

考虑电动汽车规模化入网的动态经济调度

何明杰¹, 彭春华¹, 曹文辉¹, 辛建波², 王世舟³

(1. 华东交通大学 电气与电子工程学院, 江西 南昌 330013;

2. 江西省电力科学研究院, 江西 南昌 330006; 3. 南车株洲电力机车有限公司, 湖南 株洲 412000)

摘要: 构建含有插电式混合动力电动汽车(PHEVs)充放电的动态经济调度数学模型, 以社会总成本(机组燃煤费用、启停费用、废气的排放成本、PHEVs用户的经济效益)最小为目标函数, 并引入相应的约束条件。提出一种双种群带精英学习策略的微分进化算法, 以求出该模型的最优调度方案。10机系统仿真结果表明, 借助合理的发电计划, PHEVs的规模化入网能够实现对日负荷“削峰填谷”的作用。

关键词: 电动汽车; 电力系统; 入网; 成本; 动态经济调度; 微分进化算法; 模型

中图分类号: TM 73; U 469.72

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.09.015

0 引言

随着全球能源危机的不断加剧, 以石油资源为主的一次能源日益枯竭, 温室效应和大气污染日趋严重, 各国政府已经逐渐认识到节能减排对人类社会可持续性发展的重要性。电动汽车具有电代油、零排放、噪音低等特点, 因此它是解决能源和环境问题的重要手段。电动汽车产业的发展是缓解全球能源危机和气候变暖问题的重要举措, 也是中国建设坚强智能电网的有机组成部分^[1]。

插电式混合动力电动汽车 PHEVs(Plug-in Hybrid Electric Vehicles)在充电时可以当作一个负荷, 而在其闲置时又可以当作分布式电源把电能反馈给电网^[2]。然而 PHEVs的大规模入网会给电力系统的经济、稳定以及安全运行带来新的挑战^[3-4]。文献[5]提出了 PHEVs“调度控制中心”这一概念, 文中指出参与 PHEVs调度的车辆必须提前一天向调度中心提出入网申请, 从而调度中心可以制定后一天的调度计划。文献[6]指出电动汽车采用有序的充电策略会提高电能质量。因此如果不对 PHEVs的充放电加以适当的控制, PHEVs大量接入可能会对电网产生一定的影响。

动态经济调度考虑的是不同时间断面的耦合性, 比静态经济调度更符合电力系统的实际运行^[7]。考虑电动汽车入网的动态经济调度这一方向在国内外已经有一些研究: 例如文献[8]构建了计及可入网电动汽车的电力系统机组最优组合模型; 文献[9]建立了电动汽车入网以及计及安全约束的机组模型,

最后分别采用 AIMMS 商业软件对模型进行求解; 文献[10]构建了含电动汽车放电的数学模型, 然后用粒子群算法对其进行了求解, 但是模型中只是简单地把电动汽车看作分布式电源, 这样有失偏颇。

考虑电动汽车充放电的动态经济调度模型是一个非线性、高维、多约束的问题, 采用常规的算法比较难以解决。微分进化 DE(Differential Evolution)算法是一种高效的智能算法, 其性能被证明要优于粒子群算法、进化策略、遗传算法等其他算法^[11]。但 DE算法在进化后期常会因种群中的个体失去多样性而陷入局部最优, 对于高度复杂的优化问题难以找到全局最优解。因此, 本文对 DE 算法进行了改进, 提出一种双种群带精英学习策略的微分进化(BESDE)算法, 并对所提出的模型进行求解, 结果表明, BESDE算法比 DE 算法能够得到更好的结果。

1 电动汽车规模化入网的动态调度模型

1.1 目标函数

电动汽车入网调度模型中应该考虑的问题主要有机组的发电成本、机组的启停成本、废气的排放成本以及 PHEVs用户的经济效益。

目标函数可以用式(1)来表示:

$$\min C = \sum_{t=1}^T (C_{f,t} + C_{s,t} + C_{e,t} - C_{\text{phevs},t}) \quad (1)$$

其中, C 为社会总成本; T 为调度时段数; $C_{f,t}$ 为所有机组在 t 时段的燃料成本费用; $C_{s,t}$ 为所有机组在 t 时段的启停费用; $C_{e,t}$ 为所有机组在 t 时段的废气排放成本; $C_{\text{phevs},t}$ 为 PHEVs 用户在 t 时段所收到的经济效益。

a. 机组的燃料成本费用。

$$C_{f,t} = \sum_{i=1}^m U_{i,t} \{a_i + b_i P_{i,t} + c_i P_{i,t}^2 + |g_i \sin[h_i(P_{i,t} - P_i^{\min})]|\} \quad (2)$$

其中, m 为燃煤机组的数量; $U_{i,t}$ 为机组 i 在 t 时段的启停状态, $U_{i,t}=0$ 表示停机, $U_{i,t}=1$ 表示开机; a_i, b_i, c_i

收稿日期: 2012-09-12; 修回日期: 2013-07-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51167005); 江西省教育厅科技项目(GJJ12288); 江西省电力公司科研项目

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51167005), Education Science Research Funds of Jiangxi Province(GJJ12288) and Research Funds of Jiangxi Electric Power Corporation

