

计及电动汽车规模化入网的发电优化调度

针对混合动力汽车（PHEV）规模化入网的动态经济调度问题进行了研究。将各时段的PHEV充放电数量和燃煤机组出力作为决策变量，以机组燃煤费用最小为目标函数，并构造考虑PHEV充放电总量和旋转备用容量的约束条件，提出一种带有动态约束处理的纵横交叉算法，以求出该模型的最优调度方案。纵横交叉算法采用一种双交叉搜索机制，其中横向交叉作为全局优化器，以较大的概率在一半种群构成的超立方体子空间内进行搜索，同时在各异的边缘地带以递减的概率寻优以减少搜索盲区；纵向交叉引入维交叉概念，避免了“维数灾”问题。以10机组系统为算例，证明了所构造模型的可行性和有效性。

孟安波 卢海明 郭壮志/广东工业大学自动化学院



孟安波/副教授

关键词/Keywords

电动汽车·
纵横交叉算法·
机组组合·
动态经济调度·

随着全球能源危机的加剧和一次能源的日益枯竭，开发并利用新型清洁能源来代替传统的化石燃料，以缓解温室效应、改善生态环境是一个必然的趋势。电动汽车具有清洁、节能和环保等优点，其规模化入网是解决环境和能源问题的有效措施，因此合理地控制电动汽车的充放电行为，对提高系统的安全性与稳定性具有十分重要的意义^[1-3]。

在科学技术飞速发展和人们环保意识逐渐增强的今天，可入网混合动力汽车（PHEV）的发展在世界范围内受到了广泛的关注和重视。PHEV在充电时可以将其当作负荷，而在闲置时又可将其当作一种分布式电源，将电能反馈给电网。PHEV的大规模入网给电力系统的安全与稳定运行带来了新的挑战。当其充电行为发生在峰荷时段时，可能会对系

统运行造成很大的冲击，甚至造成过负荷现象的发生，因而合理控制PHEV的充电行为非常重要；另一方面，PHEV可以与风能、太阳能等新能源相互配合，构成分布式电源向电力系统反向放电，以使电力系统更经济和安全运行^[4-6]。

近年来，不少专家学者们致力于研究PHEV入网对电力系统机组组合的影响。文献[7]构建了计及PHEV和风电机组不确定性的随机经济调度模型，文中将优化调度转化为在各时段上求解，然后组合成整个调度期的解，求解过程中虽有计及机组爬坡约束，但时段解和最终解都为解集，如何筛选解集存在困难，并且难以保证最终解为全局最优。文献[8]给出了考虑PHEV放电优化控制的机组最优组合模型，并采用粒子群优化算法进行求解，但是模型中只是简单地将电动汽车看作分布式电源，这样有失偏颇。

考虑混合动力汽车规模化入网的动态经济调度是一个非线性、非平滑和多峰高维优化问题，其可行解在空间中的分布往往存在大量的局部最优点，采用常规的随机搜索算法难以收敛到全局最优。本文提出一种带有动态约束处理的纵横交叉算法（CSO），以求出该模型的最优调度方案。以10机组系统为算例来验证所述调度模型的有效性。

含PHEV的机组组合问题的模型

1. 目标函数

电动汽车入网调度模型中主要体现在各机组燃料费用的优化上^[9]，这里以一

国家自然科学基金项目（51307025），广东省自然科学基金（S2013040013776，S2012040007911），广东省教育厅育苗工程项目（2013LYM_0019）。

天24 h内的所有发电机组的运行成本为目标, 系统总运行费用为

$$\min F_C = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \{a_i + b_i P_{i,t} + c_i P_{i,t}^2 + |d_i \sin [e_i (P_{i,t} - P_i^{\min})]|\} \quad (1)$$

式中, F_C 为发电机组燃料成本; T 为优化调度时长; N 为机组台数; $P_{i,t}$ 为第 i 台机组在 t 时段的有功出力; a_i 、 b_i 和 c_i 为第 i 台机组的能耗特性参数; $|d_i \sin [e_i (P_{i,t} - P_i^{\min})]|$ 为第 i 台机组的脉动效应的表达式; d_i 、 e_i 为第 i 台机组的阀点效应参数; $P_i^{\min}$ 为第 i 台机组的最小出力值。

2. 约束条件

考虑PHEV充放电后的电力系统机组最优组合问题, 需要满足下列约束条件。

1) 有功功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t} = P_{D,t} + P_{ev,t} + P_{L,t} \quad (2)$$

