

考虑电动汽车用户响应的微电网运行优化

刘延博, 邱晓燕, 邱高

(四川大学电气信息学院智能电网四川省重点实验室, 成都 610065)

摘要:文中针对大规模电动汽车(EVs)接入微电网的分布式能源(DER)出力优化进行了研究。在(EVs)无序充电模型的基础上,提出了基于峰谷负荷的分段电价模型,考虑行驶需求时间共同影响,建立了EVs接入微电网的完全响应行为模型。对负荷进行分类建模,提出基于响应权重的常规负荷电价响应模型,并建立了基于经济成本权重的综合效益优化模型。在典型微电网中,通过改进遗传算法,在不同调度控制策略下计算得到系统的优化出力结果。通过对比不同模型下的出力结果,验证所提模型的正确性和有效性。

关键词:电动汽车;完全响应;经济成本权重;微电网;运行优化

Optimal Operation of Micro Grid Account of the Response of Electric Vehicle User

LIU Yanbo, QIU Xiaoyan, QIU Gao

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Intelligent Electric Power Grid Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610065, China)

Abstract: The paper has studied on the optimal power flow of Distributed Energy Resource (DER) in the micro grid which is connected with amounts of Electric Vehicles (EVs). On the basis of Electric Vehicles' disordered charging model, the paper proposes a divided electricity prices model based on peak-valley load. Taking into account of the combined effect of time-travel demand, a fully responsive behavior model of EVs into micro grid is established. Classifying the load model, the electricity prices of normal load is proposed based on the response weight. Then a composite model is built on the basis of economic cost weight. In a typical micro grid, using improved genetic algorithm, the optimal power under different scheduling control methods is calculated. By comparing the results of different model outputs, the correctness and validity of the proposed model is verified.

Key words: electric vehicle; complete response; economic cost weight; micro grid; operation optimization

0 引言

电动汽车(EV)在需求侧的快速增长,有效解决了能源危机和环境污染等两大难题,各国政府在大力发展电动汽车行业的同时,出台了各种相关政策对电动汽车行业进行大力支持。美国率先出台EV工程政策,能源部免费为EVs用户安装充电桩,以此来推广电动汽车的在居民生活中的使用频率^[1]。电动汽车快速增长带来的直接问题是增加了电网的负荷量,在配电侧和微电网层面,大量电动汽车接入电网带来的问题不可忽视^[2]。

微电网是计及各种分布式电源(DER)、储能系统(ESS)及负荷于一体的可控单元,微电网的快速发展很好地解决了分布式设备并网带来的一系列问题。各类蓄电池储能系统在微电网内的广泛应用使得微电网自主性得到提高、供电更加可靠^[3-4]。文[3]中在对钠硫电池脉冲因数特性分析的基础上,对含钠硫电池储能系统的微电网的经济最优性做出了研究;文[5]中基于经济运行成本权重,对含钒电池储能系统的微电网的负荷进行出力优化分配。以上文献均在运行成本和经济效益上对微电网进行了研究,没有对需求侧的负荷变化做出考虑。

大量EV负荷接入微电网,使微电网的经济性研究已经从单纯考虑微源特性到考虑微源和负荷

收稿日期:2015-11-07; 修回日期:2015-12-08

基金项目:四川省科技支撑项目(2014JY0191)。

Project Supported by Science and Technology Project of Sichuan Province(2014JY0191).

双重特性上来。文[6-7]中建立了 EVs 随机充电和错峰充电模型,考虑 EVs 行驶里程对 V2G 模式的影响,建立了在包含 EVs 微电网的优化调度模型;文[8]中引入概率密度函数,考虑了时空特性对 EVs 进行了建模,并分别计算了在并网和孤岛运行条件下的含 EVs 的微电网的调度优化出力。电动汽车在微电网中的充电方式通常有无序充电模型和调度策略引导充电模型,文[9]中提出了基于遗传算法、以峰谷差率最小为目标的峰谷电价时段优化方法;文[10]中以博弈论为基础,提出 EVs 充电负荷的协调控制方法。以上文章充分考虑 EVs 在微电网中的充放电模型,但未对微电网的所有负荷进行分类建模。

文中研究了电动汽车无序接入微电网以及分段电价和行驶需求时间共同影响的 EVs 充电响应行为,引入用户响应权重,对需求侧的负荷进行分类响应建模,对扩展的分时电价进行了电价优化建模。将用户侧的响运用至微电网的运行优化模型中,并引入经济成本权重,在不同控制策略下对算例进行了仿真分析,比较了不同优化倾向下的系统出力策略。