为机组 i 的能耗特性参数; $P_{i,t}$ 为机组 i 在 t 时段的出力; $|g_i \sin[h_i(P_{i,t} - P_i^{\min})]|$ 为机组 i 的脉动效应的表达式, g_i 、 h_i 为机组 i 的阀点效应参数, $P_i^{\min}$ 为机组 i 的最小出力值^[12]。

b. 机组的启停费用^[13]。

$$C_{s,t} = \begin{cases} C_{s,i}^h & T_{i,\text{off}} \leq X_{i,\text{off}}(t) \leq T_{i,\text{off}} + T_{i,\text{cs}} \\ C_{s,i}^c & X_{i,\text{off}}(t) > T_{i,\text{off}} + T_{i,\text{cs}} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $C_{s,i}^h$ 为机组 i 的热启动成本; $C_{s,i}^c$ 为机组 i 的冷启动成本; $T_{i,\text{off}}$ 为机组 i 的最小连续停运时间; $X_{i,\text{off}}(t)$ 为机组 i 在 t 时段连续停运的时间; $T_{i,\text{cs}}$ 为机组 i 的冷启动时间。

c. 废气排放成本。

燃煤机组在发电过程中会产生 CO_2 、 SO_x 和 NO_x 等废气, 废气排放成本可采用式(4)来表示:

$$C_{e,i} = \sum_{i=1}^m U_{i,t} [\alpha_i + \beta_i P_{i,t} + \gamma_i P_{i,t}^2 + \xi_i \exp(\lambda_i P_{i,t})] \quad (4)$$

其中, α_i 、 β_i 、 γ_i 、 ξ_i 、 λ_i 均为机组 i 的排放量特性系数^[14]。

d. PHEVs 用户的经济效益。

$$C_{\text{phevs},t} = N_{\text{dis},t} P_{\text{dis},f_{\text{dis},t}} - N_{\text{chr},t} P_{\text{chr},f_{\text{chr},t}} \quad (5)$$

其中, $N_{\text{dis},t}$ ($N_{\text{chr},t}$) 为在 t 时段接入电网的 PHEVs 放(充)电的数量, P_{dis} (P_{chr}) 为单辆 PHEVs 的放(充)电平均功率, $f_{\text{dis},t}$ ($f_{\text{chr},t}$) 为 PHEVs 在 t 时段的放(充)电电价。

1.2 约束条件

a. PHEVs 总的放(充)电时间约束。

$$\sum_{t=1}^T N_{\text{dis},t} = N_{\text{dis}}^{\max} \quad (6)$$

$$\sum_{t=1}^T N_{\text{chr},t} = N_{\text{chr}}^{\max} \quad (7)$$

其中, $N_{\text{dis}}^{\max}$ ($N_{\text{chr}}^{\max}$) 为一个调度周期内 PHEVs 总的放(充)电小时数。调度中心必须每天向已经申请入网的 PHEVs 发出调度指令。

考虑到电网的网络安全问题, 各时段向电网放(充)电的 PHEVs 数量应满足^[10]:

$$N_{\text{dis},t} \leq N_{\text{dismax},t} \quad (8)$$

$$N_{\text{chr},t} \leq N_{\text{chrmax},t} \quad (9)$$

其中, $N_{\text{dismax},t}$ ($N_{\text{chrmax},t}$) 为 t 时段向电网放(充)电的 PHEVs 的数量上限。

由于在 t 时段内所调度的 PHEVs 的数量不能大于系统中所含 PHEVs 的总数, 所以还要满足:

$$N_{\text{dis},t} + N_{\text{chr},t} \leq N_{\text{phevs}} \quad (10)$$

其中, N_{phevs} 为网络中 PHEVs 的总数。

b. 功率平衡约束。

$$\sum_{i=1}^m U_{i,t} P_{i,t} + P_{\text{dis}} N_{\text{dis},t} = P_{\text{D},t} + P_{\text{chr}} N_{\text{chr},t} \quad (11)$$

其中, $P_{\text{D},t}$ 为 t 时段的系统负荷。

c. 旋转备用约束。

为了保证电力系统的安全运行, 必须为电网提供

足够的旋转备用容量。PHEVs 入网后的系统旋转备用约束可表示为:

$$\sum_{i=1}^m U_{i,t} P_i^{\max} + P_{\text{dis}} N_{\text{dis},t} \geq P_{\text{chr}} N_{\text{chr},t} + P_{\text{D},t} + S_{\text{R},t} \quad (12)$$

其中, $P_i^{\max}$ 为机组 i 的最大输出功率; $S_{\text{R},t}$ 为 t 时段系统旋转备用容量需求。

d. 机组出力约束。

$$P_i^{\min} \leq P_{i,t} \leq P_i^{\max} \quad (13)$$

e. 机组爬坡约束。

$$P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq U_{\text{Ri}} \quad (14)$$

$$P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq D_{\text{Ri}} \quad (15)$$

其中, U_{Ri} 为机组 i 在相邻时段出力允许的最大上升值, D_{Ri} 为机组 i 在相邻时段出力允许的最大下降值。

f. 最小开停机时间约束。

根据机组运行的要求, 所有机组处于运行或停机状态时, 都必须经过一定的时间之后才能停机或重新启动。

$$X_{i,\text{off}}(t) \geq T_{i,\text{off}} \quad (16)$$

$$X_{i,\text{on}}(t) \geq T_{i,\text{on}} \quad (17)$$

其中, $X_{i,\text{on}}(t)$ 为机组 i 在 t 时段的连续运行时间, $T_{i,\text{on}}$ 为机组 i 的最小连续运行时间。

2 模型求解

2.1 改进的 DE 算法

DE 算法在 1995 年由 Storn 和 Price 提出, 具有收敛速度快、鲁棒性好、操作简单等特点, 近年来已得到了广泛的认可和应用^[15]。标准的 DE 算法主要包括了变异、交叉和选择等操作。其中变异可以表示为:

$$\mathbf{v}_i^{G+1} = \mathbf{x}_{r_1}^G + F(\mathbf{x}_{r_2}^G - \mathbf{x}_{r_3}^G) \quad (18)$$

