT或PV。

5)EV 根据通过不同时段充放电控制提高微网效益,当微网电量充足时可以向EV 随意充电;当微网电源不足向主网购电时,出于经济性和稳定性考虑,EV 不允许充电,EV 可以将剩余的电量卖给微网。

6)当 WT、PV 和 MT 的有功出力无法满足微网所有负荷时,优先选择蓄电池来放电,如仍存在有功缺额则再调用 FC 来输出有功功率,在此期间 EV 用户可以将车内剩余电量卖给微网从而获取收益。

7)若所有微源在出力范围内仍不能满足微网安全可靠运行,则按照负荷的重要程度依次切除^[9]。

利用上述的优化调度策略确定各个微源的出力、微网与EV 之间的交互功率以及微网与大电网之间的交换功率,与下述的NSGA-II 算法相结合,共同对微网数学模型进行求解。

2.2 NSGA-II 多目标优化算法

NSGA-II 是一种启发式多目标优化算法,由NSGA 算法改进。在近10年中,NSGA-II 多目标优化算法已经在工程实际中广泛运用,的优点主要有:

1)提出了一种快速非支配排序算法,减少了计算复杂度。此外,它使亲本群体和后代种群组合,并且下一代的种群是从双空间中选择,从而保留了最为优秀的所有个体。

2)精英策略的引入,以确保在进化过程中的个体的某些良好的人口不会被丢弃,从而提高优化结果的准确性。

3)由于NSGA 中需要由人工指定共享参数,所以NSGA-II 采用一种新的方法,即拥挤度和拥挤度比较算子,并将其指定为种群中个体间的比较标准;通过此方法,使得整个Pareto 域均匀的分布了准Pareto 域中的个体,提高了种群的多样性和个体丰富程度。

2.2.1 NSGA-II 多目标优化原理

NSGA-II 多目标优化原理流程图见图1。

NSGA-II 的具体过程描述如下:

1)随机产生初始种群 P_0 ,接着对种群进行非劣排序,将秩赋予给每个个体;再对初始种群执行二进制锦标赛选择、交叉和变异,得到新的种群 Q_0 ,令 $t=0$ 。