1 电动汽车充电响应模型

1.1 电动汽车无序充电模型

EVs 无序充电时刻服从正态分布的概率密度函数^[7-8]为

$$f_s(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t_{sc}-\mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right] & \mu_s - 12 < t_{sc} \leq 24 \\ \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t_{sc}+24-\mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right] & 0 < t_{sc} \leq \mu_s - 12 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: $\mu_s=17.6$; $\sigma_s=3.4$; t_{sc} 为起始充电时刻。计及 EVs 电池寿命和充放电损耗的有效充电时长为

$$t_{cha} = \eta C_{max} / P_{cl} \quad (2)$$

式(2)中: C_{max} 为电池的容量; P_{cl} 为 EVs 充放电功率; η 为电池有效荷电量百分比。

1.2 基于峰谷负荷的 EVs 分段电价模型

微电网内电价常用的建模方法有:考虑负荷峰谷值的峰谷分时电价模型^[11-13],计及供电方和购电方博弈理论的联动电价模型^[13]。

文中基于负荷峰谷时段的不同对 EVs 建立了以下分段电价模型。

$$f_{\lambda}^t = \begin{cases} \lambda_v & t_1 < t < t_2 \\ \lambda_p & t \leq t_1 \text{ 或 } t \geq t_2 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: λ_v 、 λ_p 分别为“谷”时段电价和“峰”时段电价; t_1 和 t_2 分别为“谷”时段开始时刻和结束时刻。

1.3 电动汽车用户响应分析

1.3.1 EVs 对峰谷电价比的响应行为

一般负荷的用户对网络电价的响应建模通常引入电量电价弹性矩阵^[14]或采用指数函数拟合的方法,文[8,15]中通过引入峰谷电价差,构建了由电价规律引导的 EVs 用户充电规律。

文中在式(3)分段电价模型的基础上,构建峰谷电价比 x 和 EVs 充电转移比例 β ,由额外购电支出约束的 EVs 充电转移比例模型可以归纳为

$$\beta = \begin{cases} \frac{c}{mP^t(\lambda_p - \lambda_v)} & x > b \\ 0 & 0 < x < a \\ \frac{(x-a)c}{mP^t(\lambda_p - \lambda_v)(b-a)} & a < x < b \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: $x=(\lambda_p - \lambda_v)/\lambda_0^t$, λ_0^t 为电网实施分段电价策略之前的原始分时电网电价; P^t 为 t 时段所有 EVs 用户的充电量需求; m 为额外电费支出影响因子; a 、 b 、 c 为与峰谷电价比相关的常数。

1.3.2 时间段对 EVs 行驶需求的影响

电动汽车用户在实际生活中其行驶需求还要受时间段的影响,文中将 EVs 用户的行驶总时间分为 3 个时段,分别为行驶高峰时段行驶低谷时段和一般行驶时段,考虑峰谷电价比和行驶时段的影响,即为 $\beta=f(x, t)$ 。

1.3.3 EVs 用户充电时间选择模型

将 EVs 用户的充放电选择行为分为两类,分别按照 EVs 无序充电模型和对峰谷电价比及时间进行完全行为的充电模型。EVs 无序充电模型为式(1)、(2)。

考虑峰谷电价比和时间段的影响,在行驶低谷时段 EVs 的起始充电时刻模型为

$$t_{s1} = \begin{cases} t_1 + \alpha(t_2 - t_{cha}) & 0 \leq t_{cha} < t_2 - t_1 \\ t_1 & t_{cha} > t_2 - t_1 \end{cases} \quad (5)$$

在行驶高峰时段 EVs 的起始充电时刻模型为

$$t_{s2} = t_2 \quad (6)$$

在行驶一般时段 EVs 的起始充电时刻模型为

$$t_{s3} = \omega_v t_{s1} + \omega_p t_{s2} \quad (7)$$

式(5)–(7)中: t_{s1} 、 t_{s2} 、 t_{s3} 、 t_{cha} 分别为不同时段 EV 充电开始时刻及充电持续时间; t_1 和 t_2 分别当前时刻和谷时段电价开始、结束时刻; α 为概率常数; ω_v 、 ω_p 分别为行驶低谷时段和行驶高峰时段 EV 的充电概率权重。

1.4 基于响应权重的常规负荷电价模型

文[16]中将 EVs 用户的充电行为分为有序充电

和无序充电行为,但未针对不同负荷特性进行分类。文中将微电网内负荷分为2类:电动汽车负荷及除电动汽车负荷以外的常规负荷。电动汽车电价建模按照以上提出的峰谷电价模型,对常规负荷的电价策略采取扩展分时电价模型^[17]。

文中考虑常规负荷中的大工业用户有较强的电价响应机制,对扩展分时电价进行优化,基于用户电价响应权重和响应系数的电价优化模型为

$$R = \begin{cases} a_1 \omega (\bar{p} - p_0')^{3.08} + p_0 & p' < 1 \\ a_2 \omega (p_0' - \bar{p})^{3.252} + p_0 & p' \geq 1 \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中: $\bar{p}$ 、 p_0' 分别为 t 时段常规负荷扩展实时电价标么值和原始电价; a_1 、 a_2 为常规负荷电价响应系数; ω 为大工业用户的电价响应权重。

