

# 基于禁忌动态规划的含电动汽车机组组合研究

梁捷

(中国南方电网广西电网有限责任公司电力科学研究院, 广西 南宁 530023)

**摘要:**研究了含电动汽车的机组组合模型,将满足电动汽车充电量需求和时间纳入约束条件,针对传统前向动态规划法求解大规模机组组合问题时的“维数灾”问题,在评估值函数时对访问路径集进行局部存优处理,根据机组单位燃料成本和旋转备用容量裕度确定存优指标,减少了路径评估的计算量。为避免改动后的算法陷入局部极值,通过设置禁忌列表防止重复路径的搜索。还提出一种基于试停优化的压缩状态空间的构造法,缩减了初始状态空间的规模。10—60 机组算例仿真比较了考虑爬坡约束和电动汽车接入前后不同算法的计算速度和优化效果,结果验证了所提算法的有效性。

**关键词:**前向动态规划;禁忌搜索;路径探索;机组组合;电动汽车

**中图分类号:** TM71

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2018)02-0067-06

## 0 引言

大规模电动汽车 (electric vehicles, EV) 接入电网将会对电力系统的规划、运行及市场运营产生巨大影响,考虑 EV 入网后的机组组合问题 (unit commitment, UC),需要在 UC 模型中体现 EV 的充电放电行为,实现 EV 及传统机组的综合调度,使系统总运行成本最小<sup>[1]</sup>。UC 问题中目标函数的非凸、非线性以及复杂严格的约束使得该问题难以求得全局最优解。常见方法包括优先顺序法<sup>[2]</sup>,动态规划法<sup>[3]</sup>,分支定界法<sup>[4]</sup>,混合整数规划法<sup>[5]</sup>,遗传算法<sup>[6]</sup>等。这些方法存在着易陷入局部最优或在应用于大规模系统时会遇到维数灾等问题。

文献[7]采用一种混合优化算法求解 UC 问题,它将原问题分解成仅含状态变量的组合和含机组有功出力的非线性规划 2 个子问题,用禁忌搜索算法 (tabu search, TS) 求解组合子问题,粒子群和序列二次规划混合法求解非线性规划子问题,仿真表明如此可改善 TS 算法的收敛速度和搜索能力。文献[3]提出了基于优先顺序法的动态规划法 (dynamic programming, DP),可提高计算速度,但对该法对大规模 UC 问题常常找不到质量较好的解。文献[8]提出了一种计及 EV 充电需求的电力系统机组组合模型,把满足 EV 充电需求纳入约束条件,但缺乏大规模系统和多算法间的性能比对研究。

为了在可接受的时间内得到优质解,文中提出一种用于 UC 问题的禁忌动态规划法。在传统前向动态规划法的基础上,根据路径存优指标对访问路

径集进行局部存优,并引入禁忌搜索进行状态访问控制。此外,提出一种基于试停优化的压缩状态空间的构造法。最后对 10 机组 24 时段及其拓展系统进行仿真,进行文中算法的有效性验证和多算法间的性能比对研究。

## 1 含电动汽车机组组合问题模型

以机组总发电成本最低为优化目标<sup>[9]</sup>。

$$\min F_c = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_u} [u_{i,t} f_i(P_{i,t}) + Q_{i,t}(x_{\text{off},i,t}, u_{i,t}, u_{i,t-1})] \quad (1)$$

式中: $P_{i,t}$ 为第  $i$  台发电机组第  $t$  时段的出力; $u_{i,t}$ 为第  $i$  台发电机组第  $t$  时段的状态,当其处于运行状态时为 1,否则为 0; $x_{\text{off},i,t}$ 为第  $i$  台发电机组第  $t$  时段的累计已停机时间; $f_i$ 为第  $i$  台发电机组的燃料成本函数; $Q_{i,t}$ 为第  $i$  台发电机组第  $t$  时段的启停成本函数<sup>[9]</sup>; $N_u$ 为发电机组总数; $T$ 为总优化时段。约束条件为:

(1) 系统功率平衡约束。

$$\sum_{i=1}^{N_u} u_{i,t} P_{i,t} - P_{\text{LD}t} - \sum_{j=1}^{N_{\text{EV}}} v_{j,t} P_{\text{EV}j} = 0 \quad (2)$$