2)形成新的群体 $R_t=P_t \cup Q_t$,对种群 R_t 进行非劣排序,获得非劣前端 $F_1, F_2, \dots$ 。

3)对全部 F_i 按拥挤比较操作 $<_n$ 进行排序,并选择最佳的 N 个体形成种群 P_{t+1} 。

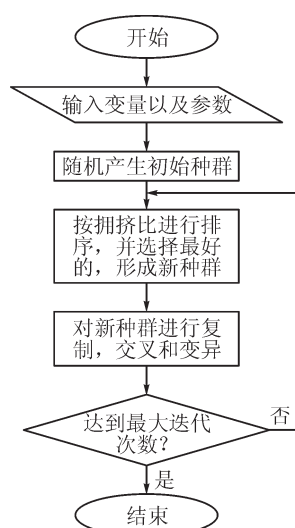


图1 NSGA-II 多目标优化原理的流程图

Fig. 1 Flow chart of NSGA - II MO principle

4)对种群 P_{t+1} 执行复制、交叉和变异,形成种群

Q_{t+1} 。

5)如果终止条件成立,则结束;否则, $t=t+1$,转到过程2)。

3 算例分析

3.1 微网基础结构以及算例数据

文中的算例采用的微网结构见图2。

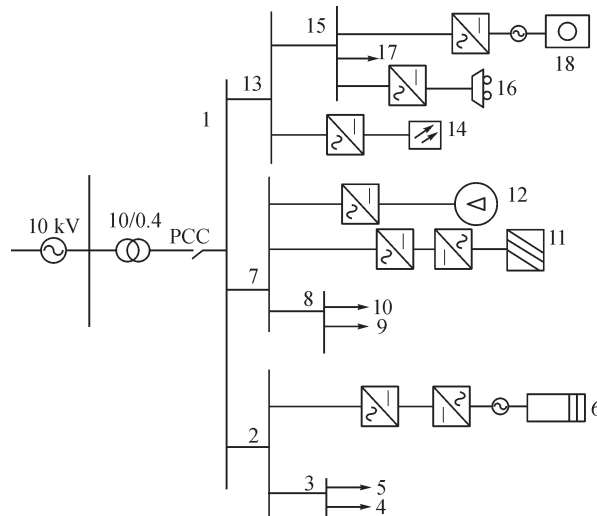


图2 微网系统结构图

Fig. 2 Diagram of microgrid system

图(2)中,微网由工业负荷(4)、热电负荷(5)、微型燃气轮机 MT(6)、居民负荷(9)、商业负荷(10)、风力发电机 WT(11)、蓄电池 SB(12)、光伏电池 PV(14)、电动汽车 EV(16),允许中断负荷(17)和燃料电池(18)等组成,且微网处于并网模式运行状态。蓄电池额定容量为 500 kW·h,放电深度为 50%~75%时充电为最佳,因此初始电量设置为 60%,充放电效率为 1,忽略自放电,蓄电池的逆变器容量为 40 kVA;燃料电

池的逆变器容量为 30 kVA;电动汽车的功率上、下限分别设为 30 kW、-30 kW,其逆变器容量为 30 kVA;燃料电池工作于以热定电,因此它与微型燃气轮机发出功率呈线性关系,制热收益为 0.12 元/(kW·h);用电峰时为 8:00-20:00,用电谷时为 20:00-8:00。

微网中日电负荷以及日热负荷情况见图 3;各个分布式电源参数见表 1;各个微源的安装成本和电量成本见表 2;间隙性发电微源 PV、WT 的有功功率曲线见图 4;各个微源污染物的排放数据见表 3^[20];污染物价值标准、罚款等级参见文[21]。

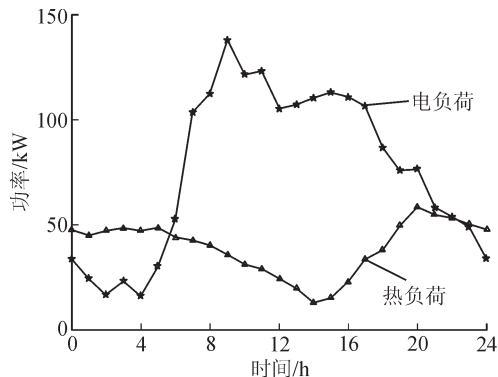


图 3 微网中热负荷和电负荷的情况

Fig. 3 Heating loads and electric loads of microgrid

表1 各微源的基本参数

Table 1 Basic parameters of various microsources

电源类型	寿命/年	功率下限/kW	功率上限/kW
微型燃气轮机	8	4	40
燃料电池	15	5	35
光伏电池	20	0	20
风机	15	0	25
储能	10	-50	50

表2 各微源的安装成本和电量成本

Table 2 Costs of micro-source installation and power

技术类型	发电规模/kW	安装投资成本/(\$·(kW·h) ⁻¹	电量成本/(\$·(kW·h) ⁻¹
传统火力发电	—	—	0.045
微型燃气轮机	50~5 000	200~800	0.055~0.100
风力机组	20~2 000	1 000~1 500	0.055~0.150
微透平机组	25~75	1 000~1 500	0.075~0.100
燃料电池	5~2 000	3 000~4 000	0.100~0.150
太阳能电池	1~100	1 500~6 500	0.150~0.200

3.2 优化结果与分析

3.2.1 文中含电动汽车混合储能系统的微网与常规微网的比较

以经济成本和环境成本为目标,对上述微网进行优化。热负荷—电功率曲线见图 5,蓄电池 SOC 见图 6。由图 5、6 可见,24:00-8:00 时微网的负荷还比较轻,分布式电源将剩余的电能给蓄电池(SB)充电;在 8:00-20:00,微网中存在有功缺额,PV、WT