式中, $P_{D,t}$ 为 t 时段无PHEV接入的基础负荷; $P_{ev,t}$ 为 t 时段PHEV的充电负荷; $P_{L,t}$ 为 t 时段的网损。

采用简便的Kron's网损公式计算近似值, 对 t 时段有

$$P_{L,t} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_{i,t} B_{ij} P_{j,t} \quad (3)$$

式中, B_{ij} 为网损系数矩阵 B 的第 i 行第 j 列分量。

2) 发电机组出力上下限约束

$$P_i^{\min} \leq P_i(t) \leq P_i^{\max} \quad (4)$$

式中, $P_{i,\max}$ 、 $P_{i,\min}$ 分别为第 i 个发电机组的最大和最小出力。

3) 旋转备用容量约束

$$\sum_{i=1}^N P_i^{\max} \geq P_{D,t} + P_{ev,t} + P_{L,t} + S_{R,t} \quad (5)$$

式中, $S_{R,t}$ 为 t 时段的系统旋转备用容量需求。

4) 发电机爬坡速率约束

$$\begin{aligned} P_{i,t} - P_{i,t-1} &\leq U_{Ri} \\ P_{i,t-1} - P_{i,t} &\leq D_{Ri} \end{aligned} \quad (6)$$

式中, U_{Ri} 、 D_{Ri} 分别为机组 i 在相邻时段出力容许的最大上升值和最大下降值。

5) 可优化的PHEV充放电总量约束

假定参与充电优化调度的PHEV每天只能向电

网充放电各一次, 则PHEV的充放电总量约束为

$$\begin{aligned} \sum_{t=1}^T N_c(t) &= N_c^{\max} \\ \sum_{t=1}^T N_{dc}(t) &= N_{dc}^{\max} \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $N_c^{\max}$ 为全网可充电的PHEV总数; $N_{dc}^{\max}$ 为全网可放电的PHEV总数。

6) 第 t 时段内最大充放电PHEV总量约束

$$\begin{aligned} N_c(t) &\leq N_c^{\max}(t) \\ N_{dc}(t) &\leq N_{dc}^{\max}(t) \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $N_c^{\max}(t)$ 为 t 时段最大可充电的PHEV总数; $N_{dc}^{\max}(t)$ 为 t 时段最大可放电的PHEV总数。

模型求解

1. 纵横交叉算法

纵横交叉算法(CSO)是受儒家中庸思想和遗传算法的启发, 其搜索行为由横向交叉和纵向交叉两种方式组成, 每次迭代这两种操作将交替进行, 交叉后得出的子代称为中庸解(横向交叉中庸解为 MS_{hc} , 纵向交叉中庸解为 MS_{vc})。通过精英竞争策略, 使两种交叉完美结合, 交叉后产生的子代与其父代进行竞争, 并择优保留, 竞争后得出的解称为占优解(横向交叉占优解为 DS_{hc} , 纵向交叉占优解为 DS_{vc})。CSO算法流程如图1所示。

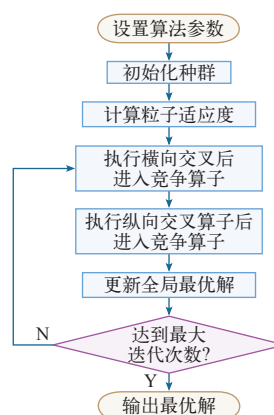


图1 CSO算法流程

在进化过程中, 一旦粒子陷入停滞不前的某维, 在纵向交叉操作下摆脱局部最优, 会通过横向交叉操作迅速传播至整个种群, 而更新后的维也会使其余陷入局部最优的维有更多机会通过纵

向交叉跳出局部最优,两种交叉方式的结果会呈链式反应在整个种群中蔓延。相比其他群智能优化算法,这种纵横交叉机制使CSO在全局收敛能力和收敛速度方面具有明显的优势。

(1) 横向交叉操作

横向交叉类似遗传算法中的交叉操作,但又有别于遗传算法。横向交叉首先是将所有粒子两两配对,将多维搜索空间划分为种群数目一半的子空间,配对的粒子以较大概率(横向交叉概率为 p_h ,通常取1)在以自己为对角顶点的超立方体内产生后代 $MS_{hc}(i)$ 和 $MS_{hc}(j)$ 。同时,为减少搜索盲点,如式(1)和式(2)中的第3项所示,横向交叉以较小概率在超立方体外缘进行搜索,这种跨界搜索机制区别于遗传算法的交叉操作,有效地增强了算法的全局搜索能力。横向交叉是在种群中两个粒子相同维之间进行的算数交叉,假设父代粒子 $X(i)$ 和 $X(j)$ 的第 d 维横向交叉,根据式(1)、式(2)产生子代,则

