

序优化理论在大规模机组组合求解中的应用

谢敏, 诸言涵[†], 吴亚雄, 闫圆圆, 刘明波

(华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640; 国网浙江省电力公司经济技术研究院, 浙江 杭州 310000)

摘要: 序优化理论以满足工程实际需要为目的, 能够简化优化问题复杂程度, 节省大量计算时间, 保证以足够高的概率求得足够好的解。文中将煤耗费用、机组启动成本、购电费用、SO₂排放费用作为目标函数, 考虑了带时间耦合关系的系统运行约束、机组特性约束、一次能源约束, 建立了考虑火电、水电、核电、生物质、燃气多种类型电源的96时段机组组合动态优化模型, 并引入序优化理论予以求解。最后, 分别对10~100机24时段标准火电测试系统和128机96时段某省级实际电力系统进行算例仿真, 并与其他优化算法的求解结果进行了详细的对比分析, 进一步验证了采用序优化理论解决电力系统大规模机组组合问题的可行性和实用性。

关键词: 大规模; 机组组合; 序优化理论; 足够好解

中图分类号: TM744 **文献标识码:** A

Application of ordinal optimization theory to solve large-scale unit commitment problem

XIE Min, ZHU Yan-han[†], WU Ya-xiong, YAN Yuan-yuan, LIU Ming-bo

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China;
The Economic and Technical Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou Zhejiang 310000, China)

Abstract: Complex optimization problems can be simplified by using ordinal optimization theory to reduce computing time and raise probability to obtain good enough solutions. The weighted sum of coal consumption cost, unit start-up cost, power purchase cost and emissions cost is proposed as the objective function of unit commitment subject to time-coupled system operating constraints, unit features constraints and primary energy constraints. The dynamic unit commitment optimization model for the large-scale power system during the daily 96 periods is built by considering all kinds of power generation units such as thermal, hydro, nuclear, biomass and gas units. Then, the ordinal optimization theory is applied to optimize this large-scale unit commitment problem. Simulations have been carried out respectively on 10 ~ 100 units 24 periods standard test examples and 128 units 96 periods test example of some real provincial power generation systems. The feasibility and practicality of ordinal optimization theory in solving such large-scale unit commitment problem are validated by comparing results from ordinal optimization theory with results from other optimization algorithms.

Key words: large-scale; unit commitment; ordinal optimization theory; good enough solution

1 引言(Introduction)

机组组合(unit commitment, UC)隶属经济调度领域, 主要由发电机组启停计划的制定和机组负荷分配两部分构成。其中, 机组启停计划决定了各时间断面投入的机组数量和种类, 而发电机组的负荷分配决定了在已知机组启停计划下各机组的出力情况。从数学角度看, UC问题是一个高维、含连续-离散变量的混合整数非线性规划问题(mixed-integer nonlinear programming, MINLP), 具有典型的NP-Hard特质。随着机组数量、时间断面的增加和约束条件的复杂化, 直接

求解UC问题的全局最优解难度极大, 甚至难以求解。

目前, UC模型优化目标多为社会总成本最小, 其中, 社会总成本包括发电机组运行费用^[1-2]、平均购电费用^[1-2]、污染气体排放^[3]等指标。对于包含火电、水电、核电、生物质、燃气等复杂电源类型的大电网调度运行现状, 考虑单一社会成本指标具有较大的片面性和不准确性。因此, 能够兼顾多种社会成本指标成为节能发电调度新时期机组组合建模的必然趋势。

在UC问题的求解算法方面, 目前, 多种优化算法都有应用, 如: 改进的动态规划法^[4-5]、启发式方

收稿日期: 2015-04-15; 录用日期: 2015-11-13.

[†]通信作者. E-mail: zyh13131@163.com; Tel.: +86 13750880564.

本文责任编辑: 邹云.

国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2013CB228205), 国家自然科学基金青年基金项目(50907023)资助.

Supported by National Basic Research Program of China (“973” Program) (2013CB228205) and National Natural Science Foundation of China (50907023).

法^[6-9]、混合整数规划法^[10-13]、拉格朗日松弛法^[14-15]、遗传算法^[16-19]等. 其中, 动态规划法属于对多阶段决策过程的优化, 穷举可能的状态组合, 理论上可得到最优解, 但易陷入“维数灾”; 启发式方法主要依靠实际调度经验, 计算速度快, 其求解效果受制于人工经验; 混合整数规划法用于直接求解UC数学模型, 从理论上来说可以找到最优解, 但是对于实际的大规模系统, 直接求解计算量过大, 通常需先对待解的复杂优化问题进行分解; 拉格朗日松弛法在大规模UC问题上有着成熟的理论基础和广泛的应用, 计算时间随着机组数量增加呈近似线性增长, 但是其对偶间隙收敛缓慢且难以处理复杂的约束条件; 遗传算法属于无约束优化方法, 如何处理UC问题的约束条件会直接影响算法的效率^[19].

无论采用哪种算法, 其求解思路的本质仍大多沿用两阶段法, 即, 将机组启停计划的制定作为第I阶段, 该阶段的决策变量为表示机组启停状态的离散变量; 而将启动后机组出力的调度问题作为第II阶段, 该阶段的决策变量为表示机组有功出力的连续变量. 这两个阶段的决策变量相互牵制和迭代, 最终收敛得到最优解. 但在实际应用中, 第I阶段获得的机组启停计划常存在大量不可行的情况, 通常基于人工经验对其予以调整^[20-21]; 且存在根据人工经验调整后的可行机组启停计划进行迭代求得最终次优解时收敛速度缓慢的问题^[14]. 可见, 如何快速高效地获得大量可行机组启停计划, 并与第II阶段的模拟调度优化计算相迭代是两阶段步骤法的核心问题.

综上所述, 本文构建了一种可综合考虑煤耗费用、机组启动成本、购电费用、SO₂排放费用的复杂电源多时段UC动态优化模型. 同时, 基于两阶段法的求解框架下, 首次引入序优化理论, 设计了快速高效搜索大量可行机组启停计划的搜索策略, 并运用序优化理论“序比较优于值比较”的思想, 快速评估机组启停计划的优劣, 从而克服了两阶段法固有的迭代收敛缓慢的弊端. 最后, 对10~100机24时段标准火电测试系统和某省实际128机96时段大规模复杂电源系统进行仿真测试, 并与其他优化算法的求解结果进行了详细的对比分析. 结果表明, 所提出的方法用于解决大规模尤其是复杂电源UC问题是可行的, 具有工程实用价值.

