

# 交流潮流约束下的机组组合求解

潘志远<sup>1</sup>, 韩学山<sup>1\*</sup>, 刘超男<sup>2</sup>

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 山东省电力学校, 山东 泰安 271000)

**摘要:**针对当前大电网与分布式发电并进,可再生资源发电大量接入的电网发展格局,构建交流潮流约束下的机组组合模型,在传统考虑有功网络安全约束的基础上,引入无功电压的制约,并计及机组的安全运行极限。依据Benders分解思想,将该模型分解为主、子两个问题,主问题为单母线模型机组组合,子问题为交流潮流约束的检验,通过子问题导引的Benders割形成主、子问题之间关联的附加约束。修正的IEEE-14节点仿真结果表明,该方法能够有效解决交流潮流约束下的机组组合问题。

**关键词:**电力系统;机组组合;交流潮流约束;Benders分解;发电机安全运行极限

**中图分类号:**TM732 **文献标志码:**A

## Unit commitment considering alternating current power flow constraints

PAN Zhi-yuan<sup>1</sup>, HAN Xue-shan<sup>1\*</sup>, LIU Chao-nan<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Shandong Electric Power School, Tai'an 271000, China)

**Abstract:** With the parallel development of distributed generation technology and large power grid technology, a great amount of renewable energy generation was introduced to the electrical power grid. Under this circumstance, a unit commitment model was established by considering the constraints of transmission safety using AC(alternating current) power flow. This model also involved reactive and voltage constraints, as well as safe operation limits of generators. According to the Benders decomposition, the model was decomposed into a master problem and a sub-problem. The master problem could solve the unit commitment without AC constraints, and then the sub-problem could check the AC constraints according to the result of the master problem. Benders cuts might develop from the sub problem, and the cuts would form additional associated constraints, which could connect the master problem and the sub problem. Simulation results of modified IEEE-14 buses case proved that the proposed method could effectively solve unit commitment problems with constraints of AC power flow.

**Key words:** power system; unit commitment; AC power flow constraints; Benders decomposition; safe operation limits of generator

## 0 引言

机组组合是电网日前调度决策中一个关键而基础的问题,也是电力系统运行调度决策中较传统的问题。电网不断发展变化以及可再生资源发电的大

规模并网,使其面临更多的问题。

机组组合理论问题研究的进程,大致可以划分为3个阶段:第1阶段(20世纪20~60年代)仅考虑发电与负荷平衡的阶段,即与电网物理规律无关,实质上是机械功率的平衡问题,故又称为单母线模型下的机组组合,这是最早也是最传统的机组组合

模型。针对该模型,已有包括优先级表法<sup>[1-2]</sup>、动态规划<sup>[3-4]</sup>、分支定界<sup>[5-6]</sup>、拉格朗日松弛法<sup>[7-9]</sup>以及智能优化算法<sup>[10-13]</sup>在内的若干成熟算法;第2阶段(20世纪60~80年代)将电网简化为直流电路表示的机械功率平衡流问题,较第1阶段的优越性在于可以近似考虑电网制约因素,基本实现考虑电网安全制约的机组组合,同时也使其模型增加了复杂度。其求解方法主要包括基于分解协调思想的方法<sup>[14-18]</sup>和混合整数规划、智能搜索等统一求解思想的求解方法<sup>[19-21]</sup>;第3阶段(20世纪80年代至今)考虑完整的交流潮流约束,能够解决当第2阶段模型的理想假设条件(假设电网各处功率因数为1且无损)不满足时导致决策结果不符合实际的问题,即能够考虑电压支撑作用对机组组合决策的影响。当今电网的发展格局更促使了第3阶段研究的升温。交流潮流约束本质是电磁功率及其特性的约束,考虑这一约束的机组组合,体现了机组机械功率与负荷机械功率间平衡需要与电网电磁功率搭界,即这一平衡在电磁功率特性上的交接点,实现了真正意义上的电力系统机组组合,是一个极度复杂的非线性混合整数规划问题。文献[22]将电压约束引入到安全约束机组组合问题之中,但不能称其为完整的交流潮流约束;文献[23]将完整的交流潮流方程引入到机组组合问题中,基于Benders分解技术将原问题分解为单母线机组组合主问题和网络安全校验子问题,是对文献[16]和[22]的发展和提升,是一种有效的求解方法;文献[24]通过引入辅助约束将机组组合模型转化为半定规划的标准模型直接进行求解,其复杂性在于模型转化的设计;文献[25]通过变量复制法将原问题转化为对偶问题,并利用辅助问题原理将其分离为动态规划和最优潮流子问题进行求解,适合于并行计算。另外,在上述研究中都将机组的无功输出上下限设为定值,而事实上其有功、无功输出功率之间存在着耦合关系<sup>[26]</sup>,无功输出的上下限是有功输出与机端电压的函数,因此考虑发电机安全运行极限使得交流潮流约束下的机组组合问题更加符合实际。