$$\begin{aligned} MS_{hc}(i,d) &= r_1 X(i,d) + (1-r_1)X(j,d) + c_1[X(i,d) - X(j,d)] \\ MS_{hc}(j,d) &= r_2 X(j,d) + (1-r_2)X(i,d) + c_2[X(j,d) - X(i,d)] \end{aligned} \quad \begin{matrix} i,j \in N(1,M) \\ d \in N(1,D) \end{matrix} \quad (9)$$

式中, r_1 、 r_2 为 $[0,1]$ 之间的随机数; c_1 、 c_2 为 $[-1,1]$ 之间的随机数; M 为粒子大小; D 为变量维数; $X(i,d)$ 、 $X(j,d)$ 分别为父代粒子 $X(i)$ 和 $X(j)$ 的第 d 维; $MS_{hc}(i,d)$ 、 $MS_{hc}(j,d)$ 分别为 $X(i,d)$ 和 $X(j,d)$ 通过横向交叉产生的第 d 维子代。

交叉后进入竞争机制,与其父代进行比较,适应度更好的粒子保留在 DS_{hc} 中。

(2) 纵向交叉操作

纵向交叉是所有粒子不同维之间进行的一种算数交叉。由于不同维之间的取值范围可能不同,因而交叉前需对各维进行归一化处理。每次纵向交叉操作只产生一个子代,目的是使陷入停滞的那一维跳出局部最优且又不破坏其他正常维。假定粒子 $X(i)$ 的第 d_1 维和第 d_2 维进行纵向交叉,根据式(3)产生子代,则

$$\begin{aligned} MS_{vc}(i,d_1) &= rX(i,d_1) + (1-r)X(i,d_2) \\ i &\in N(1,M) \end{aligned} \quad (10)$$

$$d_1, d_2 \in N(1,D)$$

式中, $r \in [0,1]$; $MS_{vc}(i,d_1)$ 为父代粒子 $X(i)$ 的第 d_1 维和第 d_2 维通过纵向交叉产生的子代。

在实际应用中,绝大多数随机搜索算法的早熟问题往往是因为种群的部分维处于停滞不前状态,称之为维局部最优。因此,根据纵向交叉概率 p_v (通常取 $0.2 \sim 0.8$)进行交叉,不仅能使陷入局部最优的维有机会摆脱出来,进而使整个种群摆脱局部最优;而且其变异方式能较好地维持种群的多样性。交叉后同样进入竞争机制,与其父代粒子进行比较,择优保留在 DS_{vc} 中。

2. 复杂约束条件动态处理

造成动态经济调度问题求解困难的一个重要原因是调度模型的强约束性,这使得可行域狭小且拓扑结构复杂,通用算法求解效率十分低下^[7,10]。约束条件中,对于不等式约束直接令相关越限变量为对应边界值即可;而对于等式约束式(2)和式(7),本文根据约束条件的特点,逐时段采取动态约束处理方法对不可行解进行修正^[11]。具体步骤如下:

1) 对优化时段 t ($1 \leq t \leq T$),初始化动态调整次数 $l=0$ 。

2) 计算 t 时段内有功功率平衡约束违反值,即

$$\delta_t = P_{D,t} + P_{L,t} - \sum_{i=1}^N P_{i,t} \quad (11)$$

如果 $l < L$ 且 $\delta_t > \varepsilon$ (L 为最大动态调整次数; ε 为功率平衡约束违反阈值),则转到步骤3);否则转到步骤5)。