2 序优化理论简介(Brief introduction of ordinal optimization theory)

由哈佛大学何毓琦教授提出的序优化理论, 立足于大量仿真实验和严格的理论证明, 以满足实际工程需要为目的, 简化优化问题复杂程度、节省大量计算时间, 同时保证能以较高的概率求得足够好的解. 且实践证明序优化理论已经在输电网规划^[22-23]、配电

网规划^[24]、电力市场竞标^[25]等各领域得了应用.

序优化理论有两个核心思想: “目标软化”和“序比较”. 目标软化的含义在于当获取全局最优解在实际上不可行或是很困难时, 将求解最优解的目标放松到以足够高的概率求取足够好的解; 序比较的含义在于确定解 θ_1 和 θ_2 的大小关系比计算 θ_1 和 θ_2 实际值更为容易. 序优化理论算法步骤如下:

2.1 形成表征集合 Θ_N (Forming representative samples Θ_N)

在接近无限的解空间 Θ 中随机抽取 N 个可行解, 形成表征集合 Θ_N , 文[26]指出一般 N 取1000, 并证明了1000个可行解中包含至少一个 Θ 中前0.5%的可行解(即, 足够好解)的概率接近100%, 从而将原始解空间软化到1000个可行解构成的表征集合 Θ_N .

2.2 粗糙评估并估计 OPC 曲线(Rough estimation and confirmation of ordered performance curves)

对于待解决的优化问题, 根据设计出的粗糙评估方法, 粗糙评估 N 个可行解, 将其从小到大排序(序比较)并做出其OPC(ordered performance curves)曲线. 该曲线的横轴代表 Θ_N 中可行解的序号, 纵轴代表其每个可行解粗糙评估后的目标函数值. 基于大量仿真试验的结果, 序优化理论将所有优化问题分5类, 即: Steep型、Bell型、Neutral型、U型、Flat型^[26]. 这5类优化问题对应的OPC曲线如图1所示.

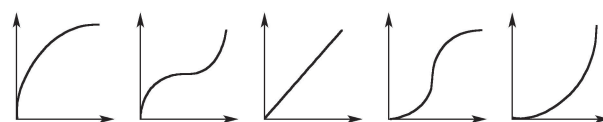


图1 OPC曲线

Fig. 1 Ordered performance curves

2.3 确定需要精确评估的S集合大小(Computation to the size of subset S)

在确定OPC曲线类型后, 从 Θ_N 中随机抽取20个可行解, 求得其对应的粗糙目标函数值和精确目标函数值, 经过统计处理, 得到其误差分布情况 $U \sim (-\omega, \omega)$ 之后, 选取粗糙排序后的前 s 个可行解做精确评估. 且 s 的个数由以下公式确定:

$$s = Z(k, g) = e^{Z_0} k^\rho g^\gamma + \eta, \quad (1)$$

式中: Z_0, ρ, γ, η 是对应OPC曲线和误差分布下的回归参数, 具体值由文[26]给出; k 和 g 的值预先设定, g 代表了 N 个可行解中的足够好子集 G 中的真实足够好解个数; s 代表选择子集 S 中需要精确评估的解个数; k 代表了要求 G 和 S 的交集中至少包含的真实足够好解个数.

2.4 精确评估S集合中的可行解(Accurate estimation of designs in subset S)

精确评估S集合中的可行解,并从小到大排序,选取前k个作为足够好的解. S集合中将以至少 α 的概率包含k个足够好的解,一般 α 取95%^[26],即,回归参数表是在确保 α 的概率下通过大量仿真实验得出. 序优化理论将原本需精确仿真整个解空间的过程缩减到有限次(N次)粗糙仿真和s次精确仿真,并确保以至少 α 的概率使得前k个解属于预先设定的足够好子集G.

2.5 优化结果的验证思路(Assessment of optimization results)

由于序优化方法优化所得的最终结果不具备唯一性,如何验证其是否为足够好解是该优化方法有效性的关键. 目前均通过S集合与真实足够好解集G集合的交集中包含的解个数是否大于预设的k,即 $|G \cap S| \geq k$,来判断. 若该式成立,则证明序优化方法求解的有效性. 后续,将在算例中以具体数据进行详细论证.

3 多类型复杂电源机组组合数学模型(Mathematical model of multi-type complex power unit commitment)

3.1 目标函数(Objective function)

$$T_c = \min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_g} [w_1 A_i(P_i^t) I_i^t + w_2 B_i(P_i^t) I_i^t + w_3 C_i(P_i^t) I_i^t + S_{c,i} I_i^t (1 - I_i^{t-1})] = \min(K_{\text{cost}} + S_{\text{cost}}), \quad (2)$$

式中: T为总时段数(T取96), $t = 1, 2, 3, \dots, T$; N_g 为总机组数, $i = 1, 2, 3, \dots, N_g$; P_i^t 为机组i在t时刻的出力; I_i^t 为机组i在t时刻的启停状态, 关机为0, 开机为1; $A_i(P_i^t)$, $B_i(P_i^t)$, $C_i(P_i^t)$ 为机组i在t时刻的煤耗费用、购电费用、SO₂排放费用; w_1, w_2, w_3 为三项指标各自的权重且满足 $\sum_{i=1}^3 w_i = 1$; $S_{c,i}$ 为机组i的启动费用. 在调度周期内,所有机组的三项指标加权和为机组的总运行成本 K_{cost} ,所有机组的启动费用之和为机组的总启动成本 S_{cost} , T_c 为社会总成本,且有

$$A_i(P_i^t) = p_c \xi_i P_i^t, \quad (3)$$

$$B_i(P_i^t) = b_i P_i^t, \quad (4)$$

$$C_i(P_i^t) = 2p_{\text{so}_2} F_i S_i (1 - N_{i,\text{so}_2}) (c_{i,2} P_i^{t2} + c_{i,1} P_i^t), \quad (5)$$

式中: p_c 为煤炭的价格; ξ_i 为机组i的设计煤耗; b_i 为机组i的购电电价; p_{so_2} 为排放SO₂的惩罚; F_i 为机组i煤中的硫转化成SO₂的转化率; S_i 为机组i所用煤的含硫量; N_{i,so_2} 为机组i的脱硫效率; $c_{i,2}$ 和 $c_{i,1}$ 分别为机组i的SO₂排放函数二次项和一次项系数.

式(2)中,启动费用具体为

$$S_{c,i} = \begin{cases} S_{\text{hot},i}, & T_{i,\text{off}} \leq -X_i^t \leq T_{i,\text{off}} + T_{i,\text{cold}}, \\ S_{\text{cold},i}, & -X_i^t > T_{i,\text{off}} + T_{i,\text{cold}}, \end{cases} \quad (6)$$

式中: $S_{\text{hot},i}$ 和 $S_{\text{cold},i}$ 为机组i的折算后的热启动、冷启动成本; $T_{i,\text{off}}$ 为机组i的最小持续停机时间; X_i^t 为机组i在t时刻已持续运行时间(正)或持续停机时间(负); $T_{i,\text{cold}}$ 为机组i的冷启动时间.

