

电动汽车参与经济调度的多目标模型^①

陆建丽, 张晓峰, 张有兵, 姜胜男, 王 耀

(浙江工业大学 信息工程学院, 杭州 310023)

摘 要: 电动汽车通过 V2G 技术可以作为电网负荷侧的备用容量, 由此提出了一个多目标优化模型, 将电动汽车车主成本和经济调度成本作为其目标函数, 并让电动汽车通过有序充放电来作为经济调度时的备用容量. 在满足各种约束条件下, 采用多目标遗传算法(NSGA-II)对模型进行求解. 电动汽车的负荷特性、负荷波动、真实风能输出和机组停运状态均采用蒙特卡洛算法得到, 并以一小时为时间间隔来进行仿真. 由模型的求解结果可知, 通过选择合适的 pareto 解集中的值, 可以节省车主成本和经济调度的成本, 并且可以实现对负荷削峰填谷的功能.

关键词: 电动汽车; V2G; 经济调度; 多目标遗传算法; 蒙特卡洛算法

Multi-Objective Model of Economic Dispatch Incorporating Electric Vehicles

LU Jian-Li, ZHANG Xiao-Feng, ZHANG You-Bing, JIANG Sheng-Nan, WANG Yao

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Electric vehicles can be used as standby power on the demand side through V2G technology. In this paper, a multi-objective optimization model is established, cost of economic dispatch and charging cost of EV owners are taken as the model's objectives, and the electric vehicles are used as standby power through coordinated charging in the process of economic dispatch. After meeting all the constraints, the model is simulated by NSGA-II algorithm. Besides, the electric vehicles' load characteristics, the real load fluctuation, the real wind output and the fault outage of generators are simulated hourly by using Monte Carlo algorithm. Experimental results show that this model can save the cost of economic dispatch and the charging cost of EV owners by choosing the right result among the pareto. It can also narrow the gap between peak load and valley load.

Key words: electric vehicles; V2G; economic dispatch; NSGA-II algorithm; Monte Carlo algorithm

近年来, 由于温室效应和能源短缺, 电动汽车和系统经济调度成为了关注的焦点. 电动汽车通过 V2G 技术可以用作负荷侧的备用容量, 它既可以运行在充电模式也可以运行在放电模式^[1]. 经济调度是配电系统运行控制过程中的一个重要问题, 是指在满足负荷需求及各种约束条件下, 协调各机组的出力, 使得配电系统运行总成本最小^[2]. 与不含电动汽车的经济调度有所区别, 本文所提出的含电动汽车的经济调度需要更多地考虑电动汽车的用户行为、动力电池的 SOC 值及输出功率等限制, 因此含电动汽车的经济调度更为复杂. 在以往文献中, 电动汽车车主的充电成本

往往不被考虑, 且电动汽车集群的负荷特性也常常被忽略^[3].

本文的目的就在于研究含电动汽车的经济调度问题, 同时也考虑了电动汽车用户的成本和集群的负荷特性, 由此建立了一个多目标优化模型, 并采用 NSGA-II 算法进行求解. 仿真结果表明, 该模型相比于传统的经济调度更能节省成本, 并且起到对负荷削峰填谷的作用, 提高了电力系统的安全性.

1 多目标遗传算法

一般的多目标优化问题由一组目标函数和相关的

^① 收稿时间:2014-07-07;收到修改稿时间:2014-08-06

一些约束组成, 可作如下描述:

$$\min_{X \in \Omega} F(X) = (f_1(X), f_2(X), \dots, f_n(X)) \quad (1)$$

$$X \in \Omega \subset R^n \text{ s.t. } g_i(X) \leq 0 \quad i=1,2,\dots,p \quad (2)$$

其中 X 是 R^n 空间的 n 维向量, 取值范围为 Ω , $g_i(X) \leq 0 (i=1,2,\dots,p)$ 为约束函数. $f_i(X) (i=1,2,\dots,m)$ 为问题子目标函数, 它们之间是相互冲突的, 即不 $\exists X \in \Omega$ 使 $f_i(X) (i=1,2,\dots,m)$ 在 X 处同时取到最优, 只能在各目标之间进行协调权衡和折中处理, 使所有目标函数尽可能达到最优, 而且问题的最优解由数量众多的 Pareto 解集组成, 而标准的遗传算法只有一个目标函数, 问题的最优解也只是一组解组成.