式中: $P_{\text{LD}t}$ 为第  $t$  时段系统的基线负荷水平; $P_{\text{EV}j}$ 为第  $j$  辆 EV 的充电功率; $v_{j,t}$ 代表第  $j$  辆 EV 在第  $t$  时段是否处于充电状态,是则为 1,否则为 0; $N_{\text{EV}}$ 为并入电网的 EV 数<sup>[10]</sup>。

(2) 旋转备用约束。

$$\sum_{i=1}^{N_u} u_{i,t} P_{\text{max}i} \geq R_t + P_{\text{LD}t} + \sum_{j=1}^{N_{\text{EV}}} v_{j,t} P_{\text{EV}j} \quad (3)$$

式中: $P_{\text{max}i}$ 为第  $i$  台机组的出力上界; $R_t$ 为时段  $t$  的备用需求。

收稿日期:2017-11-05;修回日期:2017-12-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51377119)

(3) 机组有功出力约束。

$$u_{i,t}P_{\min i} \leq P_{i,t} \leq u_{i,t}P_{\max i} \quad (4)$$

式中： $P_{\min i}$ 为第*i*台机组的出力下界。

(4) 最小启停时间约束。

发电机状态从开机到停机：

$$(x_{\text{on},i} - T_{\text{on},i})(u_{i,t} - u_{i,t+1}) \geq 0 \quad (5)$$

发电机状态从停机到开机：

$$(x_{\text{off},i} - T_{\text{off},i})(u_{i,t+1} - u_{i,t}) \geq 0 \quad (6)$$

式中： $x_{\text{on},i}$ 为第*i*台发电机组在第*t*时段连续运行的时间； $T_{\text{on},i}$ 、 $T_{\text{off},i}$ 分别为第*i*台发电机组的最小允许开机和停机时间。

(5) 爬坡约束。

$$-P_{\text{down}i} \leq P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq P_{\text{up}i} \quad (7)$$

式中： $P_{\text{up}i}$ 、 $P_{\text{down}i}$ 分别为机组*i*的功率上升量限制和功率下降量限制<sup>[10]</sup>。

(6) EV 用户充电需求约束。

为了满足 EV 充电需求,需要满足如下蓄电池电量关系：

$$S_{j\text{OC-need}} \leq S_{j\text{OC-td}} \leq 1 \quad (8)$$

式中： $S_{j\text{OC-td}}$ 表示第*j*辆 EV 在离网时的电池荷电状态(%)； $S_{j\text{OC-need}}$ 表示第*j*辆 EV 在离网时所期望达到的电池荷电状态(%)，电池各个时刻的电量存在以下递推公式<sup>[10]</sup>：

$$S_{j\text{OC-(t+1)}} = (S_{j\text{OC-t}} + \frac{v_{j,t}\Delta TP_{\text{EV}j}\eta_j \times 100}{C_j})\% \quad (9)$$

式中： $S_{j\text{OC-t}}$ 表示时刻*t*的 EV 电池荷电状态； $\eta_j$ 为充电效率； $C_j$ 为电池容量； $\Delta T$ 表示计算时间步长,单位为 h。

(7) 充电时间约束。

$$t_{\text{oj}} \leq t_j \leq t_{\text{dj}} - 1 \quad (10)$$

式中： $t_{\text{oj}}$ 、 $t_{\text{dj}}$ 分别为第*j*辆电动汽车开始并网时刻和离网时刻； $t_j$ 为给第*j*辆电动汽车充电的时刻。该式对智能充电方案下的电动汽车的充电时间进行了约束,表明只有在电动汽车并网之后、离网之前,才可以根据电网侧和用户侧的双重需求进行调控<sup>[11]</sup>。上述式(1—10)组成的优化模型为非线性混合整数规划问题。为便于求解,对模型的目标函数及约束条件进行部分线性化<sup>[5]</sup>。

## 2 禁忌动态规划算法

### 2.1 基于局部存优的前向动态规划法

动态规划算法是一种用于多阶段决策问题的优化方法<sup>[12-13]</sup>。前向动态规划法(forward dynamic programming, FDP)首先定义*t*时段状态空间 $S_t$ 为该时段所有可能的机组开停和 EV 充电状态的组合,