3.2 系统运行约束(System operating constraints)

功率平衡约束:

$$\sum_{i=1}^{N_g} I_i^t P_i^t = D^t, \quad (7)$$

式中 D^t 为t时刻的负荷.

旋转备用约束:

$$\sum_{i=1}^{N_g} I_i^t P_{i,\text{max}} \geq D^t + R^t, \quad (8)$$

式中 R^t 为t时刻的旋转备用容量.

相邻时段所有机组发电出力的总变化量应能够满足系统负荷波动的约束:

$$\left| \sum_{i=1}^{N_g} (P_i^t - P_i^{t-1}) \right| \geq |D^t - D^{t-1}|. \quad (9)$$

3.3 机组特性约束(Unit features constraints)

机组出力上、下限约束:

$$P_{i,\text{min}} I_i^t \leq P_i^t \leq P_{i,\text{max}} I_i^t, \quad (10)$$

式中: $P_{i,\text{min}}$, $P_{i,\text{max}}$ 分别为机组t的出力下、上限.

最小持续运行时间约束:

$$(X_i^{t-1} - T_{i,\text{on}})(I_i^{t-1} - I_i^t) \geq 0, \quad (11)$$

式中 $T_{i,\text{on}}$ 为机组i的最小开机运行时间.

最小持续停机时间约束:

$$(-X_i^{t-1} - T_{i,\text{off}})(I_i^t - I_i^{t-1}) \geq 0. \quad (12)$$

单机爬坡和滑坡及开停机功率限值约束:

$$P_i^t - P_i^{t-1} \leq r_{i,\text{up}} I_i^{t-1} + P_{i,\text{start}} (I_i^t - I_i^{t-1}) + (1 - I_i^t) P_{i,\text{max}}, \quad (13)$$

$$P_i^{t-1} - P_i^t \leq r_{i,\text{down}} I_i^t + P_{i,\text{shut}} (I_i^{t-1} - I_i^t) + (1 - I_i^{t-1}) P_{i,\text{max}}, \quad (14)$$

式中: $r_{i,\text{up}}$ 和 $r_{i,\text{down}}$ 为机组i的爬坡、滑坡速率; $P_{i,\text{start}}$ 和 $P_{i,\text{shut}}$ 为机组的开、停机功率限值.

3.4 一次能源约束(Primary energy constraints)

水量限制约束:

$$\sum_{t=1}^T P_h^t I_h^t \leq E_h, \quad (15)$$

式中: 下标h表示全部机组中的水电机组; E_h 为水电机组h一天内限制的发电量.

因为本文所构造的是日UC问题模型, 在实际调度系统中, 制定日前发电计划时调度人员通常采用的是已经综合考虑过水库特性, 和上、下游用水需求等其他因素后得到的日水量限制. 所以, 本文所提的UC模型亦采用这种思路来考虑水电机组参加UC的约束, 即: 对水电机组考虑日水量限制.

4 基于序优化理论的求解方法 (Solving method based on ordinal optimization theory)

4.1 引入序优化的求解思路(Introduction of ordinal optimization theory solution)

式(2)–(15)所描述的复杂电源UC问题是一典型的含连续–离散变量的高维非线性复杂优化问题. 采用序优化理论求解该UC问题, 其本质是将UC问题解耦为发电机组启停计划的制定和机组负荷分配(economic dispatch, ED)两个子问题, 即, 离散变量 I_i^t 的求解和连续变量 P_i^t 的求解两个子问题. 其中: 机组启停计划的制定即为UC问题中离散变量的求解, 具体是指表征集合的形成, 依据待优化UC问题特性生成相应的机组启停方案; ED即为UC问题中连续变量的求解, 用于确定机组96时段出力曲线, 具体包括机组出力优化的粗糙模型和精确模型的建立及求解. 且ED的优化所得的连续变量结果(机组优化出力曲线)用于评估离散变量值(可行的机组启停计划)并排序形成OPC曲线. 以下按照序优化的实现步骤详细阐述UC问题的序优化求解方法.

4.2 基于UC问题特性的表征集合的形成(Forming representative samples based on property of UC)

在可行域内随机抽取 N 个可行解构成表征集合 Θ_N 是序优化求解复杂优化问题的第1个步骤. 基于UC问题特性随机抽取的可行解是指同时满足式(7)–(15)所示的约束条件的机组逐时段启停计划, 也就是确定UC问题所包含的离散变量 I_i^t . 这个过程的重点在于, 除式(8)(11)–(12)所示的系统旋转备用约束、最小持续运行时间约束和最小持续停运时间约束仅与离散变量 I_i^t 直接相关外, 其他约束条件均同时与离散变量 I_i^t 和连续变量 P_i^t (即, 机组有功出力)直接相关. 为解耦表示机组启停状态的离散变量与表示机组出力的连续变量, 本文采用以下启发式处理方法来快速抽取机组启停计划并初步校验其是否位于可行域中, 通过检验的机组启停计划则置于表征集合 Θ_N 中.

1) 随机抽取启停计划解时, 按时段抽取. 即, 先将机组根据文[6]中定义的满负荷平均耗费(full-load average cost, FLAC)因子排序生成优先顺序表, 然后再根据式(11)–(12)的最小持续运行、停机时间约束进行筛选, 将筛选后的机组按照FLAC因子从小到大随机抽取第 t 时刻所有机组的启停状态. 之后所有时段

按相同方法处理.

2) 若当前抽取的时段为 t , 则对于时段 t 开机的机组而言, 根据该机组在 $t-1, t, t+1$ 三个连续时段的启停状态, 本文将 t 时段开机的机组分为4类, 分别为(1, 1, 1), (0, 1, 1), (1, 1, 0), (0, 1, 0). 由于开停机功率限值 $P_{i.start}, P_{i.shut}$ 的影响, 在抽取可行的机组启停计划解时, 采用式(16)来确保式(8)所示的旋转备用约束条件成立:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=\{G_1-ON\}^t}^{|G_1-ON\}^t} P_{i.max} I_i^t + \sum_{i=\{G_2-ON\}^t}^{|G_2-ON\}^t} P_{i.start} I_i^t + \\ & \sum_{i=\{G_3-ON\}^t}^{|G_3-ON\}^t} P_{i.shut} I_i^t + \sum_{i=\{G_4-ON\}^t}^{|G_4-ON\}^t} P_{i.start} I_i^t \geq \\ & D^t + R^t, \end{aligned} \quad (16)$$

式中: $\{G_1-ON\}^t, \{G_2-ON\}^t, \{G_3-ON\}^t, \{G_4-ON\}^t$ 分别为时刻第1, 2, 3, 4类开机机组序号集合.

