

DOI: 10.7667/PSPC180157

含抽水蓄能电网安全约束机组组合问题的混合整数线性规划算法

卢艺¹, 卢苑², 梁俊文², 祝宇翔¹, 林舜江², 刘明波²

(1. 深圳供电局有限公司电力调度控制中心, 广东 深圳 518001; 2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 抽水蓄能机组的投运对电网发电调度计划的制定具有很大影响, 建立了含抽水蓄能机组电网的安全约束机组组合模型。以考虑了抽水蓄能机组启停费用的所有机组总运行费用为目标函数, 根据抽水蓄能机组的不同运行工况给出旋转备用容量的解析表达式, 同时在系统功率平衡约束中考虑了网络损耗的影响, 并考虑了抽水蓄能机组的运行调度约束及网络安全约束。为了保证模型求解的可靠性和提高模型求解的计算效率, 将目标函数进行分段线性化, 并根据抽水蓄能机组的运行特点将其旋转备用容量约束等价转化为线性表达式。同时采用一种动态分段线性化方法近似逼近网络损耗, 从而将机组组合模型转化为混合整数线性规划模型, 并采用成熟的数学优化求解器 CPLEX 进行求解。对某实际 23 机 306 节点电网算例的计算结果表明, 所提出的混合整数线性规划调度模型的网损逼近效果合理正确, 算法求解速度快, 具有较好的工程实用价值。

关键词: 安全约束机组组合; 抽水蓄能; 旋转备用容量; 网损线性化; 混合整数线性规划

Mixed integer linear programming algorithm for solving security constrained unit commitment problem of power grid with pumped storage hydro

LU Yi¹, LU Yuan², LIANG Junwen², ZHU Yuxiang¹, LIN Shunjiang², LIU Mingbo²

(1. Power Dispatching Control Center of Shenzhen Power Supply Bureau, Shenzhen 518001, China;

2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The operation of Pumped Storage Hydro (PSH) units has great influence on the compilation of generation scheduling of power grid, a security constrained unit commitment model of power grid with PSH units is established. In the model, total operation cost of all units which includes the start up / stop down cost of PSH units is considered as the objective function, an analytical expression of the spinning reserve capacity of PSH units is given according to different operation conditions, and the network loss is considered in the power balance constraint of the system, the operation scheduling constraints of PSH units and the network security constraints are also considered. In order to ensure the reliability and improve the calculation efficiency of model solution, the objective function is piecewise linearized and the spinning reserve capacity constraint of PSH units is equivalently transformed into a linear expression according to their operation characteristics. Meanwhile, a dynamic piecewise linearization method is adopted to approximate the network loss, so that the unit commitment model is transformed into a Mixed Integer Linear Programming (MILP) model, which can be solved by using the mature mathematical optimization solver CPLEX. Test results on an actual power grid of 23 units and 306 buses demonstrate that the approximation effect of network loss in the proposed MILP model is reasonable and correct, and the proposed algorithm is fast and has good practical value in engineering.

This work is supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2013CB228205), Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. 2015A030313233), and Science and Technology Project of Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd (SZKJXM20160174).

Key words: security constrained unit commitment; pumped storage hydro; spinning reserve capacity; linearization of network loss; mixed integer linear programming

0 引言

安全约束机组组合(Security Constrained Unit

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目资助(2013CB228205); 广东省自然科学基金项目资助(2015A030313233); 深圳供电局有限公司科技项目资助(SZKJXM20160174)

Commitment, SCUC)是电力系统运行调度中的关键环节, 对制定电网日前发电调度计划具有重要指导作用。因此, 国内外学者对于 SCUC 问题的建模和求解方法进行了深入研究, 提出了包括动态规划法^[1]、拉格朗日松弛法^[2-3]、优先顺序法^[4]、混合整数线性规划(Mixed Integer Linear Programming, MILP)法^[5-6]等多种方法。随着电网互联规模的不断发展扩大, 使得 SCUC 问题规模变得愈发的庞大和复杂, 考虑

到电网运行部门对 SCUC 计算精度和计算速度的要求越来越高,目前的解决方法通常是将 SCUC 问题转化为一个 MILP 问题进行求解。

抽水蓄能机组作为一种特殊的电源形式,在现代电网中的应用越来越广泛,其出力可以迅速改变以应对电网中功率的不确定波动,适用于电网运行中的调峰填谷,且其具有快速调节性能的旋转备用容量能够有效应对负荷或风电功率预测误差对发电调度带来的影响。目前国内外对于机组组合和经济调度问题中抽水蓄能机组模型的研究较多^[7-12],但对于抽水蓄能机组提供的旋转备用容量的描述不够充分。文献[7-8]研究了电力系统日前发电调度计划中风电与抽水蓄能机组的协调方法,但均未对抽水蓄能机组的旋转备用容量进行描述;文献[9]提出的优化运行模型中考虑了抽水蓄能机组的启停限制和工况转换限制,但也没有考虑在不同运行工况下其旋转备用容量的描述;文献[10]提出了一种抽水蓄能和风电的合作运行方式,但在模型中只简单地考虑了发电工况下抽水蓄能机组的正旋转备用容量;文献[11]中则只考虑了发电工况下抽水蓄能机组所能提供的正负旋转备用容量,未考虑抽水工况下的旋转备用容量;文献[12]对抽水蓄能机组的运行工况及出力同时进行优化,并考虑了工况切换时间限制,但是关于抽水蓄能机组的相关描述为非线性表达式,模型是非凸的,并且也未对抽水蓄能机组的旋转备用容量进行分析。可以看到,目前鲜有文献对于抽水蓄能机组的发电、抽水和停运 3 种工况给出旋转备用容量的解析表达式,需要进行更加完整的描述。

在机组组合和优化调度问题中考虑网络损耗的影响对于获得更加准确的调度结果是非常重要的。目前,在绝大多数的机组组合和经济调度问题中,系统的功率平衡约束通常忽略了网络损耗^[13-15],或者假定网络损耗为总负荷乘以某个百分比^[16-17],作为常数处理,与机组出力无关,这与实际情况存在一定偏差,影响到制定的日前发电调度计划的准确性。文献[12]在系统功率平衡约束中考虑了网络损耗,但是关于机组出力的二次表达式,这造成系统的功率平衡约束为非凸约束,当系统规模增大时会影响模型的求解效果和计算速度;文献[18]提出了一种基于直流网络表示的多阶段最优潮流模型,对网络损耗采用余弦函数表示,需要采用非线性规划方法求解该非凸优化问题;为了提高计算效率,文献[19]中采用一种静态分段线性化方法处理网络损耗的二次表达式,但是若要获得较为精确的网损值,需要引入大量的约束问题使规模变得很大。