优化时从初始阶段开始,在相应的空间中逐一访问各状态,按式(2)从前到后依次计算到达各阶段各状态的值函数：

$$V_{t,J_p}(S_t) = C_t(S_t, f_i, Q_{i,t}) + V_{t-1,J_p}(S_{t-1}) \quad (11)$$

式中： $J_p$ 表示当前时段满足约束条件的转移路径,即可行状态集； $V_{t,J_p}(S_t)$ 为值函数,表示从初始状态到*t*时段状态的总发电成本； $C_t$ 表示从*t-1*时段的状态转移到*t*时段状态的转移成本,为 $F_c$ 的子集。

然后记录到达当前状态的路径,再从末时段累计转移成本最小的路径对应的状态开始,从时间上逆序回溯刚才的过程。依次记录各阶段使总的累计转移成本最小的状态,最后得到的状态集就是所求机组开停和 EV 充电状态的优化方案<sup>[11]</sup>。可见,若用 FDP 求解含*N*台机组,*T*个调度时段的 UC 问题,若不限状态数,则各时段状态空间中状态数为 $2^N$ 个,而 $J_p$ 共有 $(2^N)^T$ 种。当*N*和*T*增大时,计算量和所需的存储空间将急剧增加,造成所谓的“维数灾”问题。

对此,文中给出基于试停优化的状态生成法和局部存优策略,分别从状态空间的初始化和 FDP 的状态访问过程控制状态空间的膨胀。

局部存优策略是在算法遍历各时段时只根据路径存优指标(path optimization index, POI)大小排序,并择优保存有限条路径,如此,每次迭代仅需考虑少量路径,如此可减少各时段需要考虑的状态数和时段间的转移路径数<sup>[12]</sup>。

POI 综合考虑机组在最大出力下的单位燃料成本和为后续时段提供的旋转备用容量裕度,定义如下：

$$I_{\text{POI}} = \sum_{\substack{u_{i,t} \in S_t \\ S_t \in J_p}} u_{i,t} \frac{f_i(P_{\max,i})}{P_{\max,i}} + \delta |P_{L,t} - u_{i,t}P_{\max,i}| \quad (12)$$

式中： $\delta$ 为权重系数, $I_{\text{POI}}$ 值越大,代表路径对应方案的经济性越好。

针对大规模 UC 问题中枚举法生成的初始状态空间规模较大的问题,文中按试停优化的方式生成初始状态空间,步骤如下：

(1) 在各时段状态空间中分别构建 $(N_G+1)$ 个试停调度子问题如下。

$$\begin{aligned} \min F_o &= \sum_{i=1}^{N_G} u_{i,t} f_i(P_{i,t}) \\ \text{s.t.} \quad &\sum_{i=1}^{N_u} u_{i,t} P_{i,t} - P_{\text{LD}t} - \sum_{i=1}^{N_{\text{EV}}} v_{j,t} P_{\text{EV}j} = 0 \\ &u_{i,t} P_{i,t} \leq u_{i,t} P_{\max i} \end{aligned} \quad (13)$$

其中,在第*i*个该问题中,关闭第*i*台机组,开启

其他机组,则可得  $N_c$  个方案,考虑到峰值时段负荷需求较大,额外增加一个开启所有机组的方案。

(2) 式(13)以每个初始机组启停方案的运行成本最小为目标进行优化,根据优化结构对(1)中的方案进行调整:若  $u_{i,t} = 1$ ,且  $P_{i,t} < P_{\min}$ ,则令  $u_{i,t} = 0$ 。

(3) 根据式(3)校验(2)所得方案是否满足旋转备用约束,若不满足,就用优先顺序法<sup>[2]</sup>作进一步邻域调整,最后除去重复状态得到调整后的状态空间。

## 2.2 基于禁忌思想的状态转移过程

若2.1节方法在一次路径搜索找不到满意解,则需构建推动路径转移进行迭代搜索的机制,此外,该方法具有贪婪性质,它在决策过程中未能全局考虑时段间的约束条件,且易陷入局部极值。对此,引入了禁忌搜索算法中的禁忌列表(tabu list, TL),通过构建记忆结构来引导路径搜索,过程为:首先在历史搜索过程中选择禁忌对象更新 TL,阻止算法重复访问该状态,然后在遍历各时段时从 TL 以外的状态中择优访问其他状态,从而推动路径在邻域内局部修正,得到新的转移路径,再根据路径存优指标进行路径筛选<sup>[12]</sup>。重复上述过程直到得到满意解或达到迭代次数上限。