3) 为确保抽取机组启停计划能够满足之后ED过程中式(7)所示的功率平衡约束, 在随机抽取可行解时, 毋须逐时段进行开机机组最低出力能力之和校验:

$$\sum_{i=1}^{N_g} P_{i.min} I_i^t \leq D^t. \quad (17)$$

4) 对于水电机组, 采用式(18)所示的约束来进一步筛选可行的机组启停计划解, 从而确保之后ED过程满足式(15)的水量限制约束.

$$\sum_{t=1}^T P_{h.min} I_h^t \leq E_h. \quad (18)$$

综上所述, 通过以上4个步骤校验的机组启停计划解基本是位于UC模型的可行域中, 但仍可能存在少量实际不可行解. 因此, 在具体实现时, 为确保一定冗余度, Θ_N 中可预先抽取超过 N 个机组启停计划解.

4.3 机组启动费用的粗糙评估模型(Rough estimation model of unit start-up and shut-down cost)

$$S_{cost} = \sum_{t=1}^{96} \sum_{i=1}^{N_g} [S_{c.i} I_{k,i}^t (1 - I_{k,i}^{t-1})], \quad (19)$$

式中: $I_{k,i}^t$ 为第 i 台机组 t 时刻已知的启停状态, S_{cost} 表示所有机组全天96时段的总启动费用. S_{cost} 的粗糙评估模型采用24个时间断面来计算, 以减少计算量, 具体如式(20)所示. 以下均采用上标“ $\hat{\cdot}$ ”来表示粗糙评估后的值.

$$\hat{S}_{cost} = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^{N_g} [S_{c.i} I_{k,i}^t (1 - I_{k,i}^{t-1})]. \quad (20)$$

4.4 机组运行成本的粗糙评估模型(Rough estimation model of unit operating cost)

以 K_{cost} 表示机组总的运行成本, 基于式(2)–(15)所述的UC模型, K_{cost} 的精确计算模型可归纳如下:

$$K_{cost} = \min \sum_{t=1}^{96} \sum_{i=1}^{N_g} [w_1 A_i (P_i^t) I_{k,i}^t +$$

$$w_2 B_i(P_i^t) I_{k,i}^t + w_3 C_i(P_i^t) I_{k,i}^t], \quad (21)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{i=1}^{N_g} I_{k,i}^t P_i^t = D^t, \\ P_{i,\min} I_{k,i}^t \leq P_i^t \leq P_{i,\max} I_{k,i}^t, \\ P_i^t - P_i^{t-1} \leq r_{i,\text{up}} I_{k,i}^{t-1} + P_{i,\text{start}} (I_{k,i}^t - I_{k,i}^{t-1}) + (1 - I_{k,i}^t) P_{i,\max}, \\ P_i^{t-1} - P_i^t \leq r_{i,\text{down}} I_{k,i}^t + P_{i,\text{shut}} (I_{k,i}^{t-1} - I_{k,i}^t) + (1 - I_{k,i}^{t-1}) P_{i,\max}, \\ \sum_{h=1}^{96} P_h^t I_{k,h}^t \leq E_h, \quad h \in N_g. \end{cases} \quad (22)$$

可见,这是一典型的96时段动态ED优化问题,当机组规模较大时,对一个机组启停计划做精确的ED需要花费较长时间.为了简少计算量,并对 K_{cost} 精确值一定程度的逼近.本文对 K_{cost} 建立粗糙评估模型,简化条件如下:

- 1) 把原有的96时段缩减为24时段.
- 2) 把每个时刻下所开的机组分别合并成为5台超大型火电、水电、核电、生物质、燃气机组.
- 3) 忽略水量限制约束.
- 4) 不考虑有关时间耦合的单机爬坡和滑坡及开停机功率限值约束.

这样就式(21)–(22)所描述的高维含时间耦合约束的优化问题简化为低维、无时间耦合约束的优化问题,如式(23)–(24).因为无时间耦合,目标的最小值即是各时间断面最小值之和.

$$\hat{K}_{\text{cost}} = \sum_{t=1}^{24} \min_{si=1}^5 [w_1 \hat{A}_{si}(P_{si}^t) I_{k,si}^t + w_2 \hat{B}_{si}(P_{si}^t) I_{k,si}^t + w_3 \hat{C}_{si}(P_{si}^t) I_{k,si}^t], \quad (23)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{si=1}^5 I_{k,si}^t P_{si}^t = D^t, \\ P_{si,\min}^t I_{k,si}^t \leq P_{si}^t \leq P_{si,\max}^t I_{k,si}^t, \end{cases} \quad (24)$$

式中: P_{si}^t 为超大型机组 si 在 t 时刻的出力; $I_{k,si}^t$ 为超大型机组 si 在 t 时刻已知的启停状态; $P_{si,\min}^t, P_{si,\max}^t$ 为超大型机组 si 在 t 时刻的出力下、上限; 因此, 式(3)–(5)所述的目标函数值可用式(25)–(27)进行粗糙评估.

$$\hat{A}_{si}(P_{si}^t) = p_c \xi_{si}^t P_{si}^t, \quad (25)$$

$$\hat{B}_{si}(P_{si}^t) = b_{si}^t P_{si}^t, \quad (26)$$

$$\hat{C}_{si}(P_{si}^t) = 2p_{\text{so}_2} F_{si} S_{si} (1 - N_{si,\text{so}_2}^t) \times (c_{si,2}^t P_{si}^2 + c_{si,1}^t P_{si}^t), \quad (27)$$

其中: 超大型机组 si 的出力下限 $P_{si,\min}^t$, 出力上限 $P_{si,\max}^t$, 煤耗系数 ξ_{si}^t , 电价系数 b_{si}^t , 二次排放系数 $c_{si,2}^t$, 一次排放系数 $c_{si,1}^t$, 脱硫率 N_{si,so_2}^t 都与时间相关, 属动态机组参数; t 时刻5类超大型机组的最小、最大有功出力分别用同类所开机组的出力下、上限之和表示; t 时刻5类超大型机组的各项系数分别用所开机组的