2 考虑用户响应的微电网运行优化模型

2.1 微网并网运行清洁能源调度策略

微电网内的情节能源出力主要由风力发电机和光伏发电系统提供,其具有环境效益高和运行成本低的特点使得在中国发电侧有广泛的应用。但是清洁能源受天气影响使得其出力具有不确定性,可控制性较差,较难实现计划性调度。文中采用清洁能源优先调度权和电量全额收购的调度策略,以保证清洁能源发电单元能够实现更好的综合效益^[5]。

2.2 基于 EVs 充电模型的调度控制策略分类

在单位时间间隔 δ 内,文中作如下假设分布式电源的有功和无功出力恒定,在微电网与主网并网运行条件下,以微电网运行成本最小为目标,各DER单元优化各自的输出功率,同时微网与主网间可自由双向交换功率,且微网与主网间的交互电价维持恒定。

文中采取两种调度控制策略,分别为:

1)微电网并网运行状态下,对网络所有负荷执行统一的扩展分时电价策略^[17],电动汽车采用无序接入微网的模型,常规负荷电价不采用式(6)进行优化,优化结果由网络内所有DER按照优化调度策略进行出力。

2)微电网并网运行状态下,采用文中提出的负荷分类和电价分类建模,加入文中所提出的电动汽车充电完全响应模型和固定负荷的电价优化模型,各分布式电源按照优化调度策略进行出力。

2.3 基于经济成本权重的微电网优化模型

文中系统采用日前调度模型针对集中式控制式微电网,考虑用户不同响应行为产生的负荷变化,建立了微电网运行优化模型。

以微电网经济成本最小,同时考虑分布式设备折旧因素和DER污染物排放治理费用,文中设计了式(7)的目标函数,该目标函数考虑了以成本划分为基础的经济成本权重和微网的需求侧收益,使各DER在清洁能源优先出力的基础上,优化各自的功率输出。

$$\min C = \Delta t \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N [\omega_1 (C_{ti}' + C_{OMi}' + C_{Li}' + C_{DC}') + \omega_2 (10^{-3} \lambda_k \times \alpha_{ki} P_i^t - \alpha_{gridk} P_{grid}^t) - (\lambda_{nor}^t P_{nor}^t + \lambda_{EV}^t P_{EVs}^t)]; \quad (9)$$

$$C_{OMi}' = \Delta t \times K_{OMi} P_i^t; \quad (10)$$

$$C_{Li}' = \begin{cases} \Delta t \times \lambda_b (-P_{grid}^t) & P_{grid}^t < 0 \\ \Delta t \times \lambda_s P_{grid}^t & P_{grid}^t \geq 0 \end{cases}; \quad (11)$$

$$C_{DC}' = \sum_{i=1}^N \frac{P_i^t \times \Delta t \times C_{ACGi}}{8760 P_{imax} f_{cfi}}; \quad (12)$$

$$C_{ACGi}' = c_{insi} \times f_{cfi}; \quad (13)$$

$$f_{cfi} = \frac{d(1+d)^l}{(1+d)^l - 1} \quad (14)$$

式(9)–(14)中: i 、 k 分别为网络DER的排序序号和气体污染物的种类排序; P_i^t 、 P_{grid}^t 分别为 t 时段序号为 i 的DER输出功率和联络线传输功率, P_{grid}^t 为正表示微网向主网传输功率,为负表示由主网向微网传输功率; P_{nor}^t 、 P_{EVs}^t 分别 t 时段常规负荷电量、电动汽车负荷电量; C_{ti}' 、 C_{OMi}' 、 C_{Li}' 、 C_{DC}' 分别为在 t 时段序号为 i 的DER单元的能耗成本、运行管理成本、微网从主网的购电成本(负值表示微网从主网获取收益)及微网系统的折旧成本; K_{OMi} 为序号为 i 的DER单元的运行管理系数; λ_b 、 λ_s 、 λ_{nor}^t 、 λ_{EV}^t 、 λ_k 分别为 t 时段微网从主网买入电能的购电电价、售出电能的售电电价、常规负荷购电电价、EVs充电电价和污染物 k 的治污成本; α_{ki} 、 α_{gridk} 为序号为 i 的DER发电产生 k 型污染物的排放系数和主网传输功率产生 k 型污染物的排放系数; C_{ACGi} 、 c_{insi} 、 f_{cfi} 、 d 、 l 分别为序号为 i 的DER单元的安装成本年平均费用、安装成本、资本回收系数、折旧率和DER的使用寿命; ω_1 、 ω_2 分别为考虑微电网运行和环境效益的经济成本权重。

2.4 约束条件

1)系统功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^N P_i^t + P_{grid}^t = P_{nor}^t + P_{EVs}^t + P_{loss}^t \quad (15)$$