禁忌对象是组成 TL 的元素,考虑到小容量的调峰机组在负荷峰值及其临近时段( $T_p$ )易形成多种组合路径,而2.1节的方法缺少局部精细搜索能力,故禁忌对象  $s_{TB}$ 按如下方式选择:

$$\begin{cases} s_{TB} = \{(q, t) \mid s_q \in f(S'), t \in T_p\} \\ S' = S^k \cap \{s \in J_p^{k-1}\} \cap \{s \notin L_{TL}\} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $q$ 为状态编号; $g_1, g_2$ 为映射函数,且  $g_1: D \rightarrow T_s, g_2: S \rightarrow D, P_{LD_t} \in D; k$ 为当前迭代次数; $S^k$ 为对应的当前时段状态空间; $S'$ 为待选状态集; $J_p^{k-1}$ 为FDP中前一次迭代所得的路径; $L_{TL}$ 为当前时段的禁忌列表。式(12)表示被禁待选状态从负荷峰值及其临近时段的前一次迭代访问过且未被禁忌的状态中根据单位燃料成本函数 $f_{uc}$ <sup>[10]</sup>择劣选择。

在FDP过程中,在某个时段可能会出现当前状态空间中的状态均不可行的情况,即陷入“死路”。对此,定义解禁规则为:在该情况下,将当前路径的前一个时段的状态列入 TL,同时解禁当前时段所有被禁忌对象,即当前时段的 TL 重新初始化,最后终止本次迭代。如此下一次迭代可避开这条路径上的不可行的状态节点。

## 3 算例分析

应用文中算法对10—60机组24时段系统在

MATLAB 环境进行仿真计算,火电机组和负荷数据参见文献[8]。电动汽车集群总容量占基线负荷总量的比值为10%,充电模式为分时电价政策间接引导模式,即在负荷低谷期通过降低电价来引导用户在低谷期充电,起到一定的填谷作用。电动汽车的电池容量等参数及电价方案见文献[8]。

表1比较了3种压缩方式下4个系统中生成的状态数,数值大的数以科学计数法表示并保留2位小数。其中方法1为通过枚举法获得的所有状态总数,可通过2.1节的方法得到。方法2为在机组最大出力时根据旋转备用约束排除不可行的状态后剩下的状态数,由于需逐个根据式(3)计算,大规模系统短时间内难以求出。方法3为文中基于试停优化方式获得的状态数。由表1可见,方法1的规模随机组和时段数的增加而呈级数式剧增。方法2根据约束条件压缩后规模减小,但在后2个规模稍大的系统时仍会遇到维数灾问题。本文方式能有效压缩状态数,生成规模较小的初始状态空间。

表1 3种状态空间的初始化方法比较

Tab.1 Comparison of initialization methods for three kinds of state spaces

状态空间 初始化方法	产生状态数/个			
	3机 4时段	10机 24时段	20机 24时段	40机 24时段
枚举法	$4.10 \times 10^3$	$1.77 \times 10^{72}$	$3.12 \times 10^{144}$	$9.75 \times 10^{288}$
枚举法+ 旋转备用约束	19	4409	—	—
试停优化法	14	260	502	982

注:“—”表示状态筛选耗时长,短时间内无法完成。

表2比较了对10机组算例,文TS-DP法和其他5种算法的计算结果。场景1为不考虑爬坡约束和EV接入,场景2考虑爬坡约束和EV接入。对比表中的5种方法,包括同样用到禁忌思想的TS-IRP,用到动态规范法的PSO-DP,以及用到割平面信息的MISOCP。可见TS-DP求得的总发电成本与MISOCP一致,为表中最小,计算速度优于基于随机搜索的TS-IRP算法。由于MISOCP采用同伦内点法求解,同伦初值和梯度下降技术的应用使该算法在较小的状态空间能快速逼近目标解,而本文方法需经历试停优化子问题求解,状态访问和筛选等过程,故在小规模系统中计算速度稍慢于该方法。此外,场景2考虑爬坡约束和EV接入后,计算速度方面,约束和变量数的增加使得各算法的计算时间均被延长。优化效果方面,由于电动汽车是按比例渗透入基线负荷内,故虽然整体负荷水平不变,但通过电价引导电动汽车充电行为后,电动汽车会主要