2 电动汽车车辆集群模型

采用蒙特卡洛算法模拟仿真10000辆电动汽车的接入电网时间、离开电网时间、日行驶里程数, 这三个函数均满足正态分布^[1], 由此可以得到每量电动汽车的初始荷电状态, 即初始 SOC.

假设电动汽车的动力电池为锂离子电池, 电池容量在20~30kWh 之间均匀分布. 电动汽车充放电应使用统一的接口, 而且锂离子电池在 SOC 为0.1~0.9范围内的充电过程可以近似为恒功率充电. 取电池最大充电上限是 $E_{\max} = 0.9$, 电池最小放电下限是 $E_{\min} = 0.1$, 那么可以假设电动汽车充放电功率为4kW. 假设充电开始时间、日行驶里程、充电功率之间相互独立.

电动汽车通过 V2G 技术可以作为电网负荷侧的备用容量. 车辆各个时刻的充放电电量必须满足充放电上下限的约束:

$$E_{\min,i} \leq E_{i,t} + SD_{g2v,i,t} \cdot \eta_c / S_i - SD_{v2g,i,t} / \eta_d / S_i \leq E_{\max,i} \quad (3)$$

式中, S_i 是车辆 i 的电池容量; $E_{\min,i}$ 是车辆 i 的最小允许 SOC; $E_{\max,i}$ 是车辆 i 的最大允许 SOC; η_c 和 η_d 分别为充放电效率系数; $E_{i,t}$ 是车辆 i 在 t 时段的 SOC; $SD_{v2g,i,t}$ 和 $SD_{g2v,i,t}$ 分别为车辆 i 在 t 时段的充放电电量.

电动汽车参与充放电调度必须保证余下的时间能满足充电需求, 即总的调度量满足充电需求:

$$\sum_{i=1}^T [SD_{g2v,i,t} \cdot \eta_c - SD_{v2g,i,t} / \eta_d] = S_i \cdot (E_{\max,i} - E_{0,i}) \quad (4)$$

式中, T 是为研究周期内的时间段数 ($T=24$); $E_{0,i}$ 是车辆 i 的初始 SOC.

3 多目标优化模型

本文提出了一个多目标优化模型, 将电动汽车车主成本和经济调度成本作为其目标函数, 求取系统各发电机、风机、备用容量、和电动汽车集群的输出能量, 运行周期为 24 小时, 运行时间间隔为 1 小时. 由于多目标模型考虑的因素较多, 所以运算较为复杂.

3.1 电动汽车用户成本模型

电动汽车用户成本模型中包括充电成本、放电获益和电池损耗成本, 公式如下:

$$\min F_1 = \sum_{t=1}^T [p_{g2v,t} \cdot SD_{g2v,t} - p_{v2g,t} \cdot SD_{v2g,t} + \sum_{i=1}^N D_{i,t}(I_{i,t}, I_{i,t-1})] \quad (5)$$

$$D_{i,t}(I_{i,t}, I_{i,t-1}) = \varepsilon_1 (I_{i,t})^2 + \varepsilon_2 (I_{i,t} - I_{i,t-1})^2 + \varepsilon_3 (\min\{I_{i,t}, -\delta \cdot S_i, 0\})^2 + \varepsilon_4 \quad (6)$$