基于上述分析,本文建立了含抽水蓄能机组的电网安全约束机组组合模型,详细地考虑了抽水蓄能机组提供的旋转备用容量,针对抽水蓄能机组在不同的运行工况下,分别对其所能提供的正、负旋转备用容量进行分析并将其线性化,考虑了系统的网络损耗,并采用一种动态分段线性化方法来逼近网络损耗二次项^[20],在每一次迭代过程中获得二次网损项的线性割集,从而将优化模型转化为 MILP 模型,并采用 CPLEX 求解器实现对 MILP 模型的快速求解以获得机组的日前发电调度计划。

1 含抽水蓄能的安全约束机组组合模型

1.1 目标函数

以最小化所有机组的运行费用之和为目标,机组的运行费用包括开停机费用与发电燃料消耗费用,考虑了抽水蓄能机组开停机费用,如式(1)所示。

$$\min \sum_{t=1}^T [\sum_{i=1}^{N_1} (C_{iU,t} + C_{iD,t} + F_{i,t}) + \sum_{s=1}^{N_2} (C_{sU,t} + C_{sD,t})] \quad (1)$$

式中: T 为调度周期总的时段数,本文将 15 min 作为一个时段,则一天包括 96 个时段; N_1 为常规火电机组(包括燃煤、燃气机组)总数; $C_{iU,t}$ 和 $C_{iD,t}$ 分别为常规火电机组 i 在时段 t 的开机和停机费用; $F_{i,t}$ 为常规火电机组 i 在时段 t 的发电费用; N_2 为抽水蓄能机组总数; $C_{sU,t}$ 和 $C_{sD,t}$ 分别为抽水蓄能机组 s 在时段 t 的开机和停机费用,由于抽水蓄能机组的运行不会消耗燃料,所以发电费用为零。

对于燃煤、燃气机组,其发电费用一般用机组出力的二次函数表示,如式(2)所示。

$$F_{i,t} = A_{i,2} \cdot P_{i,t}^2 + A_{i,1} \cdot P_{i,t} + A_{i,0} \quad (2)$$

式中: $A_{i,2}$ 、 $A_{i,1}$ 、 $A_{i,0}$ 为机组 i 发电费用函数的二次项、一次项、常数项系数; $P_{i,t}$ 为机组 i 在时段 t 的出力。

1.2 约束条件

1) 机组的开停机费用约束

开机费用约束为

$$\begin{cases} C_{iU,t} \geq K_i (I_{i,t} - I_{i,t-1}), & C_{iU,t} \geq 0 \\ C_{sU,t} \geq K_s (Z_{s,t} - Z_{s,t-1}), & C_{sU,t} \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

停机费用约束为

$$\begin{cases} C_{iD,t} \geq J_i (I_{i,t-1} - I_{i,t}), & C_{iD,t} \geq 0 \\ C_{sD,t} \geq J_s (Z_{s,t-1} - Z_{s,t}), & C_{sD,t} \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: K_i 和 J_i 分别为常规机组 i 的单次开机和停机费用; K_s 和 J_s 分别为抽水蓄能机组 s 的单次开机和停机费用; $I_{i,t}/Z_{s,t}$ 为常规机组 i /抽水蓄能机组 s 在时段 t 的启停状态,启动状态值为 1,停机状态值为 0。

2) 系统功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^{N_1} P_{i,t} + \sum_{s=1}^{N_2} (P_{pg,s,t} + P_{pp,s,t}) + \sum_{j=1}^{N_3} P_{j,t} = P_{Load,t} + \sum_{l=1}^{N_L} P_{Loss,l,t} \quad (5)$$

式中: N_3 为系统与外电网联络线的数目; $P_{j,t}$ 为第 j 条与外电网联络线在时段 t 对系统的注入功率; $P_{pg,s,t}$ 和 $P_{pp,s,t}$ 分别为抽水蓄能机组 s 在时段 t 的发电功率和抽水功率, 发电功率为正, 抽水功率为负; $P_{Load,t}$ 为时段 t 的系统总负荷; $P_{Loss,l,t}$ 为时段 t 支路 l 的网损; N_L 为系统中的支路总数。

基于直流潮流模型, 支路网损 $P_{Loss,l,t}$ 可表示成式(6)^[21]。

$$P_{Loss,l,t} = g_{km} \left[\sum_{i \in \psi} (X_{ki} - X_{mi}) P_{i,t} - \sum_{s \in L} (X_{ks} - X_{ms}) D_{s,t} \right]^2 \quad (6)$$

式中: g_{km} 为支路 $l(k,m)$ 的电导; X_{ki} 为基态下直流潮流模型中节点阻抗矩阵的元素; ψ 为发电机节点以及和外电网联络线功率注入节点的集合; L 为负荷节点集合; $D_{s,t}$ 为节点 s 在时段 t 的负荷值, 可由节点负荷预测得到^[22]。

3) 常规机组出力上下限约束

$$I_{i,t} P_{i,\min} \leq P_{i,t} \leq I_{i,t} P_{i,\max} \quad (7)$$

式中: $P_{i,\min}$ 为常规机组 i 的最小出力; $P_{i,\max}$ 为常规机组 i 的最大出力。

4) 机组爬坡/滑坡约束

考虑机组在开机的第一个时段或停机的最后一个时段不超过机组的最小出力, 爬坡/滑坡约束为

$$\begin{cases} P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq r_u T_{15} I_{i,t-1} + P_{i,\min} (I_{i,t} - I_{i,t-1}) \\ P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq r_d T_{15} I_{i,t} + P_{i,\min} (I_{i,t-1} - I_{i,t}) \end{cases} \quad (8)$$

式中: r_u 和 r_d 分别为机组 i 的爬坡率和滑坡率; T_{15} 为一个时段 15 min。

5) 机组最小开停机时间约束^[23]