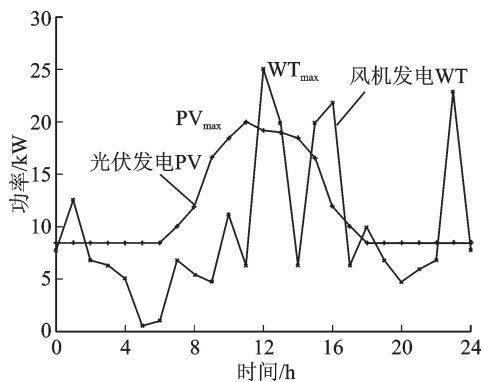


图 4 PV 和 WT 的输出功率

Fig. 4 Output power of PV and WT

表3 各个微源污染物的排放数据

Table 3 Emission data of of micro-source pollutants

		g/(kW·h)			
发电方式		NO _x	CO ₂	CO	SO ₂
传统发电方式	煤炭发电	0.154 70 ~3.093 83	86.472 50	—	0.108 30 ~3.944 60
	天然气发电	0.007 70 ~1.546 90	49.037 20	—	0.464 10
	残余燃料油	0.007 70 ~1.546 90	72.395 60	—	—
分布式发电	微型燃气轮机	0.618 80	184.082 90	0.170 20	0.000 93
	内燃机(燃气)	4.795 40	170.160 70	1.222 10	0.023 20
	内燃机(柴油)	4.331 40	232.037 30	2.320 40	0.464 10
	燃料电池	<0.025 00	635.040 00	0.054 50	0
	光伏发电	0	0	0	0
	风能发电	0	0	0	0

和 MT 的出力不能满足微网中的负荷需求,这时调用 SB 放电,保证微网电能质量;在 8:00-15:00,SB 能满足微网中的负荷需求,可以减少调用 FC 的有功出力。在 20:00-6:00,SB 进行充电,由于 FC 的环境成本较低,优先调用 FC 提供有功功率。FC 工作于以热定电模式,因此与 WT 发出功率呈线性关系。

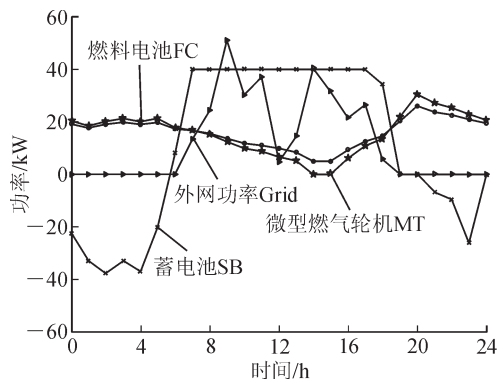


图 5 热负荷—电功率曲线

Fig. 5 Curves of heat load and electric power

无电动汽车(EV)的电池储能系统功率曲线见图 7。由图 7 可见,SB 和 FC 作为后备电源情况下,从 6:00-18:00,SB 满容量向微网发送功率,18:00-6:00,