$$SD_{g2v,t} = \sum_{i=1}^N SD_{g2v,i,t} \quad (7)$$

$$SD_{v2g,t} = \sum_{i=1}^N SD_{v2g,i,t} \quad (8)$$

式中, $SD_{g2v,t}$ 和 $SD_{v2g,t}$ 分别是 t 时段的充电量和放电电量; $p_{g2v,t}$ 和 $p_{v2g,t}$ 分别为 t 时段电动汽车充电和放电价格; $I_{i,t}$ 为电池充放电状态, 放电为-1, 充电为+1, 不充电也不放电为 0; $D_{i,t}(I_{i,t}, I_{i,t-1})$ 表示 $t-1$ 时刻到 t 时刻第 i 辆电动汽车电池状态变化的损耗成本; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, \delta$ 为电池消耗系数. $D_{i,t}(I_{i,t}, I_{i,t-1})$ 的第一部分表示快速充放电对电池的损耗, 第二部分表示充放电模式变换时电池的损耗, 第三部分表示过度放电会损害电池, 第四部分是一个常数. 通常取 $\delta = 0.2$.

3.2 经济调度模型

经济调度模型中的总成本包含发电成本、备用成本、失负荷成本、污染排放成本和弃风成本, 其中备用成本包含购买备用成本、实际调用备用成本和电动汽车充放电调度成本. 该调度模型还考虑了系统负荷预测误差和机组故障等不确定性因素.

$$\min F_2 = \sum_{t=1}^T (C_t^g + C_t^r + C_t^{\text{int}} + C_t^{\text{pl}} + C_t^w) \quad (9)$$

$$\text{发电成本: } C_t^g = \sum_{i=1}^n (a_i P_{gi,t}^2 + b_i P_{gi,t} + c_i) \quad (10)$$

$$\text{备用成本: } C_t^r = p_{r,t} D_{r,t} + p_{re,t} D_{re,t} + p_{v,t} SD_{v2g,t} \quad (11)$$

$$\text{失负荷成本: } C_t^{\text{int}} = E_{\text{ens},t} \cdot V_{\text{oll},t} \quad (12)$$

$$\text{污染排放成本: } C_t^{\text{pl}} = p_{\text{pol},t} \cdot [\sum_{i=1}^n e(P_{gi,t}) + e(D_{re,t})] \quad (13)$$

$$e(P_{gi,t}) = \alpha_i P_{gi,t}^2 + \beta_i P_{gi,t} + \gamma_i + \delta_i e^{\varepsilon_i P_{gi,t}} \quad (14)$$

$$\text{弃风成本: } C_t^w = \begin{cases} P_{e,t} \cdot [P_{w,t} - P_{ew,t}], & P_{w,t} > P_{ew,t} \\ 0, & P_{w,t} \leq P_{ew,t} \end{cases} \quad (15)$$

式中, F_2 为系统经济调度总成本($T=24h$); n 为机组数量; a_i , b_i 和 c_i 为机组 i 的成本系数; $P_{gi,t}$ 为发电机 i 在 t 时段出力; $D_{r,t}$ 为购买备用容量, $D_{re,t}$ 为实际调用备用容量, $SD_{v2g,t}$ 为车辆放电调度量; $p_{r,t}$ 、 $p_{re,t}$ 和 $p_{v,t}$ 为其对应的价格; $E_{ens,t}$ 为失负荷量; $V_{oll,t}$ 为失负荷价值; α_i 、 β_i 、 γ_i 、 δ_i 、 ε_i 为机组 i 的 NO_x 排放量的特征系数; $p_{pol,t}$ 为污染排放价格. $p_{e,t}$ 为弃风价格; $P_{w,t}$ 是 t 时段的实际风能输出; $P_{ew,t}$ 是计划风能输出.

模型的求解方法如下:

1) 当 $P_{w,t} \leq P_{ew,t}$ 时, 风机输出真实风能, 没有弃风成本; 当 $P_{w,t} > P_{ew,t}$ 时, 风机输出计划风能, 弃风成本不为零. 假设风速服从 Weibull 分布.