各项系数的平均值来近似($\xi_i, b_i, c_{i,2}, c_{i,1}$ 从96时段缩减到24时段时需扩大4倍), 分别为

$$P_{si,\max}^t = \sum_{i=1}^{Ng_{si,\text{on}}^t} P_{i,\max}, \quad P_{si,\min}^t = \sum_{i=1}^{Ng_{si,\text{on}}^t} P_{i,\min}, \quad (28)$$

$$\zeta_{si}^t = \frac{4 \sum_{i=1}^{Ng_{si,\text{on}}^t} \xi_i}{Ng_{si,\text{on}}^t}, \quad b_{si}^t = \frac{4 \sum_{i=1}^{Ng_{si,\text{on}}^t} b_i}{Ng_{si,\text{on}}^t}, \quad (29)$$

$$c_{si,2}^t = \frac{4 \sum_{i=1}^{Ng_{si,\text{on}}^t} c_{i,2}}{Ng_{si,\text{on}}^t}, \quad c_{si,1}^t = \frac{4 \sum_{i=1}^{Ng_{si,\text{on}}^t} c_{i,1}}{Ng_{si,\text{on}}^t}, \quad (30)$$

$$N_{si,\text{so}_2}^t = \frac{\sum_{i=1}^{Ng_{si,\text{on}}^t} N_{i,\text{so}_2}}{Ng_{si,\text{on}}^t}, \quad (31)$$

式中 $Ng_{si,\text{on}}^t$ 为超大型机组 si 在 t 时刻所开的数量.

5 算例1: 标准测试系统(Example 1: Standard test system)

本文采用10~100机24时段标准火电测试系统, 具体参数详见文[6]. 机组1, 3, 4的爬坡和滑坡速率为 $r_{i,\text{up}} = r_{i,\text{down}} = 40 \text{ MW/h}$; 开停机功率限制为^[20] $P_{i,\text{start}} = P_{i,\text{shut}} = 2P_{i,\min}$. 因该标准测试系统仅包含火电机组, 所以无法采用式(23)–(24)中将发电方式相同的机组合并为同一类机组来简化机组ED过程, 所以采用FLAC因子相近的机组合并为同类机组的方式来构建粗糙评估模型. 为便于与其他优化算法的比较, 本算例中优化目标函数仅考虑煤耗和机组启动成本, 即, 购电费用、 SO_2 排放费用的权重 w_1, w_2 都为0. ED过程采用基于广义简约梯度算法的GAMS-CONOPT解法器来实现. 本文所采用的计算机硬件配置为CPU 2.4 GHz, 4 GB RAM, WIN 7(32 bit).

为了验证序优化方法应用于该标准系统的有效性, 对各算例 Θ_N 中的所有机组启停计划进行精确评估, 获取其真实足够好解集 G , 并检验 G 集合中所包含的真实足够好解, 将其结果列于表1.

表1 序优化应用于机组组合的可行性验证

Table 1 Feasibility of ordinal optimization theory to UC

机组数量	g	k	OPC 曲线	ω	s	$ G \cap S $
10	10	1	Bell	0.0875	45	7
20	10	1	Bell	0.1257	45	6
40	10	1	Bell	0.1357	45	8
60	10	1	Bell	0.1379	45	7
80	10	1	Bell	0.1468	45	5
100	10	1	Bell	0.1426	45	6

由表1可见 S 集合中包含的真实足够好解均大于

预先设定的 $k = 1$ 个. 因此将序优化算法应用于标准测试系统的UC问题求解是能够求解到足够好解的.

同时, 分别对标准系统下各算例采用序优化方法计算30次, 选择最终足够好解最优的一次与其他优化算法结果进行对比. 表2展示了其他文献优化算法、GAMS-BARON解法器下基于MINLP的分支定界法(branch and bound, BB)、序优化法求解所得目标函数值的对比结果. 表3展示了BB法与序优化法求解时间的对比结果.

表2 不同算法结果对比

Table 2 Comparison of different algorithms

机组数量	MI-SOCP ^[13]	IPSDP ^[27]	NSC ^[20]	BB	序优化
10	565777	567034	567990	568710	569751
20	1130647	NA	NA	1136650	1139504
40	2259203	NA	NA	2260214	2261900
60	3382470	NA	NA	3383489	3401850
80	4511813	NA	NA	4531817	4570808
100	5638456	NA	NA	5658458	5697510

注: 表2中目标函数单位为\$根据参考文献所示, 表中“NA”表示无计算结果. MI-SOCP为二阶锥规划法; IPSDP为内点半定规划法; NSC为拉格朗日松弛框架下的充分必要条件法.

表3 分支定界法和序优化法的计算时间对比

Table 3 Comparison of computing time between BB and OO

机组数量	BB法 计算时间/s	本文方法 计算时间/s
10	12	40.2
20	300	42.5
40	600	47.8
60	1067	55.8
80	2010	64.2
100	4223	72.4

由表2-3分析可见:

1) 采用序优化方法计算的结果略大于其他算法(约高出0.18%~1.3%). 这主要是因为“目标软化”是序优化方法的两大主要特征之一, 该方法不是致力于求解全局最优解, 而是将优化目标放松到求解满足工程实际需要的足够好满意解(这在工程上有实际意义), 传统优化方法求解的是全局最优或局部最优解, 从这个意义上看, 序优化方法最终求取的结果比传统优化方法稍差一点是可以理解的.

2) 在与BB法计算时间的对比中可见, 当计算规模的10机系统时, 序优化方法所需计算时间为BB法

的3.35倍, 当机组规模增加到100机时, 序优化计算所需时间迅速降为BB法的1.17%. 可见, 随着计算规模的增大, 序优化的计算效率相对其他优化方法优势十分明显.

3) 序优化理论求解UC问题的计算时间并没有随着机组规模的扩大呈指数倍增长, 计算时间的增长比例远低于机组数量扩展的比例. 足以体现, 序优化方法在处理高维非线性混合整数的这类复杂优化问题时, 能够很好的避免“维数灾”问题, 且模型维数越高, 计算规模越大, 序优化方法的求解效率优势就更加明显, 这些都是其他优化方法的“硬伤”, 但却是序优化方法的巨大优势所在.

因此, 采用序优化求解大规模高维UC问题是完全可行且有效的.

6 算例2: 某省级实际系统(Example 2: actual province power system)

以下采用某省级实际电力系统2010年1月31日作为典型日算例, 该日属枯大运行方式, 能够代表春节期间电网调峰压力大的系统运行特性. 参与UC的机组为此省级实际电力系统所有直调机组.

6.1 典型日负荷特性分析(Analysis of typical daily load characteristics)

图2是该日的96时段原始负荷曲线, 此曲线包含了外网送电.

