

含电动汽车的智能微电网的最优潮流研究

针对计及电动汽车 (Electric Vehicles, EVs) 和多种分布式能源的中压微电网系统, 首先根据电动汽车的功率特性, 采用蒙特卡洛法得到不同规模的电动汽车的充电日负荷曲线。然后建立基于实时电价的含电动汽车的微电网经济运行的最优潮流数学模型, 并提出一种改进粒子群 (Particle Swarm Optimization, PSO) 的牛顿-拉夫逊最优潮流算法进行求解, 将微电网的经济性、安全性及电能质量三方面的要求完美地统一起来。最后, 基于Matlab软件平台, 实现了该改进PSO最优潮流算法。通过对某中压微电网系统不同调度策略下进行经济性分析, 验证了该方法的准确性和合理性。

周 灿¹ 张明光² 曾红艳¹ 向加佳¹/1.长沙电力职业技术学院 2.兰州理工大学电气工程与信息工程学院

0 引言

近年来, 为了应对环境和能源的双重压力, 各国政府已逐渐认识到节能减排对人类社会可持续发展有着重要意义。电动汽车具有环保、低碳和低噪声等特点, 因此它是减少石油依赖、降低环境污染及控制温室气体排放的有效措施。美国能源部领先实施了EV Project^[1]计划, 采用免费为电动汽车用户提供家用充电桩来普及电动汽车的使用, 预计2016年电动汽车规模为150万辆, 而到2030年则突增至5 000万辆^[2]。随着未来电动汽车用户的增加, 大量电动汽车将规模入网充电, 因为各EVs用户使用习惯的差异, 将使入网充电时刻和频率具有很大的随机性和不可预测性, 而电动汽车频繁充电所带来的冲击将直接影响电

网的电能质量, 使电网运行优化控制难度增加, 对电力系统的运行与规划也将提出新的要求^[3]。

然而, 相对于电动汽车直接入网方式, 将电动汽车接入微电网——由分布式发电 (Distributed Generation, DG)、负荷、储能装置及控制装置组成的一个单一可控的独立发电系统^[4], 微电网再作为可中断负荷接入大电网, 该方式可大幅度减小电动汽车直接入网对大电网的影响, 更好地服务于大电网及微电网^[5]。

因此, 当电动汽车接入微电网, 微电网如何充分发挥DERs (Distributed Energy Resources) 的优势, 必须解决微电网的电能质量、控制策略、优化管理及经济性研究等相关问题^[6-8]。目前各国已针对微电网孤岛^[9-10]、并网^[11-12]和热电联供型 (Combined Heat and Power, CHP) 微电网^[13-14], 采用诸如粒子群算法、内点法、最优顺序法和遗传算法等优化算法展开了相关研究, 实现微电网的最优调度, 使经济性指标达到最佳。其中, 文献[15]在计及可中断负荷和电池存储系统的微电网中, 采用PSO优化算法实现了DERs的最优分配。文献[16]提出了一个包含DERs和电动汽车典型的微电网结构, 探讨了微电网运行的控制策略, 并应用优先顺序法进行算例分析, 使微电网经济、稳定运行。

本文通过研究电动汽车的时空特性, 概述了电动汽车负荷建模的过程, 然后结合某中压微电网系统, 综合考虑经济、环保等指标建立目标函数, 提出了改进PSO最优潮流算法, 制定合理的



周 灿/助理讲师

关键词/Keywords

电动汽车 ·
微电网 ·
改进PSO ·
最优潮流 ·

混合型MMC-MTDC直流输电系统故障新型控制策略研究 (51567016)。

调度策略, 最终实现了微电网的合理经济调度。

1 电动汽车充电负荷计算

1.1 充电负荷影响因素分析

电动汽车的充电负荷具有不可预测性和随机性, 其开始入网的充电时间和日行驶里程基本取决于用户的驾驶习惯和行驶特性。综合考虑充电负荷的影响因素, 针对电动汽车的时空特性, 采用蒙特卡洛方法模拟电动汽车的充电行为, 计算充电负荷。

根据美国能源部2008年对电动汽车用户调查的统计报告^[17], 可将电动汽车的最后一次返程时刻近似为正态分布, 日行驶里程近似为对数正态分布。

电动汽车的最后一次返程时刻 t_0 服从正态分布, 即 $t_0 \sim N(\mu_t, \sigma_t^2)$, 其概率密度函数为

$$f_t(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu_t)^2}{2\sigma_t^2}\right) & \mu_t - 12 < x < 24 \\ \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - (\mu_t - 24))^2}{2\sigma_t^2}\right) & 0 < x < \mu_t - 12 \end{cases} \quad (1)$$