其中, $\mathbf{x}_{r_1}^G$ 为随机选取的第 r_1 个个体或者是当前最优的个体, $\mathbf{v}_i^{G+1}$ 为 $\mathbf{x}_{r_1}^G$ 对应的变异个体, F 为缩放因子, $\mathbf{x}_{r_2}^G$ 和 $\mathbf{x}_{r_3}^G$ 为随机选取的第 r_2 个和 r_3 个个体, $i \neq r_1 \neq r_2 \neq r_3$ 。

交叉操作可以表示为:

$$u_{ij}^{G+1} = \begin{cases} v_{ij}^{G+1} & \text{rand} \leq C_R \\ x_{ij}^G & \text{其他} \end{cases} \quad (19)$$

其中, $C_R \in [0, 1]$ 为交叉概率, 用来控制种群的多样性, 从而跳出局部最优; x_{ij}^G 为当前第 i 个个体的第 j 个实数参量; v_{ij}^{G+1} 为 x_{ij}^G 对应的变异个体; u_{ij}^{G+1} 为个体经过交叉操作之后产生的新个体; rand 为 $[0, 1]$ 之间的随机数。

对于选择操作, DE 算法采用“贪婪”选择模式:

$$\mathbf{x}_i^{G+1} = \begin{cases} \mathbf{u}_i^{G+1} & f(\mathbf{u}_i^{G+1}) < f(\mathbf{x}_i^G) \\ \mathbf{x}_i^G & \text{其他} \end{cases} \quad (20)$$

其中, $f(\mathbf{u}_i^{G+1})$ 和 $f(\mathbf{x}_i^G)$ 为目标函数值, $\mathbf{x}_i^G$ 为当前个体, $\mathbf{u}_i^{G+1}$ 为经过交叉操作后产生的新个体, $\mathbf{x}_i^{G+1}$ 为经过选

择操作后得到的个体。

标准的 DE 算法采用的变异策略主要有 DE/rand/1、DE/rand/2、DE/best/2、DE/rand/1、DE/current-to-rand/1、DE/current-to-best/1 等。DE/rand/2、DE/current-to-rand/1 的变异基向量是随机选择的,所以全局搜索能力比较强,但是收敛速度比较慢^[16]。而 DE/best/1 和 DE/current-to-best/1 是以当前最优值作为变异基向量,因此收敛速度比较快,但是全局搜索能力较弱^[17]。因此,本文对 DE 算法进行如下改进。

a. 双种群进化策略。

将种群分为数量相等的 A 和 B 这 2 个子种群^[18],子种群 A 采用 DE/rand/1 的变异策略,这样群体 A 在进化的过程中可以保持种群的多样性,对解空间进行全局的搜索;子种群 B 采用的是 DE/best/2 的进化策略,这样可以在进化的时候根据当前最优解进行局部搜索。当 A 和 B 分别进化 nl 代(l 为进化的代数,本文取 50 代; $n=1,2,\dots$)之后,用 A 中的最好个体代替 B 中的最差个体,同样用 B 中的最好个体代替 A 中的最差个体,这样可以使种群之间实现信息的交换,从而在保证整个种群有广泛的全局搜索能力的同时也可以有精细的局部寻优能力。

b. 精英学习策略。

DE 算法在进化的后期,由于种群中的所有个体相似度很高,因而在变异操作中差分项趋于零,最优个体进化缓慢而很难跳出局部最优解。根据文献^[19]的启示,可以对种群中的最优个体采用如下精英学习策略进行更新,以跳出局部最优。具体步骤如下。

步骤 1 种群进化一定的代数之后,如果 $H(q)=H(q-k)$, q 为当前迭代的次数, k 为连续未更新的代数,本文取 80 代, H 为当代搜索到的全局最优解的值。

步骤 2 随机分别选取种群 A、B 中最优个体中的一维 g^d ,按式(21)进行变换:

$$g^{d+1}=g^d+(U_{\max}^d-U_{\min}^d)\text{Gamma}(\alpha,\beta) \quad (21)$$

其中, $U_{\max}^d$ 和 $U_{\min}^d$ 为 g^d 上限值和下限值; g^{d+1} 为经过变换后的实数参数; α 和 β 为 Gamma 分布的形状参数和尺度参数,本文取 $\beta=0.5$, α 按式(22)进行自适应调整。

$$\alpha=\alpha_{\text{initial}}-(\alpha_{\text{initial}}-\alpha_{\text{final}})q/q_{\max} \quad (22)$$

其中, $\alpha_{\text{initial}}=0.8$, $\alpha_{\text{final}}=0.2$, $q_{\max}$ 为最大迭代次数。

步骤 3 假如新个体的适应值小于原来全局最优解的值,那么用新的个体代替当前最优个体,否则与种群中最差个体进行比较,如果比最差个体的适应值小,则用新个体代替最差个体,否则不做任何变化,相关算法流程图见图 1。