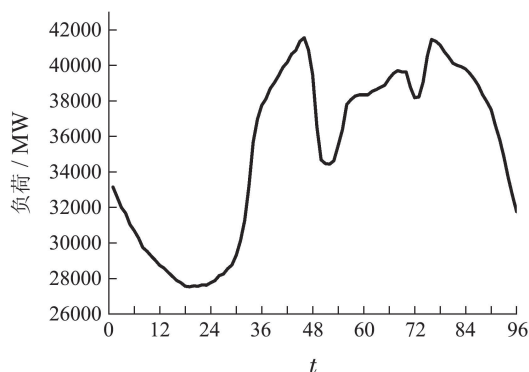


图2 原始负荷曲线

Fig. 2 Original load curve

该日最大负荷为41551.03 M, 出现在11点30分; 日最小负荷27531.67 MW, 出现在4点45分; 日平均负荷为35232.15 MW; 日负荷率为84.79%; 日最小负荷率为66.26%; 日峰谷差为14019.36 MW; 外网送电最高时12460 MW、最低时7130 MW.

6.2 参与的机组情况(Introduction of units)

直调机组包含火电、水电、核电、生物质、燃气发电机组. 以1月31日为例, 除去计划检修容量为7853 MW(26台机组)、临修容量1485 MW(5台机组)、缺燃料受限容量4800 MW(36台机组)、网络受限容量455 MW(4台机组)、停备容量540 MW(6台机组)

后,剩下128台参与机组组合(相同小容量机组合并为一台).其中,火电机组容量共35666.20 MW(105台机组)、水电机组容量共889.88 MW(8台机组)、核电机组容量6120 MW(3台机组)、生物质能机组容量共100 MW(2台机组)、燃气机组容量共2160.4 MW(10台机组).按省水力厅要求,为满足下游用水需求,第5号水电机组日发电水量限制在1800 MWh左右、第8号水电机组日发电水量限制在800 MWh左右,其余水

电机组均按需发电.此外, ξ_i 取800(元/t), p_{so_2} 取2000(元/t).火力发电厂锅炉 F_i 一般取0.8. S_i 与煤炭产地有关,本算例取0.8%,安装脱硫装置的机组 N_{i,so_2} 取95%,未安装的则为0. R^t 取 D^t 的5%. w_1, w_2, w_3 分别取0.6, 0.2, 0.2. $P_{i,start}, P_{i,shut}$ 均取 $P_{i,min}$; 不区分 $S_{cold,i}$ 与 $S_{hot,i}$. 因为机组数量较多,本文只选取5类机组中最典型机组的原始参数(未换算至96时段下)列于下表4.

表4 典型机组参数

Table 4 Parameters of typical units

机组种类	$\xi_i/$ (g/kWh)	$b_i/$ (¥/kWh)	$c_{i,1}/$ (t/MWh)	$c_{i,2}/$ (t/MWh ²)	$P_{i,max}/$ MW	$P_{i,min}/$ MW	$r_{i,up}/r_{i,down}/$ (MW/15 min)	$S_{c,i}/$ ¥	$T_{i,off}/T_{i,on}/$ h	$In_i/$ h
火电1	285	0.5168	0.624	0.00117	660	230	135	248768	9	+8
火电2	316	0.498	0.837	0.001576	210	160	45	147836	9	+24
水电	0	0.3396	0	0	144	20	1500	5760	0.25	+1
核电	0	0.429	0	0	990	990	0	600000	24	+24
生物质	0	0.75	0	0	50	20	15	10312	0.25	+24
燃气	0	0.597	0	0	66	30	90	20627	0.25	+1

6.3 算法过程(Algorithm process)

1) 随机抽取 $N = 1000$ 个机组启停计划组成表征集合 Θ_N .

2) 粗糙评估 Θ_N 中的机组启停计划,由式(25)–(27)计算机组启停计划对应的粗糙目标函数值 \tilde{T}_c , 排序后画出相应的OPC曲线,如图3所示.可见,该OPC曲线属于Bell型.

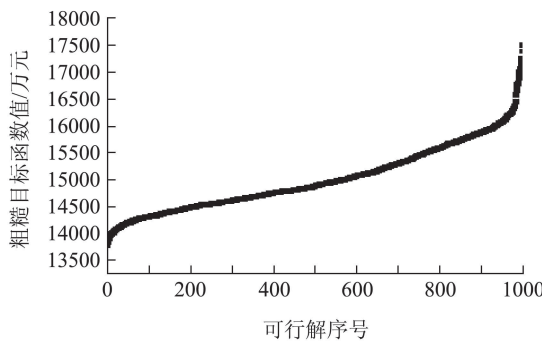


图3 粗糙评估后的OPC曲线

Fig. 3 Estimated ordered performance curve

3) 确定归一化后的样本标准方差值 ω , 获得其误差分布 $U \sim (-\omega, \omega)$. 经过统计处理, 得到该标准方差归一化后为 $\omega = 0.2058$.

4) 设定 $g = 10, k = 1, \alpha = 95\%$, 并根据Bell曲线、误差分布 $U \sim (-0.2058, 0.2058)$, 由文[26]可得对应的参数 $Z_0 = 8.1998, \rho = 1.9164, \gamma = -2.0250, \eta = 10$, 求得 $s = 45$.

5) 选取粗糙评估排序后的前45个机组启停计划做精确评估, 并从小到大排序, 选取前 k 个作为最终

足够好的解. 本算例的最终足够好的解的序号为4. 该解对应的目标函数值为12041.01万元. 由于机组数目较多, 无法一一列出4号解对应的每台机组的启停和出力情况. 图4中给出汇总后的5大类机组在当日96时段开机台数变化曲线; 在图5中给出了表4中6台典型机组的出力情况.

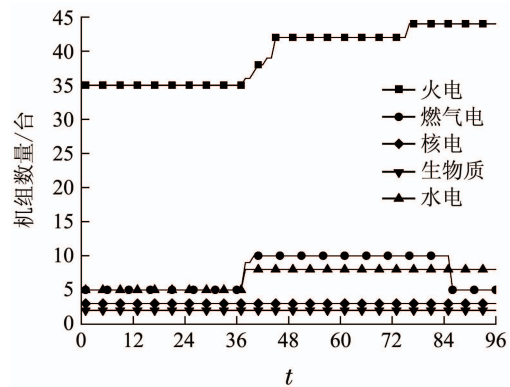


图4 5类机组96时段开机台数变化曲线

Fig. 4 Commitment scheme curves in 96 periods of five kinds of units

由图4可见, 该日参与机组组合的128台直调机组中: 8台水电机组、3台核电机组、2台生物质能机组、10台燃气机组全部投入运行; 43台火电机组投入运行. 前4类机组均属于《节能发电调度办法(试行)》要求下优先安排发电的机组, 说明该机组启停计划符合实际调度要求.