3) 计算功率平衡的平均约束违反值

$$\mu_t = \delta_t / N \quad (12)$$

4) 对各发电机组在 t 时段的出力进行修正

$$P_{i,t} = P_{i,t} + \mu_t \quad i=1,2,\dots,N \quad (13)$$

若调整后的出力 $P_{i,t}$ 超过功率上下限约束,则令其等于边界值;否则令 $l=l+1$ 并返回步骤2)。

5) 终止动态约束处理程序。

算例分析

为验证本文算法的有效性,以10机组和50 000辆PHEV组成计及网损的电力系统为例进行仿真分析。假设所有接入电网的PHEV都参与充电优化调

度，每辆PHEV充电总电量为10.8 kW·h，平均充电功率为1.8 kW，充电总时长为6 h；只有50%的PHEV可以向电网反向送电，放电总电量为10.2 kW·h，平均放电功率为1.7 kW。单位时间内PHEV充放电数量最大不超过可充电总数的95%。给定系统旋转备用需求取各时段负荷值的10%，机组参数和负荷值见文献[6]，调度时段为24 h，分为24个时段，时段长为1 h。CSO算法参数设置如下：纵向交叉概率 P_v 设为0.5，种群大小设为 $M=30$ ，最大迭代次数设为 $\text{Maxgen}=500$ ，DCH中 $L=10$ ，功率平衡约束违反阈值 $\varepsilon=10^{-6}$ 。

以总数50 000辆PHEV接入电网为例，表1给出了优化问题达到最优解时，一日内各时段中10机组的发电量和PHEV的充放电数量。由表1可知，PHEV充电主要集中在负荷低谷时段（ $T_1\sim T_2$ ，

$T_{16}\sim T_{17}$ ， $T_{22}\sim T_{24}$ ）。其中， $T_{16}\sim T_{17}$ 充电时间段较短，适合PHEV的快速充电； $T_1\sim T_2$ 和 $T_{22}\sim T_{24}$ 为连续充电时段。PHEV放电主要是在用电高峰期（ $T_6\sim T_{15}$ ， $T_{18}\sim T_{21}$ ）。综上所述，优化结果表明PHEV在负荷低谷时段以充电为主，而在负荷高峰时段则以放电为主，这符合优化调度的预期。

当系统无PHEV接入和50 000辆PHEV接入时，负荷曲线对比如图2所示，表2给出了相应的负荷特性指标。通过对仿真结果进行对比分析可得，优化后的PHEV在负荷高峰时对电网主要进行放电，负荷低谷时主要进行充电，使日负荷曲线比未接入时显得平缓。峰谷差率由51.81%下降至47.84%，负荷率由77.22%提高到78.15%，这也说明了PHEV的并网可以对日负荷起到“削峰填谷”的作用，以此来调节电网的负荷。

表1 PHEV的充放电数量

时段	机组出力/MW										充电PHEV数量	放电PHEV数量
	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		
1	150.09	135.19	78.63	60.20	223.52	129.00	128.78	119.33	20.06	11.05	47 500	0
2	150.00	135	151.01	103.36	219.96	124.84	128.87	89.36	20.00	10.00	47 500	0
3	150.31	136.39	186.51	126.47	223.40	128.13	128.75	118.59	49.94	38.12	0	1 164
4	150.00	135.15	253.55	175.96	227.95	156.42	128.88	119.72	51.38	42.56	0	14 241
5	150.71	135.83	297.30	213.31	222.36	155.88	129.85	118.27	52.84	43.19	0	7 551
6	152.61	145.10	339.81	250.66	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	0	23 750
7	195.93	135.38	339.84	299.63	240.97	159.48	129.72	119.60	79.70	54.87	0	21 750
8	191.26	215.11	340.00	300.00	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	0	23 750
9	271.26	295.11	340.00	300.00	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	0	23 750
10	299.40	374.75	339.94	299.95	242.92	159.93	129.91	119.91	79.95	54.90	0	19 543
11	368.35	397.66	340.00	300.00	243.00	160.00	130.00	119.89	80.00	54.95	0	19 050
12	367.48	447.29	339.96	299.96	243.00	160.00	129.95	119.98	79.89	54.95	0	23 750
13	327.81	400.83	339.99	299.99	242.91	159.98	130.00	119.94	79.99	55.00	0	19 294
14	252.42	322.56	340.00	300.00	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	46.64	0	23 750
15	174.36	244.04	328.22	300.00	243.00	160.00	130.00	119.92	80.00	54.95	0	23 750
16	150.47	166.26	294.55	250.75	236.12	154.05	128.06	118.13	57.00	42.41	37 172	0
17	150.00	136.32	290.70	220.20	224.01	158.54	129.76	117.96	49.67	42.34	45 177	0
18	150.93	138.60	340.00	269.41	243.00	160.00	130.00	120.00	79.38	44.80	0	23 750
19	190.64	215.81	340.00	300.00	243.00	160.00	130.00	120.00	79.98	55.00	0	22 750
20	270.64	295.81	340.00	300.00	243.00	160.00	130.00	120.00	80.00	55.00	0	23 750
21	285.63	307.55	339.70	299.72	242.95	159.80	129.89	119.98	54.79	54.92	0	17 782
22	207.16	227.74	279.89	250.54	221.87	152.50	126.61	116.97	51.64	42.27	44 530	0
23	150.00	147.74	215.82	201.36	219.47	122.62	126.24	118.28	21.64	40.90	47 500	0
24	150.06	135.06	159.46	176.92	221.23	116.80	128.06	88.33	20.06	13.35	45 500	0