2.2 算法实现过程中的关键问题分析

(1) 种群初始化。

电动汽车规模化入网的动态调度模型是一个非

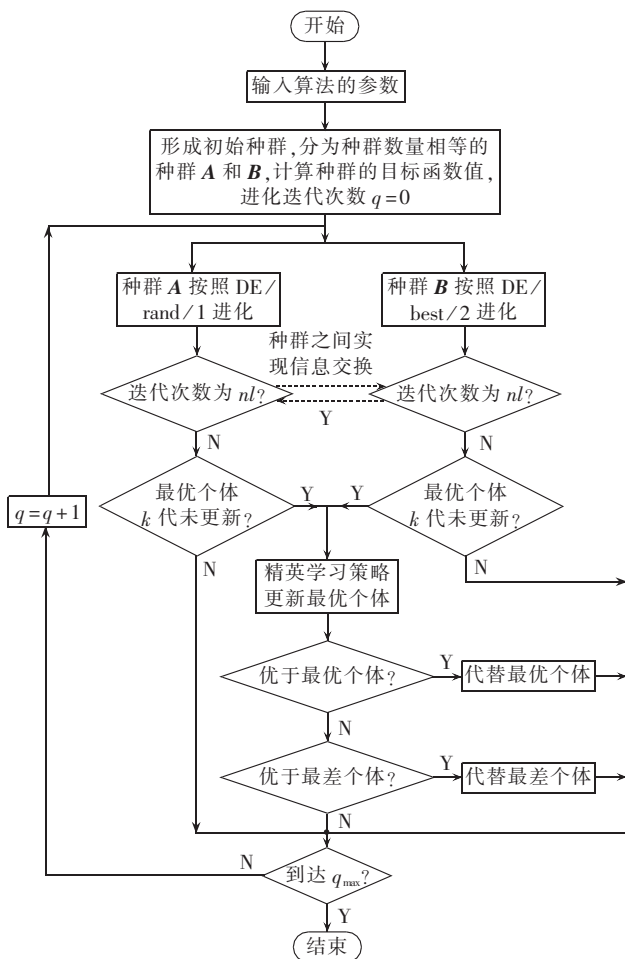


图 1 BESDE 算法的流程图

Fig.1 Flowchart of BESDE algorithm

线性、非凸、高维的优化问题,而且包含了大量的等式约束和不等式约束。对于约束条件的处理,一般是采用罚函数对其进行加罚淘汰,但是当罚函数选择过大时会使算法收敛于局部最优解,而罚函数过小则可能会收敛于不可行解。所以在执行算法时必须对约束条件进行处理,让其在可行域内搜索,从而提高算法的执行效率。

为避免处理等式约束式(6)、(7)和(11)带来的困难,将第 1 台机组与 T 时段安排放(充)电的 PHEVs 数量 $N_{\text{dis},T}(N_{\text{chr},T})$ 作为状态变量^[20],不参与种群编码。把第 1 台机组当作平衡机组,让其在整个调度周期内保持开机状态,其他机组根据各项约束条件由 $t-1$ 时段的机组出力 $P_{i,t-1}(P_{i,t-1}>0$ 和 $P_{i,t-1}=0)$ 来确定 t 时段的机组出力 $P_{i,t}$ 。假设系统中有 m 台机组,调度的总时段为 T ,具体操作如下。

$$\begin{cases} N_{\text{dis},T}=N_{\text{dis}}^{\max}-\sum_{t=1}^{T-1}N_{\text{dis},t} \\ N_{\text{chr},T}=N_{\text{chr}}^{\max}-\sum_{t=1}^{T-1}N_{\text{chr},t} \\ P_{1,t}=P_{D,t}+P_{\text{chr}}N_{\text{chr},t}-P_{\text{dis}}N_{\text{dis},t}-\sum_{i=2}^mU_{i,t}P_{i,t} \end{cases} \quad (23)$$

设初始种群 $U_0=[U_{dis,1}\cdots U_{dis,t}\cdots U_{dis,T-1}\ U_{chr,1}\cdots U_{chr,t}\cdots U_{chr,T-1}\ W_{2,t}\cdots W_{i,t}\cdots W_{m,T}]$, U_0 中的元素均为 $[0,1]$ 随机产生的实数, $U_{dis,t}$ 是用来控制 PHEVs 的放(充)电的数量, $W_{i,t}$ 为控制机组的出力的大小。可根据下面的方法来确定各个时段 PHEVs 放(充)电的数量以及机组各个时段开停机状态和出力情况,其具体操作如下。

a. t 时段 PHEVs 放(充)电的车辆数可由式(24)来确定:

$$\begin{cases} N_{dis,t}=U_{dis,t}N_{dismax,t} \\ N_{chr,t}=U_{chr,t}(N_{phevs}-N_{dis,t}) \end{cases} \quad (24)$$

b. 如果 $P_{i,t-1}>0$, 说明机组 i 当前处于运行状态。如果 $X_{i,on}(t-1)<T_{i,on}$, 机组不能停机, 此时 t 时段的出力范围由式(25)确定:

$$\begin{cases} P_{i,t}^{max}=\min(P_i^{max},P_{i,t-1}+U_{Ri}) \\ P_{i,t}^{min}=\max(P_i^{min},P_{i,t-1}-D_{Ri}) \end{cases} \quad (25)$$

如果 $X_{i,on}(t-1)\geq T_{i,on}$, 机组可以停机, 此时 t 时段的出力范围由式(26)来确定:

$$\begin{cases} P_{i,t}^{max}=\min(P_i^{max},P_{i,t-1}+U_{Ri}) \\ P_{i,t}^{min}=\max(0,P_{i,t-1}-D_{Ri}) \end{cases} \quad (26)$$