集中于电网谷时段充电,使负荷曲线平滑化<sup>[16-17]</sup>,从而为各时段的机组启停和出力的调整提供更充裕的环境,调度方可通过增加经济型机组出力、减少耗费型机组出力的方式来降低发电成本,故 TS-DP、PSO-DP 和 MISOCP 在场景 2 的总发电成本均低于场景 1。TS-IRP 和 IPSO 的成本反而增加,这是由于场景 2 增加爬坡约束和 EV 约束后使得 UC 问题的解空间更为复杂,TS-IRP 和 IPSO 的全局搜索能力较弱,在该环境下易被局部极值吸附。

表 2 10 机组系统计算结果比较

Tab. 2 Comparison of calculation results of 10 unit

求解方法	总发电成本/ \$		计算时间/s	
	场景 1	场景 2	场景 1	场景 2
TS-DP	563 937	562 583	13.6	14.8
TS-IRP	564 310	564 480	77.1	161
MISOCP	563 937	562 583	3.78	4.27
IPSO	564 654	564 760	16.12	20.9
PSO-DP	564 160	564 095	25.54	49.3

注:TS-IRP 为改进随机扰动禁忌搜索法<sup>[7]</sup>;MISOCP 为二阶锥规划法<sup>[5]</sup>;IPSO 为改进粒子群算法<sup>[14]</sup>,PSO-DP 为粒子群-动态规划混合算法<sup>[15]</sup>。

图 1 为 60 机组系统算例不同方法迭代过程中目标函数下降曲线。由图 1 知,IPSO、TS-IRP 和 PSO-DP 算法在迭代前期(约在 20~40 次迭代时)便呈现停滞现象,表明陷入了局部极值,而 TS-DP 算法和 MISOCP 算法在迭代早期目标函数下降较快。TS-IRP、PSO-DP 和 IPSO 算法在迭代后期下降速度变慢,说明其全局搜索能力较弱,终止时得到的优化结果均劣于 TS-DP 和 MISOCP 算法。TS-DP 算法由于禁忌列表的存在,算法可有效避免迂回搜索,使目标函数在整个迭代过程能得到持续优化,故其全局搜索能力和局部搜索能力均较强。MISOCP 是一种在每次迭代时通过构造最小覆盖不等式形式的二阶锥约束获取更紧的解集的解析算法,对优化问题原本的凸性影响较小<sup>[5]</sup>,在有限的迭代次数内比上述随机优化算法能进行更彻底的全局搜索,故其优化结果与本文 TS-DP 算法接近,优于其他 3 种算法。

图 2 给出 10 机组系统在场景 1 时 3 种方法的计算结果比较。可见,TS-IRP、PSO-DP 和 IPSO 法受“维数灾”影响较大,计算时间随机机组数剧增,其中增幅最大的是用到动态规划的 PSO-DP 算法,为便于观察只给出其 10—30 机组的计算时间,40—60 机组的计算时间与另 5 个方法差距较大,故从略,这是由于 PSO-DP 仍保留了动态规划穷举搜索路径的搜索思路,尽管通过粒子群算法对搜索空间进行随

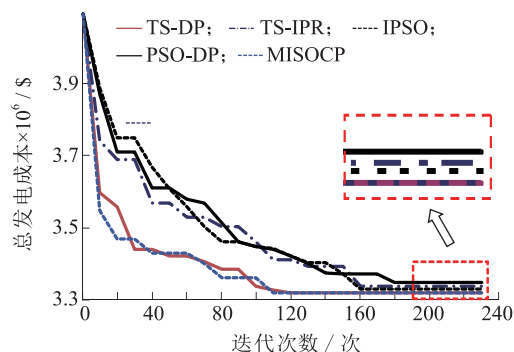


图 1 不同方法迭代过程中目标函数下降曲线

Fig. 1 decline curve of objective function in iterative process of different methods