式(15)中, P_{loss}^t 为 t 时段网络损耗功率。

2)微电网内发电单元的出力约束

$$P_{imin}^t \leq P_i^t \leq P_{imax}^t; \quad (16)$$

$$P_{pvmin}^t \leq P_{pv}^t \leq P_{pvmax}^t; \quad (17)$$

$$P_{mtmin}^t \leq P_{grid}^t \leq P_{mtmax}^t \quad (18)$$

3)微电网与主网联络线传输功率约束

$$-P_{Lmin}^t \leq P_{grid}^t \leq P_{Lmax}^t \quad (19)$$

4) EVs 蓄电池需要满足单次充电功率及荷电状态约束

$$-P_{evdis_rate}^t < P_{ev}^t < P_{evcha_rate}^t; \quad (20)$$

$$SOC_{evmin} \leq SOC_{ev}^t \leq SOC_{evmax} \quad (21)$$

5) EVs 行驶需求时段约束

$$t_h + t_l + t_n = 24. \quad (22)$$

式(22)中, t_h 、 t_l 、 t_n 分别为 EVs 在行驶高峰期、低谷期和一般行驶期的各时段。

6) 储能系统还需要满足荷电量状态、充放电功率及充放电状态的约束, 其约束条件为:

$$-P_{dis_rate}^t < P_{ess}^t < P_{cha_rate}^t; \quad (23)$$

$$SOC_{essmin} \leq SOC_{ess}^t \leq SOC_{essmax}; \quad (24)$$

$$u_{dis}(i) + u_{wait}(i) + u_{ch}(i) = 1. \quad (25)$$

式(23)–(25)中: $P_{dis_rate}^t$ 、 $P_{cha_rate}^t$ 分别为 t 时段储能系统的最大充放电功率; $u_{dis}(i)$ 、 $u_{wait}(i)$ 、 $u_{ch}(i)$ 分别为储能系统处于放电、浮充和充电状态的 0、1 变量。

2.5 优化算法

文中采用遗传算法(genetic algorithm, GA)对上述的考虑需求响应的微电网模型进行优化计算。遗传算法通过模拟生物进化过程, 将生物界优胜劣汰的进化理论运用于优化求解。

为了提高收敛速度, 文[5, 18]中提出了使用遗传算法进行优化的不同改进措施。文中采用文[18]中提出的改进的自适应遗传操作的思想, 通过 MATLAB 平台编程实现, 其步骤如下:

1) 初始化种群。在求解文中提出的目标函数时, 以 1 天 24 h 中微电网内各微电源的出力、微电网购买和收储的有功功率为优化变量, 每个个体对应的优化变量取为 $(P_{G1}, \dots, P_{GN}, P_{buy}, P_{sell})$ 。

2) 校验群体中的所有个体。对于不等式约束式(14)–(19)、(21)、(22)通过设定优化变量可变化的范围来满足。对于等式约束式(13)、(20)、(23)以罚函数的形式计入目标函数中。

3) 进行适应度评价, 并保留当前群体中适应度最高的个体。

4) 采用文[18]中提出的自适应交叉算子与交叉率调整公式, 提供交叉操作的交叉概率。

5) 采用文[18]中提出的自适应变异算子与变异率调整公式, 提供变异操作的变异概率。

6) 迭代终止条件判断。以最大遗传代数和最优个体适应度值保持连续不变的最大代数相结合作为迭代终止条件。在当前搜索完成时, 通过迭代终止条件进行终止判断, 满足迭代终止条件则终止搜索, 不满足则返回步骤 3) 继续搜索。

7) 输出结果。输出搜索产生的最优结果和待优化问题的最优值, 结束算法。

3 算例分析

3.1 算例系统

微电网的结构见图 1, 可控各微电源包括燃料电池(FC)2 组、柴油发电机(DE)1 组, 不可控可再生能源包含光伏发电系统(PV)和风力发电系统(WT), 蓄电池储能系统(ESS)1 组, 各微电源的容量配置见表 1。EVs 作为负荷通过充电桩(CP)接入微网。

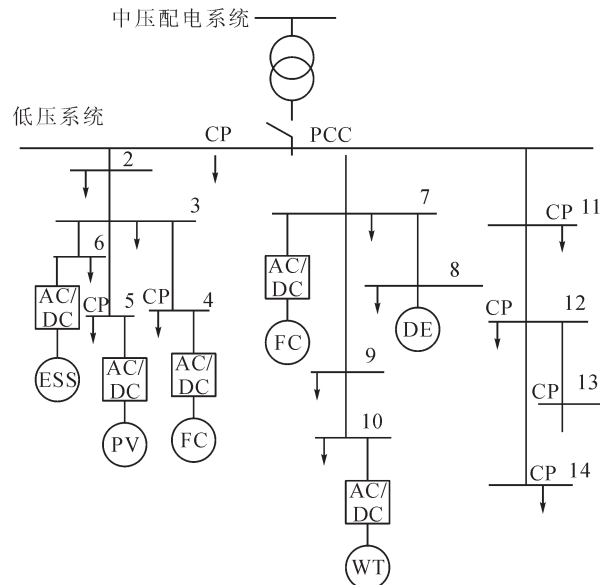


图 1 微电网结构图

Fig. 1 The structure of the micro grid

表 1 微电网 DER 单元配置

Table 1 Configuration of the parameters of DERs

DER 类型	功率配置		寿命/a	安装成本/(万元·kW ⁻¹)
	上限/kW	下限/kW		
WT	50	0	10	2.38
PV	50	0	20	6.65
FC	65×2	0	10	4.28
DE	100	0	10	1.61
ESS	200	0	15	6.85