同理,对于 $P_{i,t-1}=0$ 的情况可以做类似的处理。由上式所求得各个时段机组出力的范围可以由式(27)、(28)来确定机组出力大小,本文假设所有机组刚启动时出力随机产生。

$$P_{i,t}=P_{i,t}^{min}+W_{i,t}(P_{i,t}^{max}-P_{i,t}^{min}) \quad (27)$$

如果 $P_{i,t}<P_{i,t}^{min}$, 则:

$$P_{i,t}=0 \quad (28)$$

初始化种群的流程图如图 2 所示。

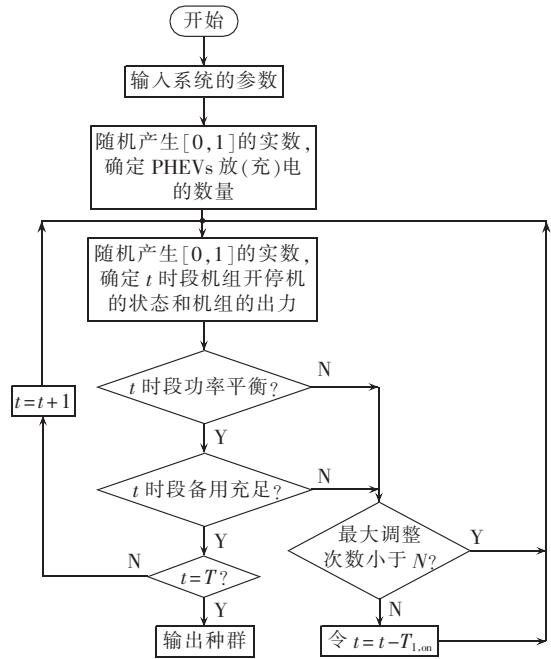


图 2 初始化群体的流程图

Fig.2 Flowchart of population initialization

(2) 违反程度的计算。

经过上面约束条件的处理,可以基本保证算法在可行域内搜索。由于第 1 台机组没有参与种群的编码,所以首先必须对其在各个时段是否满足机组爬坡约束式(14)、(15)进行判断,如果不满足约束条件还必须对其进行加罚,如式(29)所示:

$$\min C=f(U,X)+\delta\sum_{i=1}^T\max[0,(P_{1,t}-P_{1,t-1})-U_{Ri},(P_{1,t-1}-P_{1,t})-D_{Ri}] \quad (29)$$

其中, U 、 X 分别为控制变量和状态变量; δ 为罚因子,一般随迭代次数的增加而增加^[21],本文取 $\delta=\chi+(\eta-\chi)q/q_{max}$, χ 和 η 分别为 70 和 2000。

(3) 算法流程图。

考虑电动汽车规模化入网的动态经济调度流程图如图 1 所示。

3 算例分析

3.1 算例描述

本文采用 10 机系统进行仿真计算,该系统含有 10 台机组和 60 000 辆可调度的 PHEVs,50% 的 PHEVs 可以向电网输送电能。这里假设申请调度的 PHEVs 向电网一天内放(充)总电量为定值,且充、放电各一次。每辆 PHEVs 平均充电功率为 1.8 kW,充电时长为 6 h,充电总电量为 10.8 kW·h;平均放电功率为 1.7 kW,放电时长为 6 h,放电总电量为 10.2 kW·h^[22]。单位时间内 PHEVs 充放电的数量不能超过总数的 95%,负荷和机组的参数见文献[23]。一天内 24 时段放(充)电实时电价如表 1 所示。

表 1 放(充)电的实时电价
Tab.1 Spot price of discharging(charging)

时段	放(充)电 电价/[美分· (kW·h) ⁻¹]	时段	放(充)电 电价/[美分· (kW·h) ⁻¹]	时段	放(充)电 电价/[美分· (kW·h) ⁻¹]
1	8.5(8.2)	9	8.5(8.2)	17	9.0(8.2)
2	8.5(8.2)	10	10.2(8.2)	18	8.5(8.2)
3	8.5(8.0)	11	12(8.2)	19	8.5(8.2)
4	8.5(8.0)	12	9.8(8.2)	20	9.8(8.2)
5	8.5(8.2)	13	8.5(8.2)	21	9.0(8.2)
6	8.5(8.5)	14	12(8.2)	22	9.0(8.2)
7	8.5(8.2)	15	12(8.2)	23	8.5(8.8)
8	8.5(8.2)	16	12(8.2)	24	8.5(8.6)

3.2 算例分析

由表 2 可知 PHEVs 的放电时间段主要是在 10—12、14—16 和 20 时段,通过分析可以看出这些时间点的主要特征是负荷大,而且这些时段的放电电价较高,基本上都在 9.8 美分/(kW·h)以上;而 PHEVs 的充电时段主要是在 1—5、16、17 和 24 时段,原因是晚上用电负荷较小(主要分布在负荷为 1 050 MW 以下的时间点充电),但是 23 时段负荷为 900 MW,