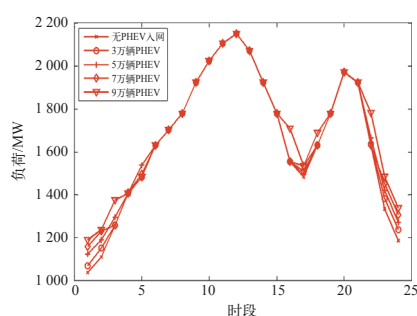


图2 不同PHEV渗透率下的负荷曲线

表2 不同渗透率下的负荷特性指标

PHEV 入网数量	最大负荷 /MW	最小负荷 /MW	平均负荷 /MW	峰谷差率 (%)	负荷率 (%)
0	2 150	1 036.00	1 660.33	51.81	77.22
30 000	2 150	1 065.57	1 668.82	50.44	77.62
50 000	2 150	1 121.50	1 680.15	47.84	78.15
70 000	2 150	1 155.70	1 683.14	46.25	78.29
90 000	2 150	1 188.10	1 707.10	44.74	79.40

由图2可知,随着PHEV数量的增加,电网的峰值负荷并未增加,日负荷曲线变得更为平滑,且负荷率呈上升趋势,有效提高了燃煤机组的利用率,减小了输变电设备的投资。

结束语

PHEV作为特定时代背景下的产物,不但有效解决了传统化石能源的枯竭问题,而且在一定程度上缓解了温室效应,推动了国家节能减排工作的落实与进行,更符合当今社会“可持续发展”的大主题。PHEV规模化入网既是一次难得的机遇,更是一个新的挑战,如何有效地控制PHEV的充放电行为是问题的关键。针对PHEV规模化入网对电力系统机组组合产生的影响,提出一种带有动态约束处理的纵横交叉算法,有效解决了常规随机搜索算法容易陷入局部最优的问题,给出了最佳的调度方案。以10机组系统为算例进行仿真,结果表明,文中所述优化调度方法能有效避免PHEV大规模充电对电网运行造成的冲击效应,进而实现对电网负荷“削峰填谷”的作用,在改善环境的同时解决能源问题。今后工作将考虑电动汽车与风能、太阳能等新能源合理组合并形成分布式电源向系统送电的问题。

参考文献

- [1] 霍沫霖,单葆国.欧洲智能用电发展综述及启示[J].中国电力,2012,45(11):91-95.
- [2] 李建祥,张秉良,厉秉强.电动汽车充电需求负荷模型建模方法研究[J].电气应用,2013,32(3):66-70.
- [3] 黄碧斌,孔维政,李琼慧.中国典型城市电网电动汽车容纳能力研究[J].中国电力,2013,46(10):91-95.
- [4] 张志伟,顾丹珍.电动汽车智能充电策略研究[J].中国电力,2013,46(6):91-95.
- [5] 柳春芳,梁唐杰,王崇斌.需求侧响应理论在电动汽车负荷管理中的应用研究[J].电气应用,2014,33(9):24-27.
- [6] Basu M. Dynamic economic emission dispatch using nondominated sorting genetic algorithm-II[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2008, 30(2):140-149.
- [7] 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.
- [8] Saber A Y, Veneyagamoorthy G K. Intelligent unit commitment with vehicle-to-grid: a cost-emission optimization[J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(1):898-911.
- [9] Su Wencong, Wang Jianhui, Zhang Kuiling, et al. Model predictive control-based power dispatch for distribution system considering plug-in electric vehicle uncertainty[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 106:29-35.
- [10] 于浩明,黄纯,张磊,等.基于分时电价机制的电动汽车用户侧有序充放电控制策略[J].中国电力,2014,47(12):95-98.
- [11] 丁石川,陈权,薛钟兵,等.智能电动汽车充放电技术分析与仿真研究[J].电气应用,2013,32(9):24-28.

(收稿日期:2015-03-05) EA