图5表明, 水电机组因水量限制, 全天发电量不能超过1800 MWh, 且因为该日调峰压力较大, 所以

负荷高峰时段之前不出力, 负荷高峰时段之后开始满负载运行直到用尽水量; 生物质能机组与核电机组均带基荷满负载运行; 燃气机组具有优良的调峰特性、变出力迅速, 在负荷高峰时段出力, 而负荷低谷时段关闭, 其两班制运行特性符合该省级电网的实际情况; 火电机组1出力变化大, 承担着主要调峰责任; 而火电机组2则未参与调峰, 主要承担基荷运行。

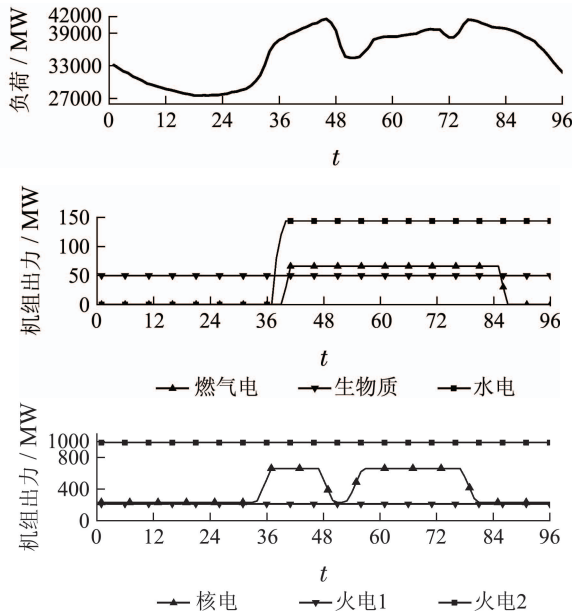


图5 典型机组出力

Fig. 5 Output of typical units

6.4 可行性验证(Verification of feasibility)

对算例2表征集合 Θ_N 进行全部精确评估, 得到其真实足够好解集 G 集合, 表5中给出了 S 集合中真实足够好解的情况. 表中的序号为可行解所对应的序号. 以“_”表示该解属于 G 与 S 的交集的可行解.

表5 S 集合包含的真实足够好解的序号

Table 5 True good enough solutions in subset S

	4	523	977	746	796
	926	153	734	608	720
	646	82	461	166	160
S 集合	595	57	127	498	532
	222	223	348	969	105
	776	259	428	369	326
	897	769	840	833	99
	486	611	506	392	241
	784	313	972	438	248
G 集合	4	241	105	746	854
	125	842	523	359	997

可见, S 集合中包含6个真实足够好解, 远大于预

先设定的 $k = 1$ 个. 这说明了序优化理论应用于复杂电源大规模UC问题是可行并有效的.

6.5 与分支定界法求解结果的对比(Compared with branch and bound method)

为校验序优化算法的稳定性, 本文将该算例分别用序优化算法计算了30次. 图6给出了30次序优化求解结果分布情况.

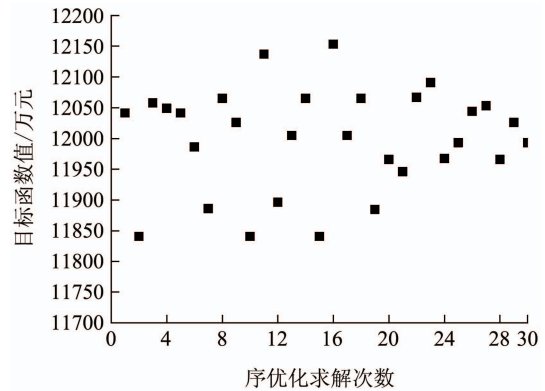


图6 30次序优化计算足够好解

Fig. 6 Good enough solutions with 30 computations in OO

同算例1, 将算例2模型用基于BB法的GAMS-BARON求解器进行求解, 并将其求解结果与30次序优化计算中最好与最差的结果进行对比. 对比结果如表6所示.

表6 序优化法与分支定界法求解结果对比

Table 6 Comparison of OO and BB

			万元
序优化		BB	
最差结果	最好结果		
12153.02	11840.36	11808.49	
计算时间/s	计算时间/s	计算时间/s	
765	750	8660	

本算例所用计算机硬件平台同算例1. 可见, 30次序优化计算的结果对应的目标函数值均大于BB法的求解结果, 但差异并不大, 最大相对误差为2.92%, 最小相对误差为0.27%. 计算时间上, 序优化求解最大节省了近91.17%~91.34%的时间. 可见, 序优化算法在求解大规模复杂电源UC问题时, 能够在较短的时间内求出多个较高质量的满意解.

7 结语(Conclusions)

1) 本文以某省级实际电力系统为应用背景, 以煤耗费用、购电费用、 SO_2 排放费用以及机组启动成本为优化目标, 以带时间耦合关系的系统运行约束、机组特性约束为约束条件, 建立了考虑火电、水电、核电、生物质、燃气多种类型复杂电源的96时

段UC模型,综合考虑了经济、节能、减排三方面的效益.

2) 本文引入序优化理论对UC模型进行求解,依赖启发式方法设计快速高效搜索大量可行机组启停计划的搜索策略;通过建立低维、无时间耦合约束的负荷分配粗糙模型,对抽取的机组启停计划进行快速的评估,从而确定该优化问题的OPC曲线类型.

3) 本文分别采用10~100机24时段标准火电测试系统和128机96时段某省级实际电力系统,通过与其他文献优化算法、GAMS-BARON解法器下BB法的求解结果对比分析,对序优化理论应用于UC问题的可行性和有效性进行了校验.结果表明,采用序优化理论求解多时段动态UC问题能够避免“维数灾”的问题,且系统的规模越大,UC模型越复杂,序优化方法的求解效率优势相对其他算法将更为明显.

4) 在下一步的研究中,将在本文的基础上进一步考虑随机性风电和抽水蓄能机组的影响,使之更符合电网的实际需求.