电动汽车的日行驶里程 S 服从对数正态分布, 即 $S \sim \log N(\mu_s, \sigma_s^2)$, 其概率密度函数为

$$f_s(x) = \frac{1}{x} \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right) \quad (2)$$

参与调度的电动汽车以常规慢充方式充电, 其充电功率除开始与结束阶段, 其他时刻的充电功率基本保持不变, 而充电开始和结束阶段相对于整个充电过程较短, 可以忽略。因此, 可将电动汽车充电负荷看成恒功率负荷, 设 P_c 为4 kW, 电动汽车每公里耗电量 W_c 为0.15 kW·h。

1.2 基于蒙特卡洛模拟的充电负荷计算流程

根据上述最后一次返程时刻 t_0 可得到电动汽车开始充电的时间; 根据日行驶里程 S 可得到电动汽车充电电能需求, 从而得到电动汽车入网时的荷电状态(SOC)及充电的持续时长, 即

$$T_c = \frac{SW_c}{P_c \eta_c} \quad (3)$$

式中, η_c 为电动汽车的充电效率。

由于各辆电动汽车的充电时间相互独立, 故可采用随机试验, 应用蒙特卡洛模拟的方法计算充电负荷, 根据开始充电的时间和充电的持续时长可累计得到所有电动汽车无序充电时的日负荷曲线。计算流程如图1所示。

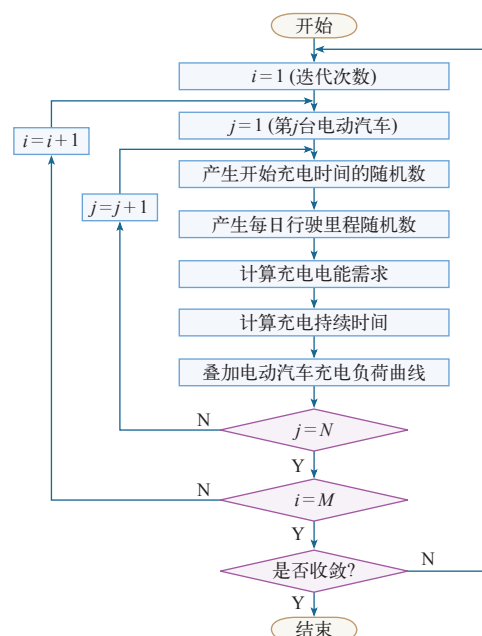


图1 电动汽车充电负荷计算流程图

图2则给出了不同规模电动汽车无序充电时的日负荷曲线。

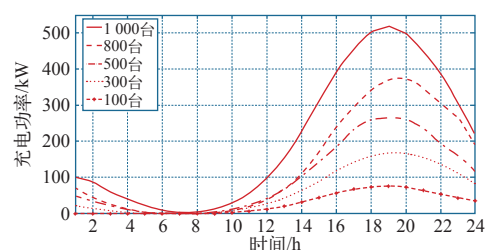


图2 不同规模电动汽车无序充电的日负荷曲线

2 基于实时电价的微电网最优潮流模型

2.1 目标函数

先分别单独考虑微电网的经济性和环境效益, 再综合考虑其经济性和环境效益来实现不同目标函数的最优经济调度。

(1) 目标函数1: 微电网运行成本最小

侧重考虑微电网运行中各DERs的经济调度,

而不考虑各DERs的初期投资建设成本,因此只考虑DERs的燃料成本和运行维护成本;因为电动汽车为用户个人所有,所以电动汽车的购买和维护成本由用户自行负责,这部分费用不包含于微电网运行成本中。因此,微电网运行成本的目标函数考虑了DERs的燃料成本和运行维护成本,微电网向电动汽车、大电网购电成本及向电动汽车、大电网售电所得收益可表示为

$$\min C_M = \min \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^N C_{\text{fuel}} P_i^t + C_{\text{OM}} P_i^t + C_1 P_{\text{grid}}^t - C_2 P_{\text{EV}}^t \right) \quad (4)$$

$$C_{\text{OM}} P_i^t = k_{\text{DSG}} P_{\text{DSG}} + k_{\text{MT}} P_{\text{MT}} + k_{\text{FC}} P_{\text{FC}} \quad (5)$$