文中以 1 日 24 h 为一个优化调度周期, 针对 24 时段分别进行计算。使用 MATLAB 平台编程, 所采用遗传算法种群大小 100, 最大迭代次数 200, 交叉概率 0.9, 变异概率 0.1。计算过程中, 所选取的污染治理费用及排放系数、DER 运行管理系数见表 2、3。24 h 风力发电系统、光伏发电系统预测出力、常规负荷曲线见图 2, 储能系统的出力上限设为电池额定容量的 90%, 下限为电池额定容量的 10%, 单次充放电功率可选 20、40 kW。微网与主网交互电价取为平均固定电价 0.65 元/(kW·h), 联络线交互功

率限值设为 80 kW。需求侧 EVs 数量设为 100, EVs 蓄电池有效荷电量百分比设为 85%, 单个 EV 蓄电池容量以平均额定容量为基准设为 10 kW, 单次充电功率限值为 2.5 kW。EVs 峰谷电价“峰”时段设为 8:00-20:00, 峰谷电价分别设为 1.2 元/(kWh) 和 0.8 元/(kWh), 常规负荷的原始扩展实时电价见表 4。EVs 行驶需求时段设为行驶高峰时段(12:00-20:00)、行驶低谷时段(00:00-8:00)和一般行驶时段(8:00-12:00, 20:00-24:00)。常规负荷的电价响应系数为 0.6606, 为 -0.9643, 且大工业用户响应权重设为 0.5。

表 2 气体排放物治理费用及排放系数

Table 2 The pollution cost and coefficient of gas emissions

污染物	治理费用/ 类型 (元·kg ⁻¹)	污染物排放系数/(g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)				
		PV	WT	DE	grid	FC
CO ₂	0.210	0	0	649.000	889.0	489.000
SO ₂	14.842	0	0	0.206	1.8	0.003
NO _x	62.964	0	0	9.890	1.6	0.010

表 3 各 DER 的运行管理系数

Table 3 The coefficient of operation management of DERs

DER 类型	PV	WT	FC	DE	ESS
KOM/(元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	0.001	0.030	0.030	0.088	0.100

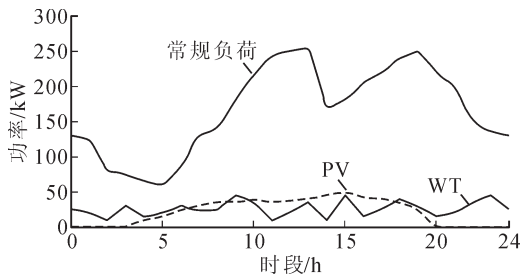


图 2 常规负荷功率和风光预测出力

Fig. 2 The power of normal load and the renewable energy

3.2 结果分析

3.2.1 负荷优化和电价优化结果

EVs 在无序充电和对峰谷电价差完全响应下的充电负荷见图 3。从图 3 中可得知, 峰谷电价差使得 EVs 用户在第 8-20 时段的整体充电量减少, 一部分负荷转移至 0-7 时段和 21-24 时段, EVs 用户以此来减少由于电价增长带来的用电成本。EVs 用户由于生活需求需要, 在第 6、18 时段, 响应后的 EVs 负荷出现了明显增长, 同时, 在第 12 时段, 行驶需求的影响使得在此时段的 EVs 用户充电负荷相对减少。在峰谷电价差和行驶需求时间的共同影响下, EVs 负荷在宏观上实现了由充电高峰时段向低估时段的部分转移。

表 4 常规负荷原始扩展实时电价表

Table 4 The original extended real-time electricity

prices of normal load

时段	电价/(元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	时段	电价/(元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)
1	0.240	13	0.990
2	0.177	14	1.490
3	0.130	15	0.990
4	0.097	16	0.790
5	0.030	17	0.400
6	0.170	18	0.365
7	0.271	19	0.360
8	0.386	20	0.413
9	0.517	21	0.445
10	0.526	22	0.348
11	0.810	23	0.300
12	1.000	24	0.225

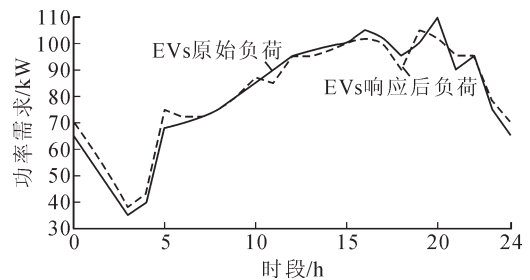


图 3 无序充电与完全响应下的 EVs 负荷

Fig. 3 The EVs load in disordered charging model and complete response model

采用文中式(6)所提的扩展电价优化模型, 得到表 5 的优化后实时电价信息。由于在电价优化模型中考虑了大工业负荷的响应权重, 优化电价与原始扩展实时电价相比, 在常规负荷峰时段略为降低, 在谷时段电价略为升高, 整体电价的变动较小, 如果增加大工业负荷的响应权重, 电价水平将发生较大变化, 由电量电价弹性带来的负荷变化将会影响电价的优化信息和系统的出力结果^[12]。