参考文献(References):

- [1] ZHANG Ning, CHEN Huikun, LUO Xiaoming, et al. Model and algorithm of energy-conservation based generation dispatching for Guangdong Power Grid [J]. *Power System Technology*, 2008, 32(24): 11 – 15, 38.
(张宁, 陈慧坤, 骆晓明, 等. 广东电网节能发电调度计划模型与算法 [J]. 电网技术, 2008, 32(24): 11 – 15.)
- [2] FAN Yuhong, ZHANG Wei, HAN Wenchang, et al. Research on energy-saving generation dispatching model in regional grid [J]. *Power System Protection and Control*, 2009, 37(16): 107 – 111.
(范玉宏, 张维, 韩文长, 等. 区域电网节能发电调度模式研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(16): 107 – 111.)
- [3] ZHANG Huiqi, CHANG Yongji, TANG Dayong, et al. A monthly electric energy plan making method of thermal power generation unit in energy-saving generation dispatching model [J]. *Power System Protection and Control*, 2011, 39(4): 84 – 89.
(张慧琦, 常永吉, 唐大勇, 等. 节能发电调度模式下火力发电单元的月度电能计划编制方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 84 – 89.)
- [4] KUMAR S S, PALANISAMY V. A new dynamic programming based hopfield neural network to unit commitment and economic dispatch [C] // *The 9th International Conference on Information Technology*. Mumbai: IEEE, 2006: 887 – 892.
- [5] LI Jinghua, WEI Hua. Unit commitment via local search point method [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(13): 33 – 40.
(黎静华, 韦化. 求解机组组合问题的领域搜索法 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 33 – 40.)
- [6] SENJYU T, SHIMABUKURO K, UEZATO K, et al. A fast technique for unit commitment problem by extended priority list [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2003, 18(2): 882 – 888.
- [7] LI Yinghao, GUO Ruipeng. A generalized benders decomposition based heuristic algorithm for unit commitment [J]. *Power System Technology*, 2012, 36(3): 179 – 183.
(李颖浩, 郭瑞鹏. 基于广义Benders分解的启发式机组组合优化 [J]. 电网技术, 2012, 36(3): 179 – 183.)
- [8] XU Dan, XIA Shaolian, DING Qiang, et al. Fast unit commitment based on heuristic mixed integer programming [J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(21): 1 – 6.
(许丹, 夏少连, 丁强, 等. 基于启发式混合整数规划法求解大规模机组组合问题 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(21): 1 – 6.)
- [9] LI Jinghua, LAN Fei. Extended priority list method for unit commitment problem [J]. *Power System Protection and Control*, 2010, 38(2): 1 – 7.
(黎静华, 兰飞. 适合于机组组合问题的扩展优先顺序法 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 1 – 7.)
- [10] WANG Nan, ZHANG Lizi, XIE Guohui. An improved mixed integer quadratic programming algorithm for unit commitment [J]. *Power System Protection and Control*, 2010, 34(15): 28 – 32.
(王楠, 张粒子, 谢国辉. 求解机组组合问题的改进混合整数二次规划算法 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(15): 28 – 32.)
- [11] YANG Linfeng, JIAN Jinbao, ZHEN Haiyan, et al. A sub hyper-cube tight mixed integer programming extended cutting plane method for unit commitment [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(1): 99 – 108.
(杨林峰, 简金宝, 郑海艳, 等. 求解机组组合问题的次超立方紧混合整数规划广义割平面法 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 99 – 108.)
- [12] LI Xiaolei, ZHOU Jingyang, YU Erkeng, et al. Linear mixed integer programming algorithm for unit commitment based on dynamic search [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2008, 32(21): 18 – 21.
(李晓磊, 周京阳, 于尔铿, 等. 基于动态搜索线性混合整数法的机组组合新算法 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(21): 18 – 21.)
- [13] QUAN Ran, WEI Hua, JIAN Jinbao. Solution of large scale unit commitment by second-order cone programming [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(25): 101 – 107.
(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.)
- [14] ONGSAKUL W, PETCHARAKS N. Unit commitment by enhanced adaptive Lagrangian relaxation [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2004, 19(1): 620 – 628.
- [15] HE Xiaoyu, ZHANG Lizi, XIE Guohui. Unit commitment using an improved Lagrangian Relaxation method [J]. *Power System Protection and Control*, 2010, 38(17): 16 – 21.
(何小宇, 张粒子, 谢国辉. 改进的拉格朗日松弛法求解机组组合问题 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 16 – 21.)
- [16] KAZARLIS S A, BAKIRTZIS A G, PETRIDIS V. A genetic algorithm solution to the unit commitment problem [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1996, 11(1): 83 – 92.
- [17] DAMOUSIS I G, BAKIRTZIS A G, DOKOPOULOS P S. A solution to the unit-commitment problem using integer-coded genetic algorithm [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2004, 19(2): 1165 – 1172.
- [18] 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.
(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.)
- [19] ZHANG Jiong, LIU Tianqi, SU Peng, et al. Unit commitment optimization based on genetic algorithm and particle swarm optimization hybrid algorithm [J]. *Power System Protection and Control*, 2009, 37(9): 25 – 29.
(张炯, 刘天琪, 苏鹏, 等. 基于遗传粒子群混合算法的机组组合优化 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(9): 25 – 29.)
- [20] GUO Sangang, GUAN Xiaohong, ZHAI Qiaozhu. A new necessary and sufficient condition for checking feasibility of a solution to unit commitment problems with ramp rate constraints [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(24): 14 – 19.
(郭三刚, 管晓宏, 翟桥柱. 具有爬升约束机组组合的充分必要条件 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 14 – 19.)

- [21] SHAW J J. A direct method for security-constrained unit commitment [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1995, 10(3): 1329 – 1342.
- [22] XIE Min. Study on modeling and solution method for transmission expansion planning in electric power market [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.
(谢敏. 电力市场环境下的输电规划建模及求解方法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.)
- [23] XIE M, ZHONG J, WU F F. Multiyear transmission expansion planning using ordinal optimization [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2007, 22(4): 1420 – 1428.
- [24] LIU Yun, CHEN Jinfu, XIE Min. Distribution network planning based on the ordinal optimization theory [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 30(22): 21 – 24.
(刘云, 陈金富, 谢敏. 基于序优化理论的配电网规划 [J]. 电力系统自动化, 2007, 30(22): 21 – 24.)
- [25] GUAN X, HO Y C, LAI F. An ordinal optimization based bidding strategy for electric power suppliers in the daily energy market [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2001, 16(4): 788 – 797.
- [26] LAU T W E, HO Y C. Universal alignment probabilities and subset selection for ordinal optimization [J]. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 1997, 93(3): 455 – 489.
- [27] WEI Hua, WU Aqing, BAI Xiaoqing. An interior point semidefinite programming for unit commitment problems [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(1): 35 – 40.
(韦化, 吴阿琴, 白晓清. 一种求解机组组合问题的内点半定规划方法 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 35 – 40.)

作者简介:

谢敏 (1978–), 女, 博士, 副教授, 目前研究方向为电力系统优化运行与控制, E-mail: minxie@scut.edu.cn;

诸言涵 (1990–), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为电力系统优化运行与控制, E-mail: zyh13131@163.com;

吴亚雄 (1990–), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统优化与故障诊断, E-mail: jxpxlxwyx@163.com;

闫圆圆 (1988–), 女, 硕士研究生, 目前研究方向为电力系统优化运行与控制, E-mail: 837204821@qq.com;

刘明波 (1964–), 男, 博士, 教授, 目前研究方向为电力系统优化运行与控制, E-mail: epmbliu@scut.edu.cn.