式中, C_M 为微电网运行时的总运行成本; T 为调度时间; N 为DERs的数量; $C_{\text{fuel}} P_i^t$ 为DERs的燃料成本; $C_{\text{OM}} P_i^t$ 为DERs的运行维护成本; k_{DSG} 、 k_{MT} 和 k_{FC} 分别为柴油发电机、微型燃气轮机和燃料电池的维护成本系数; P_i^t 为DERs的输出功率; P_{grid}^t 为微电网与大电网间的交换功率(微电网向大电网购电时为正,向大电网售电时为负); C_1 为大电网电价; P_{EV}^t 为电动汽车输出功率(处于充电状态为正,处于放电状态为负); C_2 为电动汽车与微电网的电量交易价格。

(2) 目标函数2: 污染物处理成本最小

微电网中的柴油发电机、微型燃气轮机、燃料电池运行及大电网机组发电时会产生 CO_2 、 SO_2 和 NO_x 等污染物,因此,微电网运行时污染物处理成本最小的目标函数可表示为

$$\min C_{\text{emission}} = \min \sum_{t=1}^T \left[\sum_{j=1}^3 \alpha_j \left(\beta_{\text{grid}-j} P_{\text{grid}}^t + \sum_{i=1}^N \beta_{ij} P_i^t \right) \right] \quad (6)$$

式中, T 为调度时间, C_{emission} 为微电网的污染物处理成本; α_j 为污染物 j 的处理成本; β_{ij} 为分布式电源 i 的 j 型污染物的排放因子; $\beta_{\text{grid}-j}$ 为大电网 j 型污染物的排放因子。

(3) 目标函数3: 综合效益最大,即综合考虑微电网运行成本和污染物处理成本

$$\min C = C_M + C_{\text{emission}} \quad (7)$$

2.2 约束条件

(1) 系统有功功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^M P_i^t + P_{\text{grid}}^t = P_{\text{load}}^t + P_{\text{EVload}}^t \quad (8)$$

式中, P_i^t 为DERs的输出功率; P_{grid}^t 为微电网与大电网间的交换功率; P_{EVload}^t 为电动汽车的充放电功率; P_{load}^t 为微电网负荷需求。

(2) 分布式电源出力约束

$$P_i^{\min} \leq P_i^t \leq P_i^{\max} \quad (9)$$

式中, $P_i^{\min}$ 、 $P_i^{\max}$ 分别为分布式电源 i 输出功率的上、下限。

(3) 电动汽车输出功率约束

$$P_{\text{EV}}^{\min} \leq P_{\text{EV}}^t \leq P_{\text{EV}}^{\max} \quad (10)$$

$$\text{SOC}_{\text{EV}}^{\min} \leq \text{SOC}_{\text{EV}}^t \leq \text{SOC}_{\text{EV}}^{\max} \quad (11)$$

式中, P_{EV}^t 为电动汽车 t 时刻的输出功率; $P_{\text{EV}}^{\min}$ 、 $P_{\text{EV}}^{\max}$ 分别为电动汽车的最小和最大输出功率; SOC_{EV}^t 为电动汽车在时刻 t 的SOC值; $\text{SOC}_{\text{EV}}^{\min}$ 、 $\text{SOC}_{\text{EV}}^{\max}$ 分别为电动汽车SOC的最小值和最大值。

(4) 微电网与大电网间功率交换约束

$$P_{\text{grid}}^{\min} \leq P_{\text{grid}}^t \leq P_{\text{grid}}^{\max} \quad (12)$$

式中, P_{grid}^t 为微电网与大电网间的交换功率; $P_{\text{grid}}^{\min}$ 、 $P_{\text{grid}}^{\max}$ 分别为微电网与大电网间交换功率的上、下限。

(5) 微电网系统运行的约束条件

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad i=1, \dots, m \quad (13)$$

$$\delta_i^{\min} \leq \delta_i \leq \delta_i^{\max} \quad i=1, \dots, m \quad (14)$$

式中, V_i 、 $V_i^{\min}$ 和 $V_i^{\max}$ 为微电网中各节点的实际电压幅值、允许的电压最小和最大的幅值; δ_i 、 $\delta_i^{\min}$ 、 $\delta_i^{\max}$ 为微电网中各节点的实际相角、允许的相角最小和最大值; m 为微电网的节点数。