最小开机时间约束为

$$\begin{cases} I_{i,t} = 1, t \in [1, U_i], U_i = \min\{T, (T_{\text{oni}} - X_{\text{oni},0}) I_{i,0}\} \\ \sum_{n=t}^{t+T_{\text{oni}}-1} I_{i,n} \geq T_{\text{oni}} (I_{i,t} - I_{i,t-1}), t \in [U_i+1, T - T_{\text{oni}} + 1] \\ \sum_{n=t}^T [I_{i,n} - (I_{i,t} - I_{i,t-1})] \geq 0, t \in [T - T_{\text{oni}} + 2, T] \end{cases} \quad (9)$$

最小停机时间约束为

$$\begin{cases} I_{i,t} = 0, t \in [1, D_i], D_i = \min\{T, (T_{\text{offi}} - X_{\text{offi},0})(1 - I_{i,0})\} \\ \sum_{n=t}^{t+T_{\text{offi}}-1} (1 - I_{i,n}) \geq T_{\text{offi}} (I_{i,t-1} - I_{i,t}), t \in [D_i+1, T - T_{\text{offi}} + 1] \\ \sum_{n=t}^T [1 - I_{i,n} - (I_{i,t-1} - I_{i,t})] \geq 0, t \in [T - T_{\text{offi}} + 2, T] \end{cases} \quad (10)$$

式中: U_i/D_i 表示机组 i 在调度周期开始必须开机/

停机的时段, 是由上个调度周期结束时机组的状态决定的; $T_{\text{oni}}/T_{\text{offi}}$ 为机组 i 的最小开机时间/最小停机时间对应的时段数; $X_{\text{oni},0}/X_{\text{offi},0}$ 为机组 i 在调度周期开始时已经连续开机/停机的时间对应的时段数。

6) 网络安全约束

根据直流潮流模型, 计算支路传输功率。

基态条件为

$$\begin{cases} P_{l,km,t} = \sum_{i \in \psi} \left(\frac{X_{ki} - X_{mi}}{x_{km}} \right) P_{i,t} - \sum_{s \in L} \left(\frac{X_{ks} - X_{ms}}{x_{km}} \right) D_{s,t} \\ -\bar{P}_{l,km} \leq P_{l,km,t} \leq \bar{P}_{l,km} \end{cases} \quad (11)$$

式中: l 为需要进行安全校验的支路, 如果需要考虑输电断面, 则要将输电断面所组成各个支路的功率值累加起来; $P_{l,km,t}$ 为时段 t 支路 $l(k,m)$ 的传输功率; x_{km} 为支路 $l(k,m)$ 的电抗值; $\bar{P}_{l,km}$ 为支路 $l(k,m)$ 的传输功率限值。

$N-1$ 条件下为

$$\begin{cases} P_{l-b,km,t} = \sum_{i \in \psi} \left(\frac{X_{ki}^{l-b} - X_{mi}^{l-b}}{x_{km}^{l-b}} \right) P_{i,t} - \sum_{s \in L} \left(\frac{X_{ks}^{l-b} - X_{ms}^{l-b}}{x_{km}^{l-b}} \right) D_{s,t} \\ -\bar{P}_{l,km} \leq P_{l-b,km,t} \leq \bar{P}_{l,km} \quad b \in B \end{cases} \quad (12)$$

式中: B 为 $N-1$ 断线故障集; $P_{l-b,km,t}$ 为支路 b 发生 $N-1$ 断线故障后时段 t 支路 $l(k,m)$ 的传输功率; X_{ki}^{l-b} 等为线路 b 发生 $N-1$ 断线故障后的直流潮流模型中节点阻抗矩阵元素。

在实际大电网中线路数非常多, 若将基态和所有 $N-1$ 断线故障条件下所有时段的支路功率约束直接放入优化模型中进行求解, 会导致模型的规模过大, 求解非常耗时。考虑到实际电网的运行情况, 在 $N-1$ 开断故障下, 很多支路功率并不越限, 因此很多支路功率约束是不起作用的。为了提高模型的求解效率, 采用“校验-添加-再校验-再添加”的方法处理网络安全约束以对优化模型进行求解^[12]。

7) 抽水蓄能机组的运行约束

出力上下限约束为

$$\begin{cases} 0 \leq P_{pg,s,t} \leq P_{pg,s,\max} \cdot Z_{pg,s,t} \\ P_{pp,s,\max} \cdot Z_{pp,s,t} \leq P_{pp,s,t} \leq 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中: $P_{pg,s,\max}$ 和 $P_{pp,s,\max}$ 分别为抽水蓄能机组 s 的最大发电功率和最大抽水功率; $Z_{pg,s,t}$ 和 $Z_{pp,s,t}$ 分别为抽水蓄能机组 s 在时段 t 的发电状态和抽水状态, 取值为 1 表示处于对应状态, 取值为 0 表示不处于对应状态。

运行工况互补约束, 即同一时段抽水蓄能机组不可能同时处于抽水和发电工况, 如式(14)所示。

$$Z_{s,t} = Z_{pg,s,t} + Z_{pp,s,t} \leq 1 \quad (14)$$

在实际运行中, 还需要满足日电量平衡约束, 如式(15)所示。

$$\sum_{t=1}^T P_{pg,s,t} + \xi \cdot \sum_{t=1}^T P_{pp,s,t} = 0 \quad (15)$$

式中, ξ 为抽水蓄能机组的转换效率, 通常取 75%。

为了延长抽水蓄能机组的寿命, 实际运行中抽水蓄能机组两种运行工况的切换需要满足一定的时间限制, 本文定义切换时间为 0.5 h, 即需要两个时段的切换时间, 因此需要满足约束式(16)。

$$\begin{cases} Z_{pg,s,t} + Z_{pp,s,t+1} \leq 1 & t=1,2,\dots,(T-1) \\ Z_{pg,s,t} + Z_{pp,s,t+2} \leq 1 & t=1,2,\dots,(T-2) \\ Z_{pp,s,t} + Z_{pg,s,t+1} \leq 1 & t=1,2,\dots,(T-1) \\ Z_{pp,s,t} + Z_{pg,s,t+2} \leq 1 & t=1,2,\dots,(T-2) \end{cases} \quad (16)$$