表 2 PHEVs 入网后的最优调度方案
Tab.2 Optimal dispatch schedule considering PHEVs

时段	机组出力 /MW										放电	充电
	机组 1	机组 2	机组 3	机组 4	机组 5	机组 6	机组 7	机组 8	机组 9	机组 10	PHEVs 数量	PHEVs 数量
1	207.16	191.99	130.00	130.00	143.45	0	0	0	0	0	0	57000
2	225.24	209.33	130.00	130.00	158.03	0	0	0	0	0	0	57000
3	273.06	257.54	130.00	130.00	162.00	0	0	0	0	0	0	57000
4	283.05	267.55	130.00	130.00	162.00	80.00	0	0	0	0	0	57000
5	288.80	273.15	130.00	130.00	162.00	80.00	0	0	0	0	0	35528
6	306.64	291.36	130.00	130.00	162.00	80.00	0	0	0	0	0	0
7	331.60	316.40	130.00	130.00	162.00	80.00	0	0	0	0	0	0
8	356.52	341.48	130.00	130.00	162.00	80.00	0	0	0	0	0	0
9	363.96	349.04	130.00	130.00	162.00	80.00	85.00	0	0	0	0	0
10	399.23	384.46	130.00	130.00	162.00	80.00	85.00	0	0	0	17242	0
11	414.74	399.81	130.00	130.00	162.00	80.00	85.00	0	0	0	28500	0
12	422.40	408.28	130.00	130.00	162.00	80.00	85.00	33.87	0	0	28500	0
13	424.16	408.87	130.00	130.00	162.00	80.00	64.97	0	0	0	0	0
14	382.23	367.32	130.00	130.00	162.00	80.00	0	0	0	0	28500	0
15	332.20	317.35	130.00	130.00	162.00	80.00	0	0	0	0	28500	0
16	282.84	270.56	130.00	130.00	162.00	80.00	0	0	0	0	28500	31500
17	288.41	272.63	130.00	130.00	162.00	80.00	0	0	0	0	0	35021
18	306.67	291.33	130.00	130.00	162.00	80.00	0	0	0	0	0	0
19	314.14	298.86	130.00	130.00	162.00	80.00	85.00	0	0	0	0	0
20	397.19	381.37	130.00	130.00	162.00	80.00	85.00	0	0	0	20258	0
21	373.98	359.07	130.00	130.00	162.00	80.00	64.95	0	0	0	0	0
22	316.75	301.27	130.00	130.00	162.00	59.98	0	0	0	0	0	0
23	246.79	231.21	130.00	130.00	162.00	0	0	0	0	0	0	0
24	225.73	210.17	130.00	130.00	158.01	0	0	0	0	0	0	29951

并没有安排 PHEVs 在此时段充电,主要原因是此时段充电电价达到了一天内的最高的 8.8 美分/(kW·h)。综上可知,影响 PHEVs 调度的主要因素是该时段负荷大小以及放(充)电价,而且当系统中的 PHEVs 在该渗透量下,影响放电调度更多的是该时段电价的高低,而影响充电调度更多的则是该时段负荷的大小。

对于机组方面,机组 1—5 在所有调度时段都保持开机状态(机组容量大而且启停时间较长,启停费用较高,不宜频繁开停机)。机组 1、2 的出力较大,占全部机组出力的 50% 左右(机组 1、2 爬坡速率比较快,主要是当作基荷以应对负荷的突然变化);机组 3—5 在所有时段的功率输出几乎都在最大状态(这些机组的运行成本比较低,满功率运行可以降低总的运行成本);机组 6—8 主要是工作在负荷较大的时段,而且几乎也是满功率运行(这些机组主要是调峰作用);机组 9、10 没有开机,原因是负荷较小的时段不用开机,从而降低成本,在负荷较大的时段 PHEVs 放电作用又使它们避免了开机。而且由表 2 可知,PHEVs 基本上都是在白天放电(尤其在峰荷时段),因此该时段机组的废气排放量也极大减少了,从而提高了环保效益。

从图 3 可以看出,由于 PHEVs 接入电网,使日负荷曲线比未接入时显得“平缓”,这也说明了 PHEVs 的并网可以对日负荷产生“削峰填谷”的作用。

图 3 中还分别给出了系统中含有 50000~90000

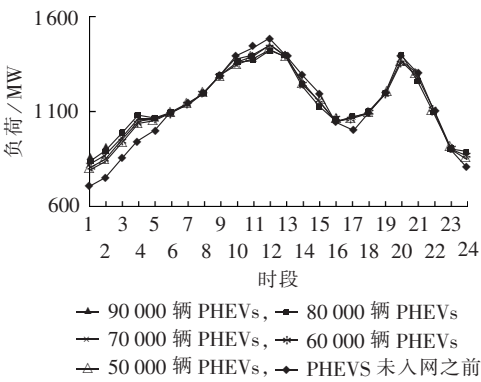


图 3 不同 PHEVs 渗透量下日负荷曲线
Fig.3 Daily load curve for different PHEV penetrations

辆 PHEVs 时负荷曲线的变化,由图可知随着 PHEVs 的增加,日负荷曲线变得越来越“平缓”。其中负荷曲线变化最大的是在 1—4 时段(日负荷最小的时段),不同渗透量下的 PHEVs 在这些时间段充电数量均到达了最大值 $N_{chmax,t}$ 。

图 4 给出了在不同 PHEVs 渗透量下负荷曲线的 2 个“极值点”的放电数量,即 12 时段(日负荷最高点)和 20 时段(日负荷次高点)的放电数量(图 4 中纵坐标为该时间段放电数量 $N_{dis,t}$ 与 $N_{dismax,t}$ 的比值)。由图可知,12 时段除了渗透量为 50000 和 60000 时放电数量达到 $N_{dismax,t}$ ($N_{dis,t}$ 与 $N_{dismax,t}$ 的比值为 1),其他渗透量下随着 PHEVs 的增加放电数量反而有减