2.3 调度策略

大规模EVs接入微电网后,相当于给微电网接入相同容量的储能设备,所以可以取代部分作为备用容量的发电机组和储能装置,因而可减少微电网的投资和运行成本,提高设备的利用率。本文提出了如下两种计及可入网电动汽车的调度策略。

策略1: 不考虑EVs的放电特性,电动汽车无序充电,即负荷(净负荷+EVs充电负荷)由燃料电池、柴油发电机、微型燃气轮机和大电网按优化调度结果来出力,而光伏发电和风力发电属于清洁能源发电,无污染物的排放,使它们按照预计出力曲线来出力,输出功率的波动靠蓄电池来维持稳定。

策略2: 考虑电动汽车的充放电特性,电动汽

车作为分布式电源,参与优化调度。在电价低谷时,利用低电价给电动汽车充电,电价高峰时段电动汽车放电。其中,考虑到用户的用车习惯,08:00~17:00时段,电动汽车不参与调度。

3 改进PSO最优潮流算法

PSO算法是由Kennedy和Eberhart于1995年提出的一种基于群体智能演化的优化进化算法。PSO算法求解过程简单、易于实现,对参数控制效果好,但为避免基本PSO算法陷入局部最优解的情况,提出一种动态的双种群粒子群算法,即按照不同的学习策略来进化,一部分是从粒子自身和群体中成功的经验学习,而另一部分则是从粒子自身和群体中失败的经验学习。结合最优潮流,算法的基本流程如图3所示。

4 算例分析

4.1 算例系统

以某地区某日为例进行最优调度,该算例

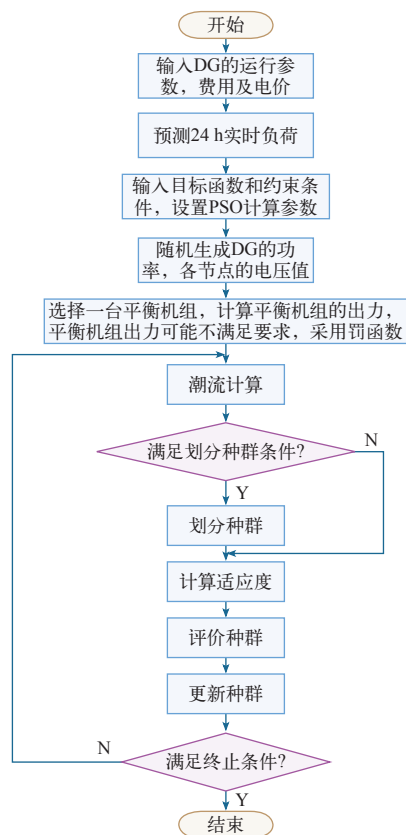


图3 改进PSO最优潮流算法流程

系统由风力发电系统、光伏发电系统、柴油机、燃料电池、微型燃气轮机和电动汽车组成。该微电网内有10个风电机组(Wind Turbine, WT)和30块太阳能电池板(Photovoltaic, PV)均由最大功率跟踪策略实现最大功率输出^[18-19],实时发电量如图4、图5所示;有两台柴油机(Diesel Generator, DSG)、两台微型燃气轮机(Micro-Turbines, MT)和一组燃料电池(Fuel Cell, FC)单组柴油机、微型燃气轮机和燃料电池的功率上限都是30 kW;有100台可调用电动汽车。优化过程中涉及的其他主要参数如表1、表2所示。

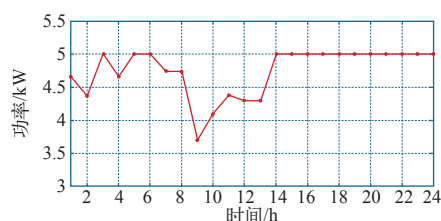


图4 WT的实时发电量

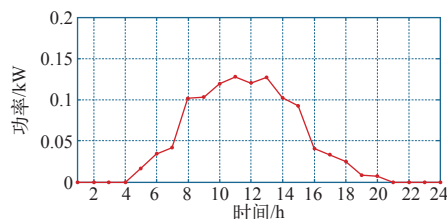


图5 PV的实时发电量

表1 分布式电源的参数

分布式电源	维护成本因K/(kg/MW·h)	最大功率/kW	最小功率/kW
微型燃气机	0.005 87	30	0
燃料电池	0.004 19	30	0
柴油机	0.012 58	30	0
大电网	—	100	-20