3.2.2 微电网运行优化

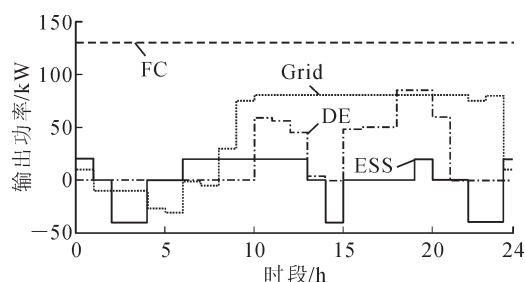
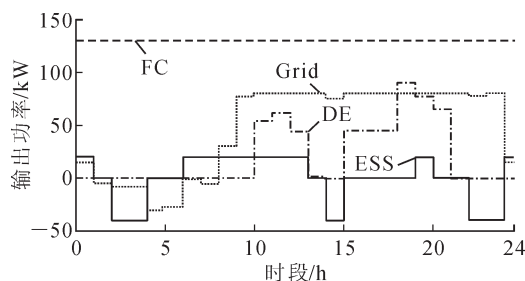
微电网内部的 DER 输出有功的成本、安装折旧成本、运行管理成本各不相同, 微网与主网的交互功率也影响着系统的出力优化结果, 在以上提出的两种调度控制策略下, 对不同经济成本权重下的目标函数进行优化, 得出以下结果。

取 $\omega_1=0.4$ 、 $\omega_2=0.6$ 两种控制策略下的网络优化出力见图 4、5。由于经济成本权重倾向对治污成本进行优化, 微电网对 DER 的调度倾向于治污成本较小的微电源进行出力, 这与图 4、5 的出力情况保持一致。

表5 常规负荷优化实时电价表

Table 5 The strengthened real-time electricity prices of normal load

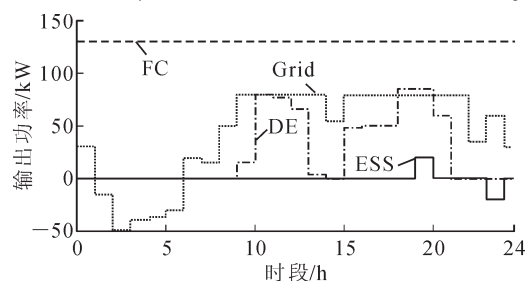
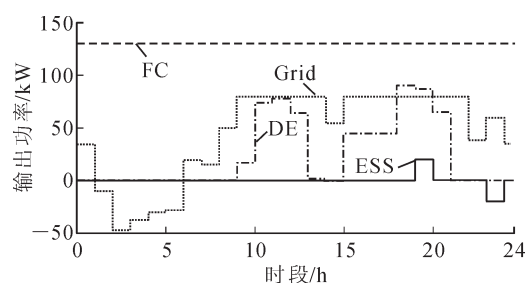
时段	电价/(元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	时段	电价/(元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)
1	0.260	13	0.990
2	0.209	14	1.419
3	0.158	15	0.990
4	0.120	16	0.792
5	0.039	17	0.427
6	0.202	18	0.365
7	0.304	19	0.395
8	0.414	20	0.439
9	0.535	21	0.469
10	0.543	22	0.379
11	0.812	23	0.333
12	1.000	24	0.259

图4 $\omega_1=0.4$, 调度策略1下的优化出力Fig. 4 $\omega_1=0.4$, optimal power in strategy 1图5 $\omega_2=0.6$, 调度策略2下的优化出力Fig. 5 $\omega_2=0.6$, optimal power in strategy 2

由图4、5可以得出以下结论:在以治污成本为主要优化目标的优化结果中,微电网优先利用环境效益较高的燃料电池(FC)提供有功功率的输出,由于综合考虑了微电网综合效益,FC在提供负荷所需的能源同时,向主网侧售出能源以增大经济效益,与向主网售出能源相比,柴油发电机(DE)的单位发电治污成本超过向主网供电的效益,只有在其他供电方式无法满足负荷时才会进行出力。储能系统为了在用电高峰期(11-13, 19-20时段)进行供电,在用电低谷期(2-4时段)进行充电,维持其充放电平衡和经济效益的最大化。在不同控制策略下,变化的 EVs

负荷主要由 DE 进行了提供,在电价较高的 11-12、18-19 时段,微电网对负荷的功能有了显著增加,在电价峰值期(13-14 时段)和谷值期(0-1 时段),微电网的有功输出未发生明显改变。