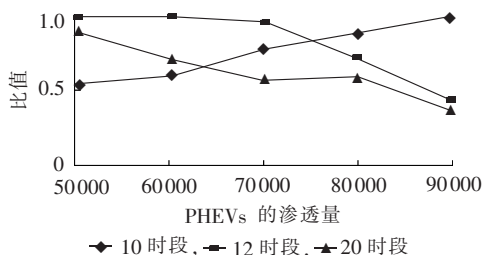


图 4 不同 PHEVs 渗透量下各“极值”时段放电数量

Fig.4 Discharge amount of peak periods for different PHEV penetrations

少的趋势,而当系统中为 90 000 辆 PHEVs 时,只有 18 781 辆放电,为 $N_{dismax,t}$ 的 44%;20 时段与 12 时段一样,PHEVs 的放电数量亦随着渗透量的增加呈减少的趋势,仅在 10 时段放电数量将随着渗透量的增加而增加(渗透量为 90 000 时达到 $N_{dismax,t}$)。通过分析可以发现,影响这些时段 PHEVs 放电数量的主要原因是该时段的放电电价(10 时段的放电电价为 10.2 美分/(kW·h),12 和 20 时段的放电电价为 9.8 美分/(kW·h),随着 PHEVs 渗透量的增加,如果调度过多的 PHEVs 在 12 和 20 时段放电会增加目标函数的总成本。

图 5 分别给出了 DE 和 BESDE 算法的寻优曲线,DE 算法设置为 400 个种群,BESDE 中的 A 和 B 种群数量均为 200。由图可知,DE 算法求出的最小社会成本为 \$789 885.87,而 BESDE 算法求出的结果为 \$785 974.65。DE 算法在进化后期由于种群间失去了多样性,很难跳出局部最优解。而 BESDE 算法由于采取双种群进化,群体之间信息交换策略,从而使种群既有全局搜索能力又有局部搜索能力,而且在进化后期通过对最优个体的学习,使之跳出局部最优解,最终找出全局最优解。

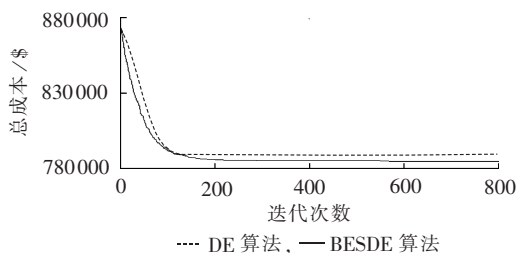


图 5 BESDE 和 DE 算法的寻优曲线

Fig.5 Optimizing curves of BESDE and DE algorithms

4 结论

本文建立了 PHEVs 大规模入网的动态经济调度模型,该模型以社会总成本最低为目标函数,采用 BESDE 算法对其进行求解。并且以 10 机系统对其进行仿真,结果表明,PHEVs 的规模化入网可以实现

对电网负荷“削峰填谷”的作用,而不同规模的 PHEVs 对日负荷曲线的影响也大不相同。

本文主要研究的是 PHEVs 的集中调度,但是随着 PHEVs 用户增加,PHEVs 的入网节点的选取可能会影响整个系统的潮流分布,一些涉及到电网安全方面的问题会变得越来越突出,所以在保证网络安全的前提下为 PHEVs 选择合适的入网节点是今后需要解决的问题。

参考文献:

- [1] 朱成章. 对我国发展纯电动汽车的质疑与思考[J]. 中外能源, 2010,15(9):11-15.
ZHU Chengzhang. Questioning and reflections on plan to development Battery Electric Vehicles (BEV) in China[J]. Sino-global Energy,2010,15(9):11-15.
- [2] HAN S,SEZAKI K. Development of an optimal vehicle-to-grid aggregator for frequency regulation[J]. IEEE Trans on Smart Grid,2010,1(1):65-72.
- [3] TAYLOR J,MAITRA A,ALEXANDER M,et al. Evaluations of plug-in hybrid electric vehicles on regional electricity suppliers [C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting. Calgary, AB,Canada:[s.n.],2009:1-6.
- [4] DOW L,MARSHALL M,XU L,et al. A novel approach for evaluating the impact of electric vehicles on the power distribution system[C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting. Minneapolis,MN,USA:[s.n.],2010:1-6.
- [5] GUILLE C,GROSS G. A conceptual framework for the Vehicle-to-Grid (V2G) implementation[J]. Energy Policy,2009,37(11): 4379-4390.
- [6] CLEMENT N K,HAESSEN E,DRIESEN J. The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid [J]. IEEE Trans on Power Systems,2010,25(3):371-380.
- [7] XIA X,ELAIW A M. Optimal dynamic economic dispatch of generation:a review[J]. Electric Power Systems Research,2010, 80(8):975-986.
- [8] 陆凌蓉,文福拴,薛禹胜,等. 计及可入网电动汽车的电力系统机组最优组合[J]. 电力系统自动化,2011,35(21):16-20.
LU Lingrong,WEN Fushuan,XUE Yusheng,et al. Unit commitment in power systems with plug-in electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(21):16-20.
- [9] 蔡秋娜,文福拴,薛禹胜,等. 基于 SCUC 的可入网混合动力汽车优化调度方法[J]. 电力系统自动化,2012,36(1):38-46.
CAI Qiuna,WEN Fushuan,XUE Yusheng,et al. An SCUC-based optimization approach for power system dispatching with plug-in hybrid electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012,36(1):38-46.
- [10] SABER A Y,VEHEYAGAMOORTHY G K. Intelligent unit commitment with vehicle-to-grid:acost-emission optimization[J]. Journal of Power Sources,2010,195(1):898-911.
- [11] VESTERSTROM J,THOMSEN R. A comparative study of differential evolution,particle swarm optimization,and evolutionary algorithms on numerical benchmark problems[C]// IEEE Congress on Evolutionary Computation. Portland,USA:[s.n.],2004: 1980-1987.
- [12] VICTOIRE T A A,JEYAKUMAR A E. Reserve constrained dynamic dispatch of units with valve-point effects[J]. IEEE