表2 NO_x、SO₂和CO₂的外部成本和排放系数

污染物类型	FC的排放因子/(kg/MW·h)	MT的排放因子/(kg/MW·h)	DSG的排放因子/(kg/MW·h)	大电网的排放因子/(kg/MW·h)
NO _x	0.44	0.03	21.8	3.6
SO ₂	0.008	0.006	0.454	4.54
CO ₂	1.596	1.078	1.432	23

电量交易价格是指电动汽车向微电网售电价格,由微电网运营方和电动汽车车主共同协商制定。电量交易价格和大电网的实时电价如图6所示。

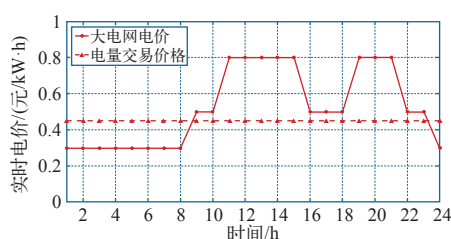


图6 电量交易价格和大电网电价

4.2 各发电单元结果对比分析

算例1：基于策略1的思想，各发电单元在不同目标函数下的优化调度出力如图7所示。

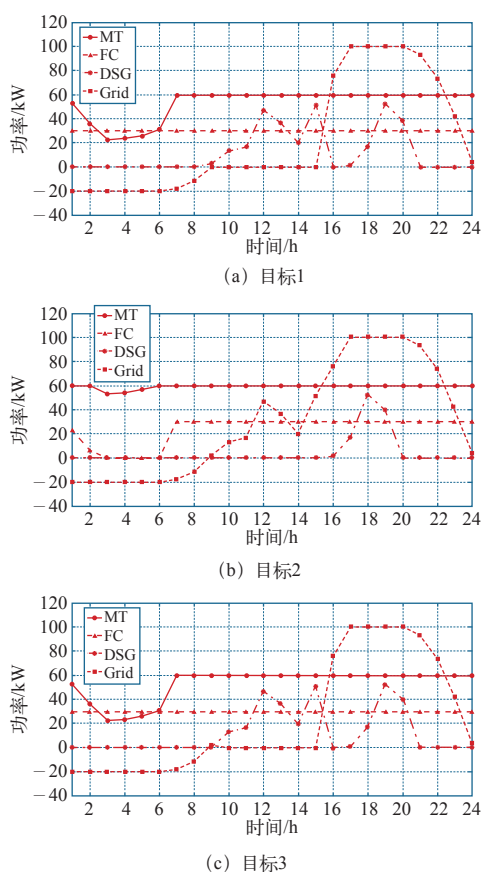


图7 采用算例1时不同目标下各发电单元出力

根据策略1，电动汽车无序充电，DERs得到最大化利用。图7a为按照微电网运行成本最小安排各发电单元出力，从图7a中可以看出，FC 24 h内始终被安排以最大功率出力，说明燃料电池的成本最低，在8:00之前，因为负荷处于低谷时段，DERs出力有剩余，向大电网售电；在9:00~15:00时段，电网电价高于柴油机运行成本，优先安排柴油机出力；在16:00~24:00时段，柴油机的运

行成本高于电网电价，优先安排微电网向大电网购电。图7b为按照污染物处理成本最低来安排各机组的出力，从图7b中可以看出，MT的污染物处理成本最小，故一直优先安排出力，其次是燃料电池。而柴油机的污染物处理成本最高，一直到最后才被安排出力；在8:00之前，在满足负荷的前提下将多余的电能售给电网。图7c综合考虑了微电网运行成本和污染物处理成本，在9:00及16:00~24:00时间段，电网电价高于柴油机的综合成本，优先安排柴油机出力，其余时间段与图7a相似。