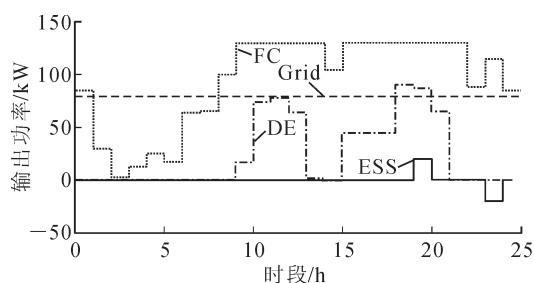
取 $\omega_1=0.6$ 、 $\omega_2=0.4$ 两种控制策略下的网络优化出力见图6、7。经济成本权重倾向对微电网运行和折旧成本最低进行优化,微电网对 DER 的调度倾向于运行效益高、折旧成本低的微电源进行出力。

图6 $\omega_1=0.6$, 调度策略1下的优化出力Fig. 6 $\omega_1=0.6$, optimal power in strategy 1图7 $\omega_2=0.4$, 调度策略2下的优化出力Fig. 7 $\omega_2=0.4$, optimal power in strategy 2

由图6、7可知:在以运行成本和折旧成本为主要优化目标的出力结果中,FC仍然作为微电网的第一调度能源,蓄电池储能系统具有较高的运行管理成本和折旧成本,只在19-20时段用电高峰期进行了出力。同时主网侧的交互功率能够给微电网带来较高的效益,DE相比于以治污成本最小的为主要优化目标的出力结果,用于填补储能系统输出有功的较少。不同控制策略下的负荷变化同样由DE进行了平抑。

取 $\omega_1=\omega_2=0.5$, 采用调度控制策略2, 网络优化出力见图8。在综合考虑运行效益、折旧成本和环境效益的情况下,微电网对DER需遵循综合经济成本最低为目标进行出力优化。

由图5、7、8对比可以得出以下结论:在以微电网综合效益为优化目标的出力结果中,由主网侧的传输功率带来的经济成本的减少使得在24个时段内,联络线传输功率均以峰值进行功率输送,FC在主网无法完全提供负荷能源的基础上优先进行功率输出,DE和ESS在考虑综合经济效益时,由于各

图8 $\omega_1=\omega_2=0.5$, 调度策略2下的优化出力Fig. 8 $\omega_1=\omega_2=0.5$, optimal power in strategy 2

自存在治污成本较高和运行维护成本较高的缺点, 只在主网和FC无法完全功能的前提下才进行出力。

综上可以得知:微电网内的DER在获得广泛运用的前提下,其经济效益还难以与主网侧功能产生的经济性相比,虽然DER单元有着灵活、平抑功率波动等优势,在经济性上也存在治污成本较高、运行管理成本较高、折旧成本较高等因素。通过对完全响应的电动汽车用户进行引导充电,及对常规负荷用户电价进行优化,对比在使用扩展分时电价的EVs无序充电模型,使负荷的用电时段进行了部分转移和优化,同时使微电网出力优化的结果中,微电网的整体经济效益获得提高。

4 结语

电动汽车负荷接入微电网和需求侧响应对于微电网内部DER的输出功率的协调性有着重要影响。文中以含电动汽车负荷的微电网为研究对象,建立引导电动汽车充电行为的分段电价模型,在对负荷分类和常规负荷电价优化的基础上,建立了考虑经济成本权重的微电网综合经济优化模型,并以典型微电网结构为例,讨论了不同调度策略和优化侧重对微电网优化出力的影响,验证了模型的有效性。

参考文献:

- [1] BOULANGER A G, CHU A C, MAXX S, et al. Vehicle electrification: Status and issues[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(6): 1116-1138.
- [2] 李惠玲, 白晓民. 电动汽车充电对配电网的影响及对策[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(17): 38-43.
LI Huiling, BAI Xiaomin. Impacts of electric vehicles charging on distribution grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(17): 38-43.
- [3] 丁明, 张颖媛, 茆美琴, 等. 包含钠硫电池储能的微电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 micro-grids including Na/S battery storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 7-14.
- [4] 彭思敏, 曹云峰, 蔡旭. 大型蓄电池储能系统接入微电网方式及控制策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(16): 38-43.
PENG Simin, CAO Yunfeng, CAI Xu. Control of large scale battery energy storage system interface to microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(16): 38-43.
- [5] 陈光堂, 邱晓燕, 林伟. 含钒电池储能的微电网负荷优化分配[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 85-91.
CHEN Guangtang, QIU Xiaoyan, LIN Wei. Optimal load distribution of microgrid with energy storage system composed of vanadium redox flow battery[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 85-91.
- [6] 苗铁群, 江全元, 曹一家. 考虑电动汽车随机接入的微网优化调度[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(12): 1-7.
MIAO Yiqun, JIANG Quanyuan, CAO Yijia. Optimal microgrid dispatch considering stochastic integration of electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(12): 1-7.
- [7] 吴红斌, 侯小凡, 赵波, 等. 计及可入网电动汽车的微网系统经济调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 77-84.
WU Hongbin, HOU Xiaofan, ZHAO Bo, et al. Economical dispatch of microgrid considering plug-in electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 77-84.
- [8] 葛少云, 王龙, 刘洪, 等. 计及电动汽车入网的峰谷电价时段优化模型研究[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2316-2321.
GE Shaoyun, WANG Long, LIU Hong, et al. An optimization model of peak-valley price time-Interval considering vehicle-to-grid[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2316-2321.
- [9] 葛少云, 黄镠, 刘洪. 电动汽车有序充电的峰谷电价时段优化[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 1-5.
GE Shaoyun, HUANG Liu, LIU Hong. Optimization of peak-valley TOU power price time-period in ordered charging mode of electric vehicle[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 1-5.
- [10] MOHSENIAN-RAD A H, WONG V W, JATSKEVICH J, et al. Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(3): 320-331.
- [11] 项顶, 宋永华, 胡泽春, 等. 电动汽车参与V2G的最优峰谷电价研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 15-25.
XIANG Ding, SONG Yonghua, HU Zechun, et al. Research on optimal time of use price for electric vehicle participating V2G[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 15-25.
- [12] 魏大钧, 张承慧, 孙波, 等. 基于分时电价的电动汽车