2)

$$\begin{cases} D_{h,t} = D_{l,t} + \Delta D_{l,t} + D_{v,t} - \sum_{i=1}^n P_{gi,t} d_{i,t} - D_{v,t} - P_{w,t}, & P_{w,t} \leq P_{ew,t} \\ D_{h,t} = D_{l,t} + \Delta D_{l,t} + D_{v,t} - \sum_{i=1}^n P_{gi,t} d_{i,t} - D_{v,t} - P_{ew,t}, & P_{w,t} > P_{ew,t} \end{cases} \quad (16)$$

当 $D_{h,t} < 0$ 时, 表示供大于需, 不需要调用备用容量, 也没有失负荷量, 电网可以储存剩余的电量. $D_{h,t} > 0$ 则调用车辆充放电量与备用容量, 若全部调用备用容量与车辆可调度量还不满足负荷需求, 将产生失负荷量.

3) 本模型还需考虑机组停运状态数和系统负荷波动的影响, 第 t 时刻, 随机产生负荷波动 $\Delta P_{l,t}$ 与机组 i 的停运状态数 $d_{i,t}$. 其中, $\Delta P_{l,t}$ 服从正太分布 $N(0, \sigma_l^2)$; 随机产生一个服从 $[0,1]$ 内均匀分布的伪随机数 w_i , 若 $w_i \leq \gamma_i$, 则机组 i 的停运状态为 0, 表示机组故障停运, 否则机组的停运状态为 1, 表示机组正常运行, γ_i 为强迫停运率.

3.3 约束条件

1) 系统功率平衡约束:

$$\sum_{i=1}^n P_{gi,t} + P_{ew,t} = D_{l,t} + P_{c,t} \quad (17)$$

式中, $D_{l,t}$ 是不包含电动汽车的 t 时刻的负荷量, $P_{c,t}$ 为 t 时刻车辆集群的总充电功率.

2) 发电机运行约束、风机出力约束和购买备用约束:

$$P_{gi,\min} \leq P_{gi,t} \leq P_{gi,\max} \quad (18)$$

$$0 \leq P_{w,t} \leq P_{w,r} \quad (19)$$

$$D_{r,t} \geq \max\{P_{gi,t}\} \quad (20)$$

式中, $P_{gi,\max}$ 和 $P_{gi,\min}$ 为机组出力的最大值和最小值; $P_{w,r}$ 是额定风能输出.

3) 车辆充放电约束:

$$E_{\min,i} \leq E_{i,t} + SD_{g2v,i,t} \cdot \eta_c / S_i - SD_{v2g,i,t} / \eta_d / S_i \leq E_{\max,i} \quad (21)$$

4) 车辆充电需求约束:

$$\sum_{t=1}^T [SD_{g2v,i,t} \cdot \eta_c - SD_{v2g,i,t} / \eta_d] = S_i \cdot (E_{\max,i} - E_{0,i}) \quad (22)$$

4 算例仿真

仿真计算以 IEEE30 节点系统为例, 该系统有 6 个机组, 假设该系统有 10000 辆电动汽车参与经济调度, 系统具体参数见文献[3]. 采用图 1 所示的分时电价. NSGA-II 算法的参数选择如下: 个体数为 200, 交叉率为 0.9, 变异率为 0.1. 设定最大迭代次数为 550 代, 当自适应度的平均值改变已经小于设定的阈值时将停止迭代. 重复运行 1000 次. 由图 2 中的迭代曲线图可知, 当迭代次数在 500 代左右时结束计算.