8) 旋转备用约束

通过预留足够的系统旋转备用容量以应对负荷预测误差对发电调度带来的影响。利用正旋转备用容量补偿因低估系统负荷带来的影响, 利用负旋转备用容量补偿因高估负荷带来的影响。

常规机组旋转备用约束为

$$\begin{cases} 0 \leq s_{ui,t} \leq \min(P_{i,\max} \cdot I_{i,t} - P_{i,t}, r_{ui} \cdot T_{10} \cdot I_{i,t}) \\ 0 \leq s_{di,t} \leq \min(P_{i,t} - P_{i,\min} \cdot I_{i,t}, r_{di} \cdot T_{10} \cdot I_{i,t}) \end{cases} \quad (17)$$

式中: $s_{ui,t}$ 和 $s_{di,t}$ 分别为机组 i 在时段 t 能够提供的正、负旋转备用容量; T_{10} 为机组的旋转备用响应时间, 本文取 10 min。

由于抽水蓄能机组的工况切换需要一定的时间, 在同一时段中不可能改变运行工况, 因而其在各种运行工况下的旋转备用容量如下。

若抽水蓄机组处于发电状态, 即 $P_{pg,s,t} > 0$, $P_{pp,s,t} = 0$, 则

$$\begin{cases} 0 \leq s_{us,t} \leq P_{pg,s,\max} - P_{pg,s,t} \\ 0 \leq s_{ds,t} \leq P_{pg,s,t} \end{cases} \quad (18)$$

若抽水蓄机组处于抽水状态, 即 $P_{pg,s,t} = 0$, $P_{pp,s,t} < 0$:

$$\begin{cases} 0 \leq s_{us,t} \leq -P_{pp,s,t} \\ 0 \leq s_{ds,t} \leq P_{pp,s,t} - P_{pp,s,\max} \end{cases} \quad (19)$$

若抽水蓄机组处于既不发电、也不抽水状态, 即 $P_{pg,s,t} = 0$, $P_{pp,s,t} = 0$, 此时机组停运不旋转, 旋转备用为零, 即

$$\begin{cases} s_{us,t} = 0 \\ s_{ds,t} = 0 \end{cases} \quad (20)$$

根据式(18)一式(20), 整合得到抽水蓄机组的旋转备用约束表达式为

$$\begin{cases} 0 \leq s_{us,t} \leq (P_{pg,s,\max} - P_{pg,s,t})Z_{pg,s,t} + (-P_{pp,s,t})Z_{pp,s,t} \\ 0 \leq s_{ds,t} \leq P_{pg,s,t}Z_{pg,s,t} + (P_{pp,s,t} - P_{pp,s,\max})Z_{pp,s,t} \end{cases} \quad (21)$$

累加所有机组的旋转备用得到系统的旋转备用约束为

$$\begin{cases} S_{u,t} = \sum_{i=1}^{N_1} s_{ui,t} + \sum_{s=1}^{N_2} s_{us,t} \geq P_{Load,t} \cdot L_u \% \\ S_{d,t} = \sum_{i=1}^{N_1} s_{di,t} + \sum_{s=1}^{N_2} s_{ds,t} \geq P_{Load,t} \cdot L_d \% \end{cases} \quad (22)$$

式中: $S_{u,t}$ 和 $S_{d,t}$ 分别为系统在时段 t 的正、负旋转备用容量; $L_u\%$ 和 $L_d\%$ 分别为负荷预测偏差对系统正、负旋转备用的需求系数。

以上描述的含抽水蓄能机组的 SCUC 模型的目标函数中发电费用项是非线性二次函数, 抽水蓄机组旋转备用约束式(21)中出现了整数变量与连续变量相乘的非线性项, 并且功率平衡约束中的网损是关于机组出力的二次表达式, 因而是混合整数非凸规划模型, 求解难度较大。目前可采用 GAMS 软件中的 DICOPT/SBB 求解器进行求解, 不过计算速度比较慢。

2 模型的线性化

为了降低模型的求解难度, 加快计算速度, 需要对模型中目标函数和约束条件的非线性部分进行线性化处理, 将其转化为 MILP 模型进行求解。

2.1 目标函数的分段线性化

由于目标函数中的发电费用是关于机组出力的二次函数, 因此, 采用分段线性化函数进行近似, 将其分成 M 段来线性逼近, 每一段引入一个状态变量 $B_{i,j,t}$ 和一个连续变量 $P_{i,j,t}$ 。图 1 为发电费用曲线分段线性化的示意图。

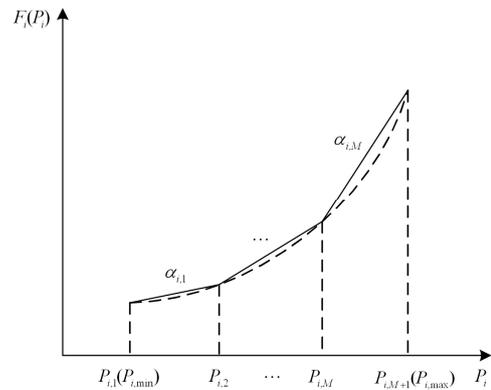


图 1 发电费用曲线的分段线性化

Fig. 1 Piecewise-linear of generation cost curve

发电费用的线性化函数表达式为

$$F_{i,t} = \sum_{j=1}^M (\alpha_{i,j} P_{i,j,t} + \beta_{i,j} B_{i,j,t}) \quad (23)$$

其中

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{i,j} = \frac{F_{i,t}(P_{i,j+1}) - F_{i,t}(P_{i,j})}{P_{i,j+1} - P_{i,j}} \\ \beta_{i,j} = F_{i,t}(P_{i,j}) - P_{i,j}\alpha_{i,j} \\ P_{i,j}B_{i,j,t} \leq P_{i,j,t} \leq P_{i,j+1}B_{i,j,t} \\ I_{i,t} = \sum_{j=1}^M B_{i,j,t} \leq 1 \\ P_{i,t} = \sum_{j=1}^M P_{i,j,t} \end{array} \right. \quad (24)$$