机压缩,但效率不高。本文 TS-DP 算法 10—40 机的计算速度慢于 MISOCP 算法,50 和 60 机组的计算时间与 MISOCP 相差不大,但 TS-DP 的计算时间随机机组数增长的增加趋势较为平缓一些。这是由于 MISOCP 每次迭代需要更新二阶锥割集,当约束数较多或变量维数较大时,该割集的各阶偏导数和矩阵矢量积计算的运算量将呈级数式剧增,虽然通过多面体线性近似简化计算<sup>[5]</sup>,但从图 2 来看效果有限。而 TS-DP 分别通过试停优化和局部存优方式控制初始状态空间和搜索路径集规模,故计算量受机组数影响较小。

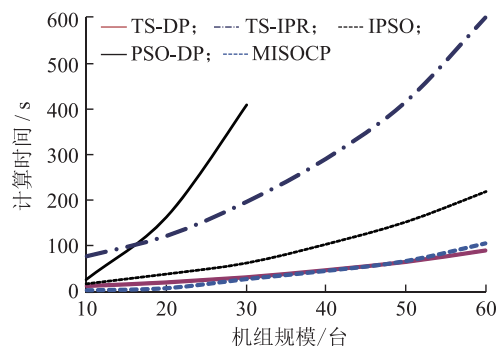


图 2 不同方法计算时间与机组规模的关系

Fig. 2 The relationship between the number of the units and CPU time for different methods

## 5 结语

研究了含电动汽车的机组组合模型,针对应用动态规划求解大规模机组组合问题时的“维数灾”困难,构建了禁忌动态规划法。在采用根据机组单位燃料成本和旋转备用容量裕度对访问路径集进行局部存优,减少了路径评估的计算量。减少了传统前向动态规划需要保存的状态和决策数。为避免改动后的算法陷入局部极值,引入禁忌搜索算法中避免重复访问某些历史过程的思想,通过设置禁忌列表,防止路径的迂回搜索。此外,提出压缩状

态空间的构造方法,在搜索前结合 UC 问题的特点缩减了初始状态空间的规模,使其随机组数量增加呈线性增长。

10—60 机组算例仿真结果表明,文中的方式能有效压缩状态数,生成规模较小的初始状态空间。TS-DP 算法不易陷入局部极值,能获得质量较好的次优解且受维数灾的影响较小,验证了其可行性,但其鲁棒性也有待进一步的提高。