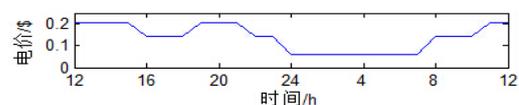


图 1 分时电价

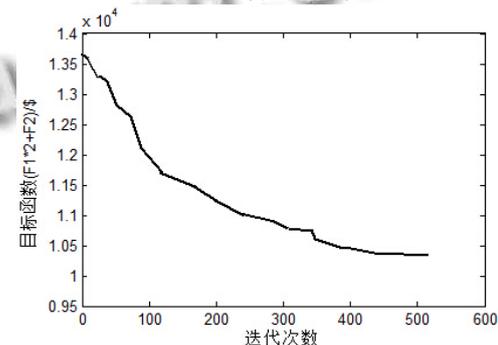


图 2 迭代曲线

得到最优的 pareto 解集, 适当选取其中一组解来分析电动汽车参与经济调度的实际效果. 假设选择电动汽车车主成本和经济调度成本权重为 2:1 的那组解, 则各台发电机、风机输出能量和购买备用容量如图 3 所示. 由图可知, 机组 1 在 11 时发生故障, 输出为 0; 参数相似的机组 3,4,5,6 的输出能量和购买备用容量接

近. 因为购买备用容量必须大于任何一台发电机, 如果其中一台发电机的输出高于其他发电机很多, 则会造成购买备用容量成本增加, 因此才使得参数相似的发电机组输出和备用容量购买量接近, 以减小总成本.

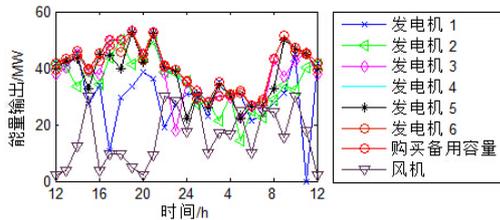


图 3 各台发电机、风机输出能量和购买备用容量

当电动汽车无序充电(即在电动汽车接入电网的第一时刻开始充电, 直到充满才停止充电)时, 经济调度的总成本为 22753.07\$, 电动汽车用户总成本为 10467\$. 当电动汽车作为负荷侧的备用容量参与有序的充放电调度之后, 经济调度的总成本为 21138.65\$, 电动汽车用户总成本为-6339.5\$, 这表示参与有序充放电的电动汽车用户能获得 6339.5\$ 的盈利.

由图 4 可知, 电动汽车有序充放电可以减小负荷峰谷差, 提高电力系统运行的稳定性.

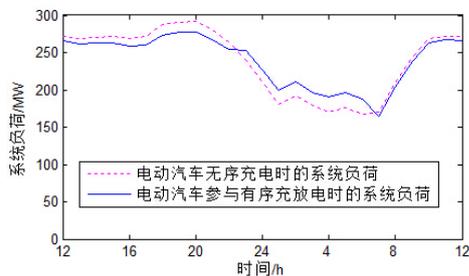


图 4 电动汽车无序充电和有序充放电时的系统负荷

5 结语

电动汽车通过有序充放电来作为经济调度时的备用容量, 结合 NSGA-II 算法对模型求解后, 得到系统各发电机、风机、备用容量、和电动汽车集群的输出能量. 可知有序充放电调度可以节省经济调度成本和车主充电成本, 也可以起到削峰填谷的作用, 提高系统运行的稳定性与安全性.

参考文献

- 1 Qian KJ, Zhou CK, Malcolm, Yuan Y. Modeling of load demand due to EV battery charging in distribution systems. IEEE Trans. on Power System, 2011, 26(2): 802-810.
- 2 Hetzer J, Yu DC, Bhattarai K. An economic dispatch model incorporating wind power. IEEE Trans. on Energy Conversion, 2008, 23(2): 603-611.
- 3 Tong SF, Zhang YB, Qi J. Impact of electric vehicles as interruptible load on economic dispatch incorporating wind power. International Conference on Sustainable Power Generation and Supply(SUPERGEN), 2012.
- 4 高赐威,张亮.电动汽车充电对电网影响的综述.电网技术, 2011,35(2):127-131.
- 5 王召旭,周明,吴迪等.风电并网电力系统动态经济调度问题.现代电力,2011,28(2):37-42.