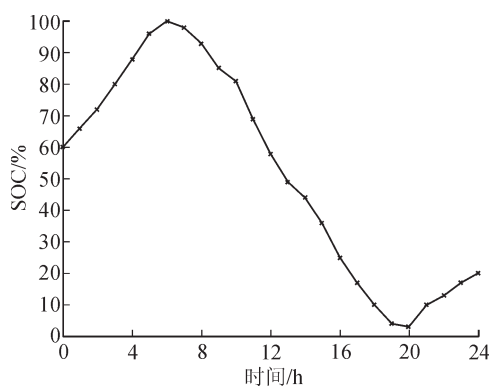


图6 蓄电池SOC曲线

Fig. 6 Curve of battery SOC

微网中负荷较轻,SB处于充电模式,而FC加大放电量。在7:00–17:00,SB和FC无法满足微网中的有功缺额,需要从小网购电来满足微网功率缺额。

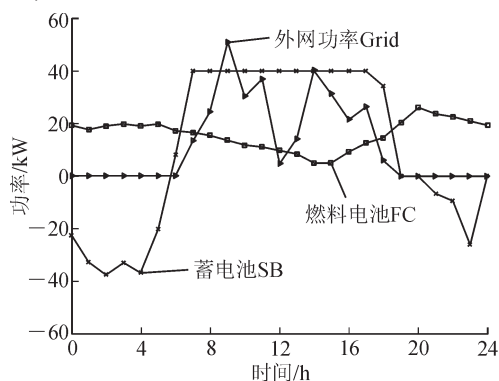


图7 电池储能系统功率曲线

Fig. 7 Curve of battery energy storage system power

含电动汽车(EV)及电池混合储能系统功率曲线见图8。由图8可见,SB、FC与EV共同作为后备电源是,电池系统与EV二者相互配合使微网中的功率更为平缓;并且在微网出现有功缺额时,减少了微网从小网中的购电量,提升了微网的经济效益。同时,EV在微网出现有功功率短缺时可以向微网售电,当微网中功率充足时有进行充电,很好的起到了一个“削峰填谷”的作用。

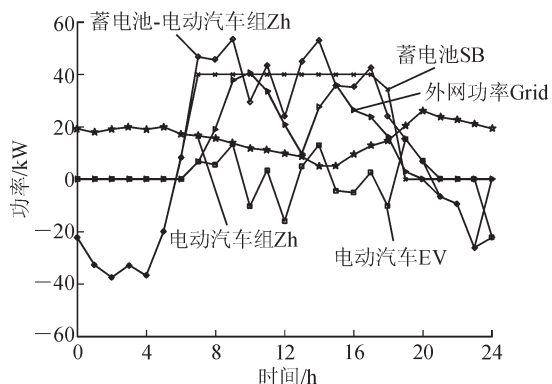


图8 含电动汽车及电池混合储能系统功率曲线

Fig. 8 Curve of including hybrid electric vehicles and battery energy storage system power

并网模式下微网优化结果见图9。并网模式下微网调度结果见图10。由图9、10可见,PV、WT、SB和EV的电量成本是比较低的,微网应优先调用无污染的PV和WT来满足所需功率;由于FC的电量成本明显高于SB,因此应优先调用SB,同时EV用户可向微网输送功率,这样可以减少SB的充放电次数,延长SB寿命,当微网出现有功缺额时可再调用FC;WT成本最高、对环境污染最大,应最后考虑调用。

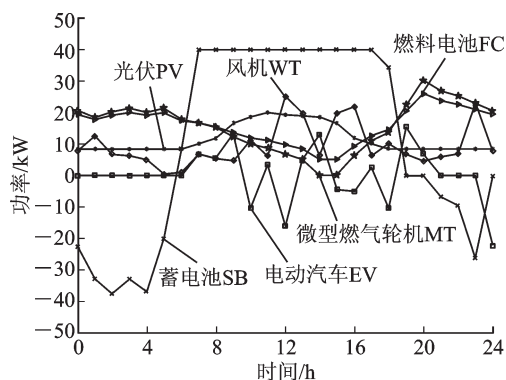


图9 并网模式下微网优化结果

Fig. 9 Optimal results of microsources in grid-connected modes

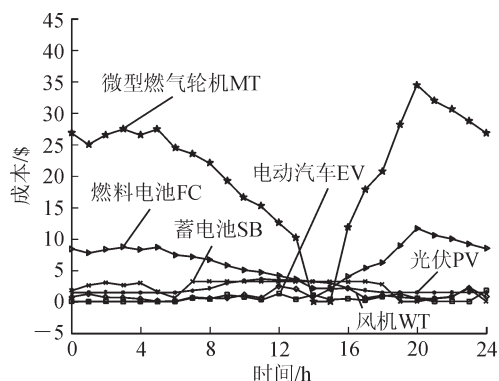


图10 并网模式下微网调度结果

Fig. 10 Dispatch results of microsources in grid-connected modes

并网模式下微网内各微源出力的优化结果见图11。由图11可见,PV和WT工作于最大功率点跟踪模式;由于SB放电深度为50%~75%是充电最佳,从7:00–18:00,SB的放电模式保持在75%;6:00–18:00,EV用户根据微网负荷情况向微网进行售卖电;在24:00–7:00和18:00–24:00,微网中负荷较轻,PV和WT在满足热、电负荷要求后向SB充电,SB处于充电模式;此时优先调用FC,再调用MT来满足有功缺额。在7:00–18:00,微网中用电量大幅上升,SB处于放电模式,EV用户也向微网输送电能,减少FC和MT的出力。