(下转第175页)

- Countermeasures against sudden events to ensure the security of urban power supply systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(2): 1-7.
- [9] PHADKE A G, THORP J S, KARIMI K J. State estimation with phasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1986, 1(1): 233-238.
- [10] PHADKE A G. Synchronized phasor measurements in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 6(2): 10-15.
- [11] ABUR A, EXPOSITO A G. Power system state estimation-theory and implementation[M]. New York: Marcel Dekker, 2004.
- [12] LIN S Y, YIN C H. An implementable distributed state estimator and distributed bad data processing schemes for electric power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(3): 1277-1284.
- [13] EBRAHIMIAN R, BALDICK R. State estimation distributed processing[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(4): 1240-1246.
- [14] LIN S Y. A distributed state estimator for electric power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(2): 551-557.
- [15] CONEJO A J, TORRE S, CANAS M. An optimization approach to multiarea state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1): 213-221.
- [16] PHADKE A G, THORP J S. Synchronized phasor measurements and their applications[M]. New York: Springer, 2008.
- [17] 刘道伟, 谢晓荣, 穆 钢, 等. 基于同步相量测量的电力系统在线电压稳定指标[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 13-17.
- LIU Daowei, XIE Xiaorong, MU Gang, et al. An on-line voltage stability index of power system based on synchronized phasor measurement[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 13-17.
- [18] 马平川, 沈 沉, 陈 颖, 等. 基于伪量测型协调变量的分布式状态估计算法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3170-3177.
- MA Chuanping, SHEN Chen, CHEN Ying, et al. Distributed state estimation based on the pseudo-measurement coordination variables[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3170-3177.
- [19] ZHAO L, ABUR A. Multiarea state estimation using synchronized phasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 611-617.
- [20] ZHAO L, ABUR A. Multiarea state estimation using synchronized phasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 611-617.

杨 翀(1987—), 男, 工程师, 主要从事电力系统调度控制工作, 研究领域包括电力系统状态估计等。

(上接第 169 页)

- 充放电多目标优化调度[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 2972-2977.
- WEI Dajun, ZHANG Chenghui, SUN Bo, et al. A time-of-use price based multi-objective optimal dispatching for charging and discharging of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 2972-2977.
- [13] 崔 强, 王秀丽, 刘祖永. 市场环境下的计及储能电站运行的联动电价研究及其效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 62-68.
- CUI Qiang, WANG Xiuli, LIU Zuyong. Study on linkage electricity price and benefit analysis considering energy storage station operation in market environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 62-68.
- [14] 别朝红, 胡国伟, 谢海鹏, 等. 考虑需求响应的含风电电力系统的优化调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 115-120.
- BIE Chaohong, HU Guowei, XIE Haipeng, et al. Optimal dispatch for wind power integrated systems considering demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 115-120.
- [15] SABER A Y, VENAYAGAMOORTHY G K. Plug-in vehicles and renewable energy sources for cost and emission reductions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1229-1238.
- [16] 曹一家, 苗轶群, 江全元. 含电动汽车换电站的微电网孤岛运行优化[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.
- [17] 曾 勇. 基于智能电网的实时电价研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [18] 邱晓燕, 夏莉丽, 李兴源. 智能电网建设中分布式电源的规划[J]. 电网技术, 2010, 34(4): 7-10.
- QIU Xiaoyan, XIA Lili, LI Xingyuan. Planning of distributed generation in construction of smart grid[J]. Power System Technology, 2010, 34(4): 7-10.
- 刘延博(1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为储能技术、微电网运行。
- 邱晓燕(1964—), 女, 博士, 教授, 研究方向为电力系统分析与控制、智能电网、分布式发电及储能控制技术等。