式中: $\alpha_{i,j}$ 和 $\beta_{i,j}$ 分别为第 i 台机组发电费用的第 j 段分段线的斜率和等效截距; $P_{i,j}$ 为第 i 台机组出力的第 j 个分段点, 其中 $P_{i,1}$ 和 $P_{i,M+1}$ 分别对应第 i 台机组的最小和最大出力; $P_{i,j,t}$ 为在 t 时段第 i 台机组第 j 段的出力, $B_{i,j,t}$ 为在 t 时段第 i 台机组第 j 段的运行状态。

2.2 抽水蓄能机组旋转备用容量约束的线性化

由于抽水蓄能机组的旋转备用容量约束式(21)中出现了整数变量与连续变量相乘的非线性项, 可根据抽水蓄能机组的实际运行特点转化为线性表达式。由第 1.2 节中抽水蓄能机组的运行约束式(13)可知: 当抽水蓄能机组不处于发电状态, 即 $Z_{pg,s,t}=0$ 时, 则有 $0 \leq P_{pg,s,t} \leq P_{pg,s,max} \cdot 0$, 故 $P_{pg,s,t}=0$; 当抽水蓄能机组处于发电状态, 即 $Z_{pg,s,t}=1$ 时, 则有 $0 \leq P_{pg,s,t} \leq P_{pg,s,max} \cdot 1$ 。因此, 在满足式(13)约束的前提下, 等式(25)成立。

$$P_{pg,s,t}Z_{pg,s,t} = P_{pg,s,t} \quad (25)$$

同理, 在满足式(13)约束的前提下, 式(26)也成立。

$$P_{pp,s,t}Z_{pp,s,t} = P_{pp,s,t} \quad (26)$$

因此, 可以将式(21)等价转化为如式(27)的线性表达式。

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq s_{us,t} \leq P_{pg,s,max}Z_{pg,s,t} - P_{pg,s,t} - P_{pp,s,t} \\ 0 \leq s_{ds,t} \leq P_{pg,s,t} + P_{pp,s,t} - P_{pg,s,max}Z_{pg,s,t} \end{array} \right. \quad (27)$$

2.3 网损的动态分段线性化

由于功率平衡约束式(5)和式(6)中支路网损是关于决策变量即发电机出力的二次函数, 可采用文献[21]中的一种线性化方法来逼近二次网损项。对 SCUC 模型进行动态迭代求解, 并在每次迭代求解模型中逐步增加各个时段各支路的网损二次表达式的线性逼近约束。第 $k+1$ 次迭代增加的线性切割是在第 k 次迭代模型的求解结果下, 获得相应的机组出力值并在该值处对式(6)作一阶泰勒级数展开以得到线性逼近约束。以支路 l 在时段 t 的网损 $P_{Loss,l,t}$ 为例说明, 具体步骤如下。

1) 初始化: 令迭代次数 $k=1$ 。对于每一个支路

在每一个时段的网损, 用不等式 $P_{Loss,l,t} \geq 0$ ($l=1, \dots, N_L$ 且 $t=1, \dots, T$) 作为初始线性逼近。

2) 用当前所包含的支路网损的线性逼近约束来求解 MILP 模型。得到各时段 t 的机组出力值 $P_{i,t}^k$ 以及支路网损变量值 $P_{Loss,l,t}$ 。

3) 对于所有支路 l 和时段 t , 根据机组出力值 $P_{i,t}^k$, 采用式(6)计算得到第 k 次迭代的“真实”网损值 $P_{Loss,l,t}^k$ 。

4) 对于所有支路 l 和时段 t , 计算网损线性逼近的误差 $\delta_{l,t}$, 如式(28)所示。

$$\delta_{l,t} = \left| P_{Loss,l,t}^k - P_{Loss,l,t} \right| \quad (28)$$

5) 判断所有线路 l 和时段 t 的误差 $\delta_{l,t}$ 是否都在精度 ε 以内。若所有 $\delta_{l,t}$ 满足 $\delta_{l,t} \leq \varepsilon$, 则迭代过程结束并输出模型优化结果, 否则进入步骤 6)。

6) 对于不满足精度 ε 的线路 l 和时段 t , 需要增添建立新的线性逼近约束, 并令 $k=k+1$, 再返回步骤 2)。线路 l 在时段 t 的第 k 次迭代中增加的线性逼近约束为

$$P_{Loss,l,t} \geq P_{Loss,l,t}^k + \sum_{i \in \Psi} \left. \frac{\partial P_{Loss,l,t}}{\partial P_{i,t}} \right|_{P_{i,t}^k} (P_{i,t} - P_{i,t}^k) \quad (29)$$

通过对 SCUC 模型中的非线性部分进行线性化处理, 可将含抽水蓄能机组的 SCUC 模型转化为 MILP 模型, 并采用 CPLEX 求解器实现对 MILP 模型的快速可靠求解。

3 算例分析

以某一实际 23 机 306 节点的中心城市电网在 2017 年 8 月 21 号的数据为例进行算例分析。该电网中的负荷节点数为 53 个, 负荷等值接入 220 kV 变电站的 110 kV 侧, 线路数为 157 条, 变压器支路数为 241 个, 总装机容量为 11 834 MW。其中, 核机组 4 台, 容量为 4 152 MW, 其出力全天恒定, 不参与优化; 参与优化的机组为 19 台, 包括有抽水蓄能机组 2 台, 燃煤机组 7 台, 燃气机组 10 台, 部分机组的特性参数见附录 A 表 A1。并且, 该电网与省级电网之间有 7 条联络线交换功率, 各条联络线全天送受电计划曲线已知, 如图 2 所示。总负荷预测曲线如图 3, 最大功率为 15 229 MW, 最小功率为 10 280 MW, 由于目前每个节点具体的负荷功率预测值无法获取, 所以采用将总负荷预测值按夏大典型运行方式中每个节点负荷所占百分比来分配的方式, 分配得到每个节点的负荷预测值。负荷预测误差的正、负旋转备用需求系数 $L_u\%$ 取 3%, $L_d\%$