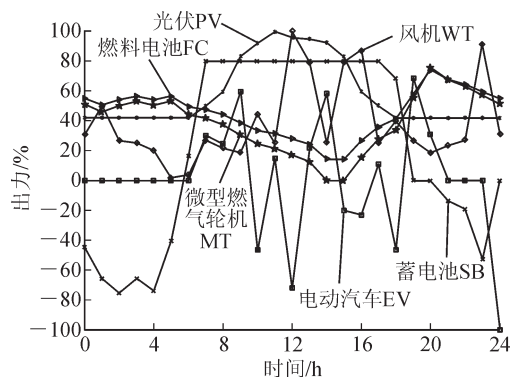


图 11 并网模式下微网各微源出力

Fig. 11 Each microsources' output in grid-connected modes

3.2.2 NSGA-II 多目标优化算法与 GA 单目标优化算法比较

为了说明采用 NSGA-II 多目标优化算法的优势,文中将它与传统的 GA 单目标优化算法进行比较。

首先,采用 NSGA-II 多目标优化算法对微网进行优化,对运行成本目标函数 F_1 和环境成本目标函数 F_2 的多目标问题进行求解。最大迭代次数为 200,种群规模为 500,交叉概率为 0.9,变异概率为 0.1。

其次,再用单目标 GA 算法对合成目标函数进行求解。将运行成本目标函数 F_1 和环境成本目标函数 F_2 合成为单目标函数 F_3 ,在合成目标函数 F_3 中,权重系数 w 取为 0.8。

采用 NSGA-II 算法对微网进行优化,求得运行成本费用和环境成本费用为目标的 Pareto 最优解集合见图 12。部分 Pareto 最优解见表 4。

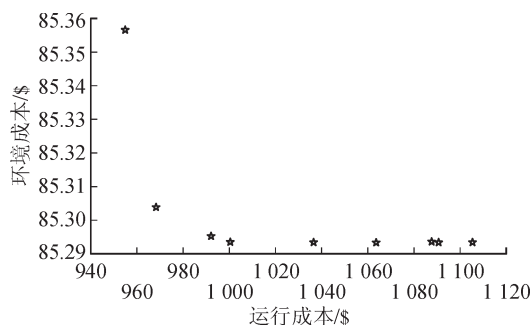


图 12 Pareto 最优解分布

Fig. 12 Pareto optimal distribution

表 4 多目标成本花费结果

Table 4 Results of multi-objective optimal				\$
序号	运行成本费用	环境成本费用	总费用	
1	955	86.357	1 042.357	
2	968	85.306	1 053.306	
3	1 002	85.293	1 087.293	

NSGA-II 多目标优化算法考虑了多方面的因素,包括运行成本和环境成本,这更为合理和符合

实际。对于多目标优化的解集,决策者可以根据当时的具体的情况,包括国家政策、发电成本、环境情况等,选择合适的运行方案。因此,其方案选择具有很大的灵活性。

当合成为单目标函数时,使用单目标 GA 算法进行优化仿真。GA 单目标优化结果见表 5,它综合考虑的运行成本和环境成本。

表 5 单目标优化结果

Table 5 Results of single objective optimal				\$
w 取值	运行成本费用	环境成本费用	总费用	
0.9	1 057.37	158.18	1 215.55	
0.8	1 076.27	163.46	1 239.73	
0.7	1 109.81	168.33	1 278.14	

通过 NSGA-II 多目标优化算法和 GA 单目标优化算法的优化结果可知,多目标直接优化后所需总费用为 1 000 多元,而单目标求解后的总费用为 1 200 多元,多目标优化的解明显优于单目标。这说明 NSGA-II 多目标优化搜索得到 Pareto 前端解更加接近真实的 Pareto 前沿,并且有更好的宽广性。此外,在 NSGA-II 的 Pareto 前沿中,非支配解分布非常均匀。因此,NSGA-II 多目标优化算法具有更好的收敛性和多样性。