算例2：基于策略2的思想，各发电单元在不同目标函数下的优化调度出力如图8所示。

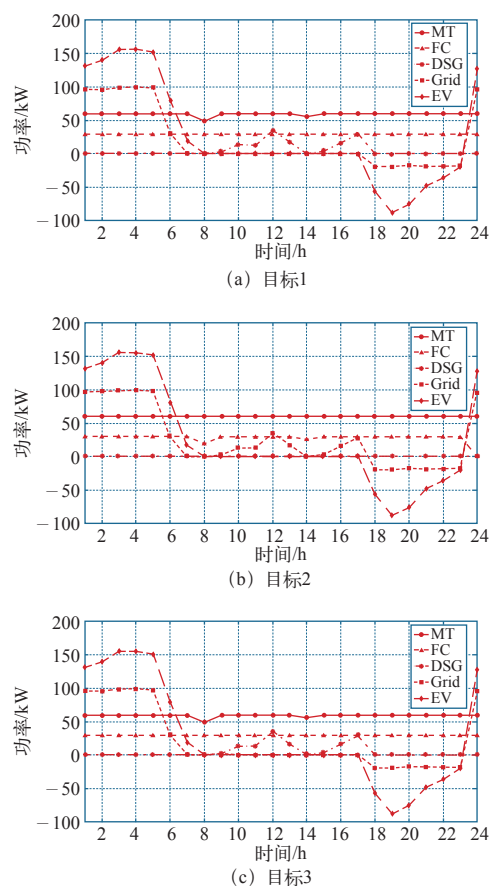


图8 采用算例2时不同目标下各发电单元出力

根据策略2，电动汽车参与优化调度。从图8a中可以看出，在7:00之前，由于电价比较低，在DER不足以满足负荷要求时，以较低价向电网购电，电动汽车充电，因为柴油机运行成本较高，停止使用柴油机；在8:00~17:00时段，电动

汽车不参与调度, 电网电价高于柴油机的运行成本, 优先安排柴油机出力; 在18:00~23:00时段, 由于电价较高, 电动汽车对微电网放电, 在满足负荷要求时, 微电网向大电网售电。图8b为按污染物处理成本最低安排各机组出力, 从图8b中可以看出, 由于柴油机的污染物处理成本最高, 故一直停止使用; 而微型燃气轮机的污染物处理成本很小, 故一直优先使用, 当最大出力不足以满足负荷需求时, 向电网购电。图8c为计及电动汽车优化调度后, 按各发电单元综合成本的大小来安排DER出力, 综合考虑了运行成本和污染物处理成本。

4.3 调度费用对比分析

从图9、图10中可以看出, 目标1与目标3的成本曲线基本重合, 说明目标3中微电网的运行成本占综合成本的比重较大, 而污染物处理成本则对综合成本影响较小。在24:00~次日8:00时段内, 目标1与目标3的成本曲线低于X轴, 是因为微电网向大电网、电动汽车售电而所得的收益。从

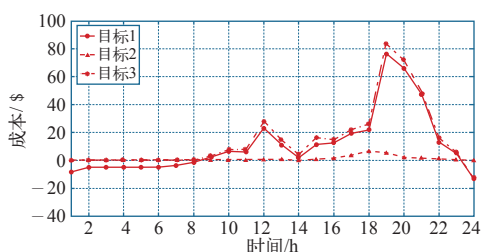


图9 采用算例1时不同目标的成本曲线

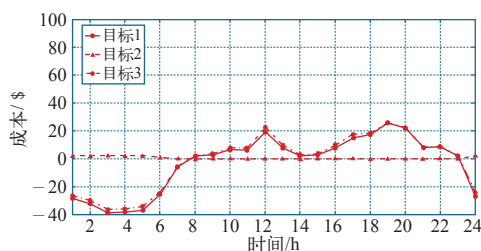


图10 采用算例2时不同目标的成本曲线

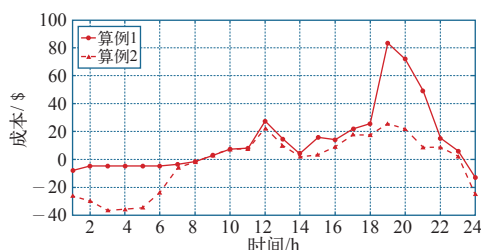


图11 采用目标3时不同算例的成本曲线

图11中可以看出, 相比于电动汽车无序充电, 让其参与优化调度, 不仅使DERs得到最大化利用, 同时根据电价的峰谷差, 在低电价时对电动汽车充电能有效地存储微电网系统中的富余能量, 在高电价时将多余的电能释放出来, 降低了微电网对配电网的依赖, 从而减少了其他DERs的间歇性出力给电力系统所带来的影响, 提高了微电网的经济效益。