取 1%。所采用的计算机为 Intel(R) Xeon(R) CPU E3-1270 v5 @ 3.60 GHz, 32 GB 内存。

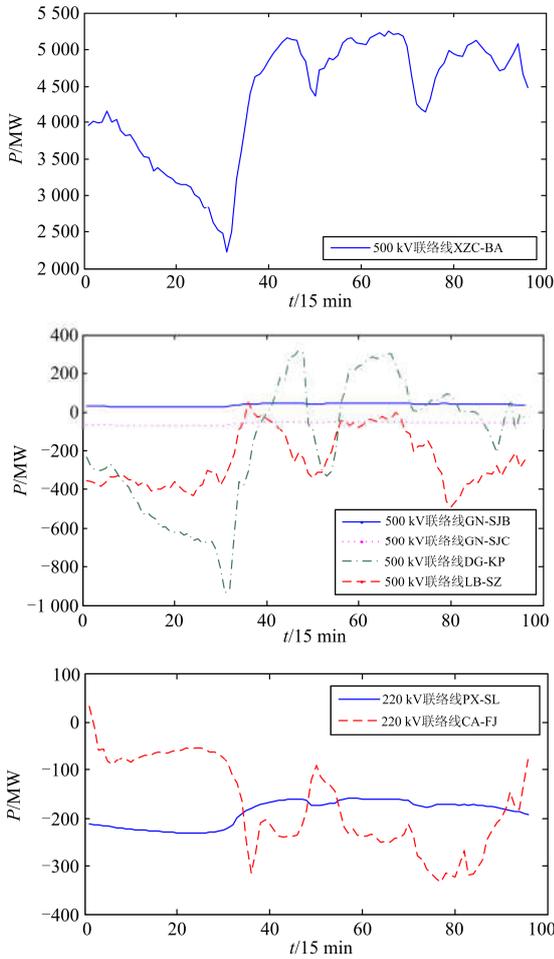


图 2 联络线功率曲线
Fig. 2 Tie lines power curve

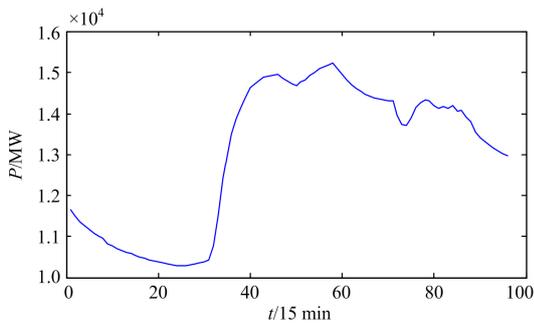


图 3 总负荷预测曲线
Fig. 3 Total load forecasting curve

采用 GAMS 软件中的 CPLEX 和 SBB 求解器分别求解线性化处理后的 MILP 模型和原来的混合整数非线性规划模型 (Mixed Integer Nonlinear Programming, MINLP)。MILP 模型求解得到的优化调度方案对应的各时段系统网损值与式(6)计算的

“真实”网损值的对比如图 4 所示, 表 1 列出了部分误差较大时段系统网损值的对比结果。从图 4 中可以看到, 本文采用的动态分段线性化网损逼近法得到网损值的准确性较高, 与式(6)计算的“真实”网损值之间只有略微的差距, 且与总负荷预测曲线变化趋势基本一致。从表 1 中可以看到, 系统网损的最大误差出现在时段 14, 绝对误差值为 2.475 8 MW, 相对误差值只有 4%左右, 因此, 本文所建立的网损线性逼近的 MILP 模型效果准确合理。MILP 和原来的 MINLP 两种模型求解得到的目标函数值及计算时间对比如表 2 所示。可以看到, 本文建立的 MILP 模型得到的目标函数值略低于 MINLP 模型, 准确度很高, 而模型的计算时间明显少于 MINLP 模型, 求解速度很快, 具有较好的工程实用价值。

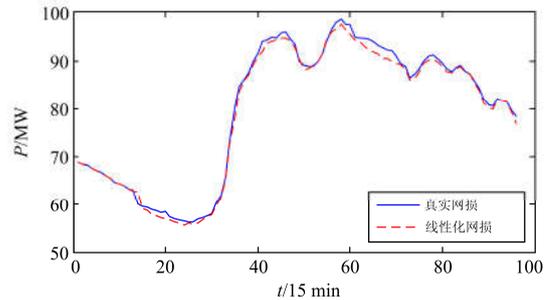


图 4 系统网损值对比

Fig. 4 Comparison of system network loss values

表 1 部分时段的系统网损值对比

Table 1 Comparison of system network loss values in partial periods

对比	系统网损值/MW					
	时段 11	时段 12	时段 13	时段 14	时段 15	时段 16
真实	63.85	63.24	62.87	59.98	59.39	59.28
线性化	63.81	63.19	62.82	62.46	58.95	58.57

表 2 两种模型求解结果对比

Table 2 Comparison of the results of two models

模型	目标函数值/万元	计算时间/s
MINLP	15 358.095 9	679.434
MILP	15 330.319 5	118.124

两种模型求解得到的结果中 7 台燃煤机组全天都处于启动状态, 部分燃气机组存在启停状态的切换, 部分机组的出力计划曲线对比如图 5 所示。可以看到, 两种模型得到的燃气机组出力曲线变化趋势基本一致; 抽水蓄能机组总出力曲线在发电时段的变化也基本一致, 而在抽水时段存在不同, 分别与两种模型下燃煤机组出力曲线相对应, 在燃煤机组出力大的时段进行抽水, 这是由于模型的线性化求解存在一定误差造成的。燃气机组先是在凌晨负

荷低谷时段处于停机状态, 然后随着负荷的增长处于启动运行状态, 相对于燃煤机组, 燃气机组可以更为迅速地改变出力, 出力调节更为频繁; 燃煤机组大部分时段出力都处于上限值, 在负荷较低时才会减少出力, 这与燃煤机组发电费用低于燃气机组的实际情况相符。抽水蓄能机组能够根据系统负荷的波动自动地调节其运行工况, 在负荷低谷时段处于抽水状态, 在负荷高峰时段处于发电状态, 实现对电网负荷的调峰填谷, 并且由于其爬/滑坡率很大, 出力能够迅速地改变, 对电网的负荷波动有较强的平衡能力。