4 结语

文中建立了一个以包含光伏、风机、燃料电池、蓄电池、电动汽车、微型燃气轮机以及计及热负荷的一个微网实例,提出了并网模式下的微网调度策略。通过与蓄电池储能系统的对比,含电动汽车的混合储能系统不仅减少了蓄电池的充放电次数,延长了蓄电池的运行寿命,并且电动汽车在微网中起到了“削峰填谷”的作用,提高了系统的经济性和环保性。此外,在考虑了多种约束条件下,使用算法对处于并网模式运行下的含电动汽车的微网算例进行优化调度,使得微网的经济效益和环境效益达到最优,在多个目标中求得了最优解集。另外,本文还采用单目标 GA 算法对同一例子进行优化去求解,把 NSGA-II 多目标优化算法和 GA 单目标优化算法的两种算法优化结果进行比较,并得出 NSGA-II 算法比传统 GA 算法有更好的可行性和灵活性。

从长远考虑,储能系统容量的优化配置也可列入调度计划之内。此外,仿真模型的拓展以及对于电动汽车充放电的规划具体安排都可以作为进一步的研究内容。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京:中国电力出版社,

2015.
LIU Zhenya. Global energy internet[M]. Beijing:China Electric Power Press, 2015.
- [2] ARUMUGAM M S, RAOM V C, PALANLAPPAN R. New hybrid genetic operators for real coded genetic algorithm to compute optimal control of a class of hybrid systems[J]. Applied Computing, 2005, 6(1):38-52.
- [3] 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, 31(4): 7-14.
DING Ming, ZHANG Yingyuan, MAO Meiqin, et al. Economic operation optimization for microgrids including Na/S battery storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4):7-14.
- [4] DENG Q, GAO X, ZHOU H. System modeling and optimization of microgrid using genetic algorithm[C]//The 2nd International Conference on Intelligent Control and Information Processing. Haerbin: [s.n.], 2011, 540-544.
- [5] 茆美琴, 孙树娟, 苏建徽. 包含电动汽车的风/光/储微网经济性分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14):30-35.
MAO Meiqin, SUN Shujuan, SU Jianhui. Economic analysis of a microgrid with wind/ photovoltaic/ storages and electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14):30-35.
- [6] 洪博文, 郭力, 王成山, 等. 微网多目标动态优化调度模型与方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 33(3):100-106.
HONG Bowen, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Model and method of dynamic multi-objective optimal dispatch for microgrid[J]. Automation of Electric Power system, 2013, 33(3):100-106.
- [7] FARHANGI H. The path of the smart grid[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2010, 8(1):18-28.
- [8] 王新刚, 艾芊, 徐伟华. 含分布式发电的微网能量管理多目标优化[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(20):79-83.
WANG Xingang, AI Qian, XU Weihua. Multi-objective optimal energy management of microgrid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(20):79-83.
- [9] 丁明, 张颖媛, 茆美琴, 等. 集中控制式微网系统的稳态建模与运行优化[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(24): 78-82.
DING Ming, ZHANG Yingyuan, MAO Meiqin, et al. Steady model and operation optimization for microgrids under centralized control[J]. Automation of Electric Power system, 2009, 33(24):78-82.
- [10] 陈洁, 杨秀, 朱兰, 等. 基于遗传算法的热电联产型微网经济运行优化[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8):7-15.
CHEN Jie, YANG Xiu, ZHU Lan, et al. Genetic algorithm based economic operation optimization of a combined heat and power microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8):7-15.
- [11] 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.
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.
- [12] 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.
CHEN Jie, YANG Xiu, ZHU Lan, et al. Microgrid multi-objective economic dispatch[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19):57-66.
- [13] DUAN L Y, YU X D, XU M, et al. Foreground segmentation using motion vectors in sports video[C]//PCM 2002. Berlin: Springer-Verlag, 1999: 751-758.
- [14] 苏玲, 张建华, 王利, 等. 微网相关问题及技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 235-239.
SU Ling, ZHANG Jianhua, WANG Li, et al. Study on some key problems and technique related to microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19):235-239.
- [15] 陈道君, 龚庆武, 张茂林, 等. 考虑能源环境效益的含风电场多目标优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(13): 10-17.
CHEN Daojun, GONG Qingwu, ZHANG Maolin, et al. Multi-objective optimal dispatch in wind power integrated system incorporating energy-environmental efficiency[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(13):10-17.
- [16] 李正茂, 张峰, 梁军, 等. 计及附加机会收益的冷热电联供型微网动态调度[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(14):8-15.
LI Zhengmao, ZHANG Feng, LIANG Jun, et al. Dynamic scheduling of CCHP type of microgrid considering additional opportunity income[J]. Automation of Electric Power System, 2015, 39(14):8-15.
- [17] 苏粟, 蒋小超, 王玮, 等. 计及电动汽车和光伏储能的微网能量优化管理[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 165-171.
SU Su, JIANG Xiaochao, WANG Wei, et al. Optional energy management for microgrids considering electric vehicles and photovoltaic-energy storage[J]. Automation of Electric Power System, 2015, 39(9):165-171.
- [18] 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.
LIU Xiaoping, DING Ming, ZHANG Yingyuan, et al. Dynamic economic dispatch for microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31):77-84.
- [19] 李乐. 微网的经济运行研究[D]. 北京:华北电力大学, (下转第 157 页)