- Trans on Power Systems,2005,20(3):1273-1282.
- [13] 孙力勇,张焰,蒋传文. 基于矩阵实数编码遗传算法求解大规模机组组合问题[J]. 中国电机工程学报,2006,26(2):82-87.
- SUN Liyong,ZHANG Yan,JIANG Chuanwen. A solution to the unit commitment problem based on matrix real-coded genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(2):82-87.
- [14] TALAQ J H,EL-HAWARY F,EL-HAWARY M E. A summary of environmental/economic dispatch algorithms[J]. IEEE Trans on Power Systems,1994,9(3):1508-1516.
- [15] STRON P K. Differential evolution-simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces [J]. Journal of Global Optimization,1997,11:341-359.
- [16] MENDES R,MOHAIS A S. DynDE:a differential evolution for dynamic optimization problems[C]//2005 IEEE Congress on Evolutionary Computation. Piscataway,NJ,USA:IEEE Press,2005:2808-2815.
- [17] 彭春华,孙惠娟,郭剑峰. 求解 PMU 多目标优化配置问题的非劣排序微分进化算法[J]. 控制理论与应用,2009,26(10):1075-1080.
- PENG Chunhua,SUN Huijuan,GUO Jianfeng. Non-dominated sorting differential evolution algorithm for multi-objective optimal PMU placement[J]. Control Theory & Applications,2009,26(10):1075-1080.
- [18] PENG Chunhua,SUN Huijuan,GUO Jianfeng,et al. Dynamic economic dispatch for wind-thermal power system using a novel bi-population chaotic differential evolution algorithm[J]. Electrical Power and Energy Systems,2012,42(1):119-126.
- [19] ZHAN Zhihui,ZHANG Jun,LI Yun,et al. Adaptive particle swarm optimization[J]. IEEE Trans on Systems,Man,and Cybernetics,Part B: Cybernetics,2009,39(2):1369-1370.
- [20] BASU M. Artificial immune system for dynamic economic dispatch [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems,2010,33(1):1-4.
- [21] 侯云鹤,熊信银,吴耀武,等. 基于广义蚁群算法的电力系统经济负荷分配[J]. 中国电机工程学报,2003,23(3):59-64.
- HOU Yunhe,XIONG Xinyin,WU Yaowu,et al. Economic dispatch of power systems based on generalized ant colony optimization[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(3):59-64.
- [22] PARKS K,DENHOLM P,MARKEL T. Costs and emissions associated with plug-in hybrid electric vehicle charging in the Xcel energy Colorado service territory[EB/OL]. [2007-05-05]. <http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/pdfs/41410.pdf>.
- [23] ZWE-LEE G. Discrete particle swarm optimization algorithm for unit commitment[C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting. Toronto,Canada:[s.n.],2003:418-424.

作者简介:

何明杰(1988-),男,江西南昌人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统优化、电动汽车调度(**E-mail**:49836817@qq.com);

彭春华(1973-),男,江西乐平人,教授,博士,研究方向为电力系统环境/经济调度、新能源发电及并网优化、分布式发电、电力市场运行(**E-mail**:chinapch@163.com);

曹文辉(1984-),男,江西九江人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统优化与控制(**E-mail**:whcao2020@163.com);

辛建波(1970-),男,江西高安人,高级工程师,主要研究方向为新能源(**E-mail**:mandyzhuhai@163.com);

王世舟(1988-),女,湖南湘潭人,工程师,主要研究方向为电力机车运行(**E-mail**:48443064@qq.com)。

Dynamic economic dispatch considering large-scale integration of electric vehicles

HE Mingjie¹,PENG Chunhua¹,CAO Wenhui¹,XIN Jianbo²,WANG Shizhou³

(1. School of Electrical & Electronics Engineering,East China Jiaotong University,Nanchang 330013,China;

2. Jiangxi Electric Power Research Institute,Nanchang 330006,China;

3. CSR Zhuzhou Electric Locomotive Co.,Ltd.,Zhuzhou 412000,China)

Abstract: A mathematic model of economic dispatch considering PHEVs(Plug-in Hybrid Electric Vehicles) is built,which takes the minimum total social cost(unit coal cost,switching cost,exhaust emission cost,PHEV users' economic effect) as its objective function and establishes corresponding constraints. A bi-population differential evolution algorithm with elitist strategy is proposed to solve the model and obtain the optimal dispatch scheme. Simulative results for a 10-generator system show that,the large-scale integration of PHEVs may mitigate the daily peak-load by the reasonable power generation schedule.

Key words: electric vehicles; electric power systems; grid connection; costs; dynamic economic dispatch; differential evolution algorithm; models