#### 参考文献:

- [1] 张军,韩华春,原增泉. 基于两级充电管理系统的电动汽车智能充电控制系统研究[J]. 电力工程技术, 2017(5):86-92.
- ZHANG Jun, HAN Huachun, YUAN Zengquan. Smart charging electric vehicles based on two-level charge management system [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017(5):86-92.
- [2] 李利利,丁怡,涂孟夫,等. 机组组合问题的仿射可调整鲁棒优化模型与算法[J]. 电力工程技术, 2017, 36(3):33-37.
- LI Lili, DING Qia, TU Mengfu, et al. Affine adjustable robust optimization model and algorithm for unit commitment problem [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(3):33-37.
- [3] 任垚,张小青. 基于改进动态规划法的电力系统机组组合问题研究[J]. 自动化技术与应用, 2010, 29(5):6-8.
- REN Yao, ZHANG Xiaoqing. Improved dynamic programming method of power system unit commitment problem research and application based on [J]. Techniques of Automation and Application, 2010, 29(5):6-8.
- [4] 宋潇,李叶,刘家军,等. 基于改进粒子群文化算法的机组组合联合调度研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(6):77-84.
- SONG Xiao, LI Ye, LIU Jiajun, et al. Improved cultural particle swarm algorithm unit combination scheduling of [J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(6):77-84.
- [5] 全然,韦化,简金宝. 求解大规模机组组合问题的二阶锥规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25):101-107.
- QUAN Ran, WEI Hua, JIAN Jinbao. Solution of large scale unit commitment by second-order cone programming [J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2010, 30(25):101-107.
- [6] 田洋,段文超,孙凯. 基于蜜蜂进化型遗传算法的机组组合研究[J]. 数字技术与应用, 2013(2):113.
- TIAN Yang, DUAN Wenchao, SUN Kai. Research on unit commitment based on bee evolutionary genetic algorithm [J]. Digital Technology and Application, 2013(2):113.
- [7] VICTOIRE T A A, JEYAKUMAR A E. Unit commitment by a tabu-search-based hybrid-optimization technique [J]. IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2005:563-574.
- [8] 陈彬,王业磊,许昭,等. 计及电动汽车充电调度可行域的电力系统机组最优组合[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2014, 41(1):38-44.
- CHEN Bin, WANG Yelei, XU Zhao, et al. Optimal combination of power system units considering feasible areas of electric vehicle charging scheduling [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2014, 41(1):38-44.
- [9] 崔微,赵君,白莉红. 基于多智能体的混合发电机组调度问题研究[J]. 陕西电力, 2014, 42(4):74-77.
- CUI Wei, ZHAO Jun, BAI Lihong. Multi agent scheduling problem of hybrid power unit based on [J]. Shaanxi Electric Power, 2014, 42(4):74-77.
- [10] 吴可,汪春,孙海顺,等. 含大规模电动汽车的电力系统机组组合问题研究[J]. 电力建设, 2014, 35(12):26-31.
- WU Ke, WANG Chun, SUN Haishun, et al. Study on unit commitment of power system with large scale electric vehicles [J]. Electric Power Construction, 2014, 35(12):26-31.
- [11] 史国青. 火电厂机组负荷优化组合分配问题的研究[D]. 北京:华北电力大学, 2005.
- SHI Guoqing. Study on optimal allocation of unit load in thermal power plant [D]. Beijing:North China Electric Power University, 2005.
- [12] 梁捷. 基于禁忌动态规划的电力系统最优机组组合问题研究[D]. 南宁:广西大学, 2013.
- LIANG Jie. Study on optimal unit commitment of power system based on tabu dynamic programming [D]. Nanning:Guangxi University, 2013.
- [13] 陈梦涛,陈卫,李世龙,等. 电动汽车充电站多阶段规划 [C]//中国高等学校电力系统及其自动化专业学术年会. 2014.
- CHEN Mengtao, CHEN Wei, LI Shilong, et al. Multi-stage planning for electric vehicles charging station [C]//Academic Annual Meeting of Electric Power System in China. 2014.
- [14] GOMEZ-GONZALEZA M, LÓPEZB A, JURADO F. Optimization of distributed generation systems using a new discrete PSO and OPF [J]. Electric Power Systems Research, 2012,84(12):172-180.
- [15] CHAKRABORTY S, SENJYU T, YONA A, et al. Thermal generation planning strategy facilitating units decomposition by particle swarm optimization and multi-stage dynamic programming [C]//Transmission and Distribution Conference and Exposition: Asia and Pacific, 2009, 1-4.
- [16] 张静,汤奕,陈成,等. 考虑分时电价和系统峰谷差动态约束的电动汽车有序充电策略[J]. 电网与清洁能源, 2014(5):79-84.
- ZHANG Jing, TANG Yi, CHEN Cheng, et al. The orderly charging strategy of electric vehicles considering the dynamic constraints of TOU price and system peak valley difference [J]. Power Grid and Clean Energy, 2014(5):79-84.
- [17] 刘青松,王瑞明,王斌,等. 基于思维进化算法的滑模控制感应电机伺服驱动系统研究 [C]//中国控制会议. 2008.

LIU Qingsong, WANG Ruiming, WANG Bin, et al. Research on sliding mode control induction motor servo drive system based on thought evolution algorithm[C]//China Control Conference.2008.

作者简介:



梁捷

梁捷(1987—),男,硕士,工程师,从事电能计量技术和应用方面的工作(E-mail: liang87jie@126.com)。

## Research on the Unit Commitment of Electric Vehicle Based on Tuba-dynamic Programming

LIANG Jie

(China Southern Power Grid Guangxi Power Grid Corporation with Limited Liability  
Electric Power Research Institute, Nanning 530023, China)

**Abstract:** To the problem of dimensionality when the large scale unit commitment problems are solved by the traditional forward dynamic programming method, the storage of local optimizations and the small probability mutation mechanism are adopted to select the path storage in dynamic programming, which reduces the calculation of the path evaluation and also improves the exploration ability of the algorithm. In order to avoid the local extreme value of the modified algorithm, the tabu list is set up to prevent the repeated path searching. A constructing method which compresses state space based on trial stop optimization is proposed, which reduces the size of initial state space and adjusts the neighborhood path exploration method for the problem of over compression. The simulation results of 10—60 units verify the feasibility of the proposed algorithm.

**Key words:** forward dynamic programming; tabu search; path exploration; unit commitment

(编辑 钱悦)