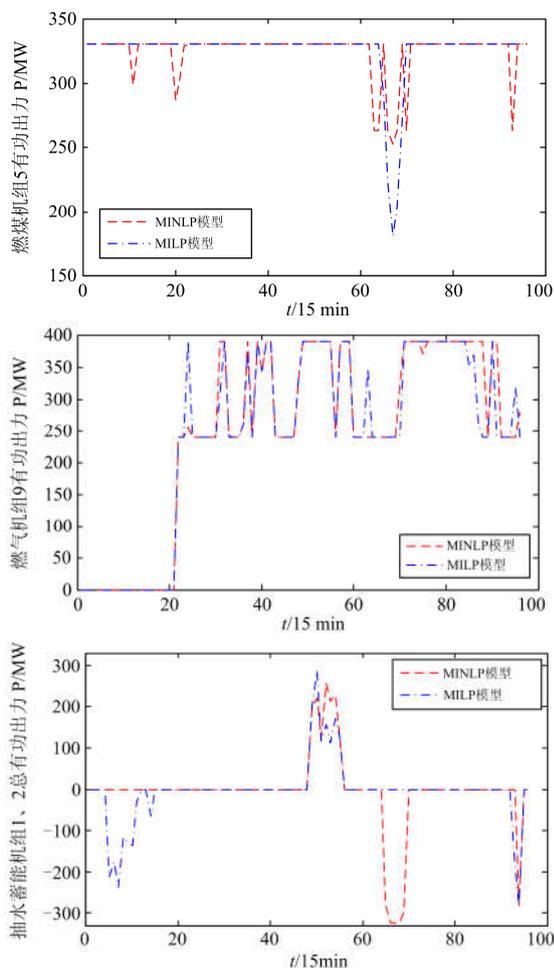


图5 部分机组出力计划曲线对比

Fig. 5 Comparison of output plan curves of some units

与不含抽水蓄能机组的电网优化调度结果以及含抽水蓄能机组但不考虑其旋转备用的电网优化调度结果进行比较, 如表3所示。可以看到, 含有抽水蓄能机组的调度结果的目标函数值小于不含抽水蓄能机组的调度结果, 虽然增加了抽水蓄能机组启停费用48万元, 但是抽水蓄能机组的调峰填谷作用能够减小火电机组的启停, 使火电机组运行在发

电燃料成本更优的状态, 从而使得所有机组的总运行费用反而减少了82.1036万元, 这体现了抽水蓄能机组在电网运行调度中具有良好的经济效益。另外, 对于含有抽水蓄能机组但不考虑其旋转备用的情况, 火电机组由于需要预留更大的旋转备用而导致发电燃料成本增加, 优化结果的目标函数值比考虑其旋转备用时增加85.0004万元, 这体现出本文建立的考虑抽水蓄能机组旋转备用的优化调度模型能够使火电机组运行在发电燃料成本更优的状态, 从而减少了总运行费用, 更好地实现经济运行。

表3 3种模型求解结果对比

Table 3 Comparison of the results of three models

模型	目标函数值/ 万元	抽水蓄能 启停费用/ 万元	火电启停 费用/万元	火电发电燃 料费用/万元
含抽水蓄能机组	15 330.319 5	48	117.721	15 164.598 5
不含抽水蓄能机组	15 412.423 1	—	146.659	15 265.764 1
含抽水蓄能机组但 不考虑其旋转备用	15 415.319 9	48	102.876	15 264.443 9

增大负荷预测偏差对系统正、负旋转备用的需求系数, 相当于系统中功率的不确定波动增大时, 得到的优化计算结果如表4所示。可以看到, 增大系统旋转备用的需求系数会导致总运行费用增加, 并且此时不含抽水蓄能机组模型的运行费用与含有抽水蓄能机组模型的运行费用之差也增大, 这体现了抽水蓄能机组能够有效平衡系统中功率的不确定波动, 在不确定波动越大时提升系统运行经济效益的效果越明显。

表4 不同备用需求系数的求解结果对比

Table 4 Comparison of the results of different demand coefficients

需求系数	模型	目标函数值/ 万元	目标函数值 之差/万元
$L_u\%=3\%$, $L_d\%=1\%$	含抽水蓄能机组	15 330.319 5	82.103 6
	不含抽水蓄能机组	15 412.423 1	
$L_u\%=3.5\%$, $L_d\%=1.5\%$	含抽水蓄能机组	15 365.838 9	92.425 8
	不含抽水蓄能机组	15 458.264 7	
$L_u\%=4\%$, $L_d\%=2\%$	含抽水蓄能机组	15 414.563 2	103.860 6
	不含抽水蓄能机组	15 518.423 8	

4 结论

建立了含抽水蓄能机组的电网SCUC模型, 并在模型中考虑了系统网损的影响, 再运用线性化方法将优化模型转化为MILP模型。通过算例分析得到以下结论:

1) 通过线性化方法得到SCUC问题的MILP模型, 采用CPLEX求解器进行求解, 其算法稳定,

优化结果准确合理并且求解速度远远快于原始的 MINLP 模型，具有较好的工程实用价值。

2) 本文建立了关于抽水蓄能机组较为完备的运行调度特性模型，根据不同运行工况给出旋转备用容量的解析表达式，能够同时优化其启停状态、运行工况及发电、抽水的功率，充分发挥了抽水蓄

能机组的调峰填谷和应对系统中功率不确定波动的作用。

3) 采用动态分段线性化方法来逼近系统网损非线性项的精度很高，使所建立的 MILP 模型求解得到的调度计划能够较为精确地考虑系统网损的影响。

附录 A

表 A1 部分机组的特性参数
Table A1 Characteristic parameters of part of the units

机组类型	节点 编号	机组容量/ MW	燃料耗量特性系数			单次启动 费用/万元	单次停机 费用/万元	爬坡率/ (MW/min)
			$A_{i,2}/$ (t/(MW ² h))	$A_{i,1}/$ (t/MWh)/(MJ/MWh)	$A_{i,0}/$ (t/h)			
燃煤	283	320	0.000 03	0.300	10.22	80	18	4.5
	284	320	0.000 03	0.300	10.22	80	18	4.5
	285	330	0.000 03	0.310	10.22	80	18	4.5
	286	330	0.000 03	0.309 7	10.22	80	18	4.5
	287	330	0.000 03	0.299	10.22	80	18	4.5
	288	330	0.000 03	0.299	10.22	80	18	4.5
燃气	289	390	—	6 323	—	10	10	16.7
	290	390	—	6 323	—	10	10	16.7
	291	390	—	6 323	—	10	10	16.7
	292	120	—	7 850	—	7.5	7.5	16.7
	293	60	—	7 850	—	7.5	7.5	16.7
	294	180	—	7 850	—	7.5	7.5	16.7
抽水蓄能	281	306	0	0	0	6	6	306
	282	306	0	0	0	6	6	306

参考文献

[1] LI C, JOHNSON R B, SVOBODA A J. A new unit commitment method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(1): 113-119.