- (12):150-159.
- [16] HARNFORS L,JIANG-HAFNER Y,HYTTINEN M,et al. Ride-through methods for wind farms connected to the grid via a VSC-HVDC transmission[C]//Proceedings of 4th Nordic Wind Power Conference. Roskilde,Denmark: NWPC,2007: 145-149.
- [17] FELTES C,WREDE H,KOCH F W,et al. Enhanced fault ride-through method for wind farms connected to the grid through VSC-based HVDC transmission[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2009,24(3):1537-1546.
- [18] 章心因,胡敏强,吴在军,等. 基于 VSC-HVDC 的风力发电系统低电压穿越协调控制[J]. 电力自动化设备,2014,34(3):138-143.
- ZHANG Xinyin,HU Minqiang,WU Zaijun,et al. Coordinated LVRT control of wind power generation system based on VSC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(3):138-143.
- [19] GUAN M,XU Z. Modeling and control of a modular multi-level converter-based HVDC system under unbalanced grid conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2012,27(12):4858-4867.
- [20] 徐政,肖晃庆,张哲任. 模块化多电平换流器主回路参数设计[J]. 高电压技术,2015,41(8):2514-2527.
- XU Zheng,XIAO Huangqing,ZHANG Zheren. Design of main circuit parameters of modular multilevel converters[J]. High Voltage Engineering,2015,41(8):2514-2527.
- [21] 张静. VSC-HVDC 控制策略研究[D]. 杭州:浙江大学,2009.
- ZHANG Jing. On control strategies for VSC-HVDC[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2009.
- 于洋(1991—),男,硕士研究生,主要研究方向为直流输电与风力发电。
- 徐谦(1963—),男,高级工程师,主要研究方向为电力系统规划和运行。
- 杨升峰(1986—),工程师,主要研究方向为电力系统规划和运行。
- 徐政(1962—),男,教授,博士,研究方向为大规模交直流电力系统分析,直流输电与柔性交流输电,电力谐波与电能质量,风力发电技术与风电场并网技术。

(上接第 149 页)

- 2011.
- LI Le. Study of economic operation in microgrid[D]. Beijing:North China Electric Power University,2011.
- [20] 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.
- [21] 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.
- QIAN Kejun,YUAN Yue,SHI Xiaodan,et al. Environmental benefits analysis of distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(29):11-15.
- 黄山(1992—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统自动化、微网优化与运行等。
- 程启明(1965—),男,教授,硕士研究生导师,研究方向为电力系统自动化、发电过程控制、先进控制及应用等。
- 张强(1989—),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统自动化、电力系统自动化、微网优化与运行等。
- 褚思远(1990—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统自动化、电力系统自动化、微网测量与控制等。
- 杨小龙(1988—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统自动化、电力系统自动化、微网测量与控制等。