5 结束语

概述了电动汽车的时空特性, 采用蒙特卡洛法模拟电动汽车的充电行为, 计算充电负荷, 并利用Matalb软件仿真得到不同数量的可入网的电动汽车无序充电时的日负荷曲线; 以微电网运行成本最小、污染物处理成本最小和综合效益最高为目标函数, 基于实际情况制定了不同的调度策略, 建立了含电动汽车的微电网的最优潮流模型。最后利用改进的PSO最优潮流算法求解两个算例系统所得的结果。结果表明:

1) MT和FC的燃料成本及污染物处理成本偏低, 在一般情况下被优先安排出力, 而DSG的燃料成本及污染物处理成本偏高, 故一般最后安排出力。这一优化安排与DERs实际运行情况相符, 说明了含EVs的微电网的最优潮流数学模型及改进的PSO算法的可行性和有效性。

2) 微电网在不同的运行策略上, 其优化调度方案也不同, 其中让EVs参与优化调度的微电网综合成本最低, EVs无序充电的微电网综合成本最高。

3) EVs参与优化调度不仅可以降低微电网的综合运行成本, 还可以让EVs的车主也能够通过向微电网售电而获利。这一举措可使微电网的运营商与EVs的车主达到“双赢”, 使能源最大化利用, 避免浪费。

4) 微电网与EVs间的电量交易价格也会影响微电网的优化运行, 微电网运营商需与EVs车主协商好, 使双方都能盈利。

所建立的模型为微电网的能量管理系统(EMS)进行优化管理提供了有力的依据, 有助

于今后EVs大规模入网。

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] NEW York ISO. Alternate route: electrifying the transportation sector [R]. New York, USA: NEW York ISO, 2009: 167-173.
- [3] 胡泽春, 宋永华, 徐智威, 等. 电动汽车接入电网的影响与利用 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (4) : 1-10.
- [4] Venkatraman R, Khaitan, S K, et al. A survey of techniques for designing and managing microgrids [C]. Power and Energy Society General Meeting, IEEE, 2015 : 26-30.
- [5] Fernandez LP, Roman T G S, Cossent R. Assessment of the impact of plug-in electric vehicles on distribution networks [J]. IEEE Transactions on Power System, 2011, 26 (1) : 206-213.
- [6] Lassetter R, Akhil A, Marnay C, et al. White paper on integration of distributed energy resources – the CERTS microgrid concept [EB/OL]. [2003-10]. <http://certs.lbl.gov/pdf/50829.pdf>.
- [7] 王瑞琪, 李珂, 张承慧. 基于混沌多目标遗传算法的微网系统容量优化 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39 (22) : 16-22.
- [8] 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, 38 (19) : 235-239.
- [9] 艾欣, 崔明勇, 雷之力. 基于混沌蚁群算法的微网环保经济调度 [J]. 华北电力大学学报, 2009, 36 (15) : 1-6.
- [10] Conti S, Nicolosi R, Rizzo S A, et al. Optimal dispatching of distributed generators and storage systems for MV islanded microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27 (3) : 1243-1251.
- [11] 杨佩佩, 艾欣, 崔明勇, 等. 基于粒子群优化算法的含多种供能系统的微网经济运行分析 [J]. 电网技术, 2009, 33 (20) : 38-42.
- [12] 陈昌松, 段善旭, 殷进军, 等. 基于发电预测的分布式发电能量管理系统 [J]. 电工技术学报, 2010, 25 (3) : 150-156.
- [13] 王锐, 顾伟, 吴志. 含可再生能源的热电联供微网经济运行优化 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35 (8) : 22-27.
- [14] Ashoke Kumar Basu, Aniruddha Bhattacharya, Sunetra Chowdhury, et al. Planned scheduling for economic power sharing in a CHP-based microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27 (1) : 30-38.
- [15] Sortomme E, El-Sharkawi M A. Optimal power flow for a system of microgrids with controllable loads and battery storage [C]. 2009 PSCE, 2009: 1-5.
- [16] 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) : 77-85.
- [17] Vyas A, Santini D. Use of national surveys for estimating ‘full’ PHEV potential for oil use reduction [EB/OL]. [2008-07-21]. <http://www.transportation.anl.gov/pdfs/HV/525.pdf>.
- [18] 丁明, 吴义纯, 张立军. 风电场风速概率分布参数计算方法的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (10) : 107-110.
- [19] 汪海宁, 苏建徽, 丁明, 等. 光伏并网功率调节系统 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (2) : 75-79.

(收稿日期: 2017-03-10) **EA**