[2] 杨明, 杨毅刚. 用大系统分解与协调理论研究电力系统的最优机组组合[J]. 中国电机工程学报, 1989, 9(3): 51-58.
YANG Ming, YANG Yigang. Using large scale system decomposition and coordination theory to research optimal unit commitment of large electric power system[J]. Proceedings of the CSEE, 1989, 9(3): 51-58.

[3] ZHAI Qiaozhu, GUAN Xiaohong, CUI Jian. Unit commitment with identical units successive subproblem solving method based on Lagrangian relaxation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(4): 1250-1257.

[4] FAN J Y, ZHANG L, MCDONALD J D. Enhanced techniques on sequential unit commitment with interchange transactions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(1): 1131-1138.

[5] 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.

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.

[6] CARRIÓN M, JOSÉ M. A computationally efficient mixed-integer linear formulation for the thermal unit commitment problem[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(3): 1371-1378.

[7] KHODAYAR M E, ABREU L, SHAHIDEHPOUR M. Transmission-constrained intrahour coordination of wind and pumped-storage hydro units[J]. IET Generation, Transmission, and Distribution, 2013, 7(7): 755-765.

[8] JIANG Ruiwei, WANG Jianhui, GUAN Yongpei. Robust unit commitment with wind power and pumped storage hydro[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 800-810.

[9] 胡泽春, 丁华杰, 孔涛. 风电-抽水蓄能联合日运行优化调度模型[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(2): 36-41.
HU Zechun, DING Huajie, KONG Tao. A joint daily

- operational optimization model for wind power and pumped-storage plant[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(2): 36-41.
- [10] 吕翔, 刘国静, 周莹. 含抽水蓄能的风水火联合机组组合研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(12): 35-43.
LÜ Xiang, LIU Guojing, ZHOU Ying. Research on combined unit commitment of wind power-hydro power-thermal power for the power system with pumped hydro storage[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(12): 35-43.
- [11] 徐飞, 陈磊, 金和平, 等. 抽水蓄能与风电的联合优化运行建模及应用分析[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(1): 149-154.
XU Fei, CHEN Lei, JIN Heping, et al. Modeling and application analysis of optimal joint operational of pumped storage power station and wind power[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(1): 149-154.
- [12] 黄庶, 林舜江, 刘明波. 含风电场和抽水蓄能电站的多目标安全约束动态优化调度[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(1): 112-121.
HUANG Shu, LIN Shunjiang, LIU Mingbo. Multi-objective security constrained dynamic optimal dispatch with wind farms and pumped storage stations[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(1): 112-121.
- [13] 全然, 张健, 史志鸿. 求解含风电场机组组合问题的透视割平面邻域搜索算法[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(14): 26-31.
QUAN Ran, ZHANG Jian, SHI Zhihong. A perspective cut neighborhood search method for unit commitment with volatile wind power[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(14): 26-31.
- [14] 瞿寒冰, 朱英刚, 尹茂林, 等. 计及风电并网的机组组合方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(16): 95-98.
QU Hanbing, ZHU Yinggang, YIN Maolin, et al. Study on the unit commitment considering wind power paralleling in the power system[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(16): 95-98.
- [15] AI Qian, FAN Songli, PIAO Longjian. Optimal scheduling strategy for virtual power plants based on credibility theory[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2016, 1(1): 48-55. DOI: 10.1186/s41601-016-0017-x.
- [16] 娄素华, 余欣梅, 熊信良, 等. 电力系统机组启停优化问题的改进 DPSO 算法[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(8): 30-35.
LOU Suhua, YU Xinmei, XIONG Xinyin, et al. Unit commitment using improved discrete particle swarm optimization algorithm[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(8): 30-35.
- [17] 吴金华, 吴耀武, 熊信良, 等. 机组优化组合问题的随机 tabu 搜索算法[J]. *电网技术*, 2003, 27(10): 35-38.
WU Jinhua, WU Yaowu, XIONG Xinyin, et al. Random tabu search with simulated annealing approach for the unit commitment problem[J]. *Power System Technology*, 2003, 27(10): 35-38.
- [18] ALGUACIL N, CONEJO A J. Multiperiod optimal power flow using Benders decomposition[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2000, 15(1): 196-201.
- [19] MOTTO A L, GALIANA F D. Network-constrained multiperiod auction for a pool-based electricity market[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2002, 17(3): 646-653.
- [20] DOS SANTOS T N, DINIZ A L. A dynamic piecewise linear model for DC transmission losses in optimal scheduling problems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, 26(2): 508-519.
- [21] MA H L, SHAHIDEHPOUR S M. Transmission-constrained unit commitment based on Benders decomposition[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 1998, 20(4): 287-294.
- [22] 赵燃, 康重庆, 刘梅, 等. 面向节能发电调度的母线负荷预测平台[J]. *中国电力*, 2009, 42(6): 32-36.
ZHAO Ran, KANG Chongqing, LIU Mei, et al. The platform of bus load forecasting for energy-conservation based generation dispatching[J]. *Electric Power*, 2009, 42(6): 32-36.
- [23] 谢毓广. 计及网络安全约束和风力发电的机组组合问题的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
XIE Yuguang. Research on the unit commitment problem with security-constraints and wind power[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.

收稿日期: 2018-02-05; 修回日期: 2018-05-14

作者简介:

卢艺(1985—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统运行调度工作; E-mail: luyi07huagong@163.com

卢苑(1994—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统优化与控制; E-mail: luyuan941227@163.com

林舜江(1980—), 男, 通信作者, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为电力系统优化与控制。E-mail: linshj@scut.edu.cn

(编辑 周金梅)