本研究给出了一种求解交流潮流约束下机组组合的分解协调方法,并计及发电机的安全运行极限。基于Benders分解的思想<sup>[27-28]</sup>,将原问题分解为单母线模型机组组合主问题(实质上是追求发电成本最小的有功调度)和交流潮流约束检验子问题(实质是松弛有功下的无功优化)。通过子问题目标值非零判断出现交流潮流越限,并产生Benders割反馈给主问题,实现主、子问题之间的迭代求解,直至

获得满足约束的机组组合结果。

## 1 问题的数学描述

本研究中机组组合问题的目标函数为最小化系统运行成本:

$$\min \sum_{t=1}^{Nt} \sum_{i=1}^{Ng} [C_i(P_{i,t}) \cdot \gamma_{i,t} + ST_{i,t}], \quad (1)$$

其中, $Nt$ 为研究周期内划分的时段数, $Ng$ 为可启停的机组数; $P_{i,t}$ 为机组*i*在*t*时段的有功输出功率, $\gamma_{i,t}$ 为机组*i*在*t*时段的启停状态; $C_i(P_{i,t}) = a_{i,t}P_{i,t}^2 + bP_{i,t} + c$ 为机组*i*的发电成本函数; $ST_{i,t}$ 为机组*i*的启动成本。

约束条件主要包括如下内容:

### (1) 潮流平衡方程约束

$$\begin{aligned} V_{m,t} \sum_{j=1}^N V_{j,t} (G_{mj} \cos \theta_{mj,t} + B_{mj} \sin \theta_{mj,t}) &= \\ \sum_{i=1}^{Ng} Y_{m,i} \cdot P_{i,t} - D_{m,t}^p, & \\ V_{m,t} \sum_{j=1}^N V_{j,t} (G_{mj} \sin \theta_{mj,t} - B_{mj} \cos \theta_{mj,t}) &= \\ \sum_{i=1}^{Ng} Y_{m,i} \cdot Q_{i,t} - D_{m,t}^q, & \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $N$ 为电网节点总数; $m=1,2,\dots,N,i=1,2,\dots,Ng,t=1,2,\dots,Nt;Q_{i,t}$ 为机组*i*在时段*t*的无功输出; $Y_{m,i}$ 为节点-发电机组关联矩阵的对应元素; $D_{m,t}^p, D_{m,t}^q$ 分别为与节点*m*相连的负荷有功、无功功率; $V_{m,t}$ 为节点*m*在时段*t*的电压幅值。 $G_{mj}, B_{mj}$ 分别为节点导纳矩阵*m*行*j*列元素的实部和虚部; $\theta_{mj,t}$ 为*t*时段节点*m j*之间的相角差。

### (2) 系统备用总量约束

$$\sum_{i=1}^{Ng} P_i^{\max} \gamma_{i,t} \geq D_t + R_t, \quad (3)$$

其中, $i=1,2,\dots,Ng,t=1,2,\dots,Nt;D_t, R_t$ 为*t*时段系统的系统总有功负荷以及备用总量。

### (3) 机组最小运行、最小停运时间约束

$$\gamma_{i,t} = \begin{cases} 1, & 1 \leq X_{i,t-1} < t_i^{\text{on}}; \\ 0, & -1 \geq X_{i,t-1} > -t_i^{\text{off}}, \\ 0 \text{ 或 } 1, & \text{其他情况。} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $i=1,2,\dots,Ng,t=1,2,\dots,Nt;X_{i,t}$ 为机组*i*在时段*t*已连续运行或已连续停运时段数; $t_i^{\text{on}}, t_i^{\text{off}}$ 分别为机组*i*最小允许开机时间和最小允许停机时间。

### (4) 机组有功、无功输出功率限制

$$P_{i,t}^{\min} \gamma_{i,t} \leq P_{i,t} \leq P_{i,t}^{\max} \gamma_{i,t}, \quad (5)$$

$$Q_{i,t}^{\min} \cdot \gamma_{i,t} \leq Q_{i,t} \leq Q_{i,t}^{\max} \cdot \gamma_{i,t}, \quad (6)$$

$$Q_{i,t}^{\min} \geq \frac{P_{i,t}}{\tan \delta_{i,\max}} - \frac{V_{m,t}^2}{X_{i,d}}, \quad (7)$$

$$Q_{i,t}^{\max} \leq \sqrt{V_{m,t}^2 \cdot I_{i,d}^2 - P_{i,t}^2}, \quad (8)$$

$$Q_{i,t}^{\max} \leq -\frac{V_{m,t}^2}{X_{i,d}} + \sqrt{\frac{E_{i,q}^2 \cdot V_{m,t}^2}{X_{i,d}^2} - P_{i,t}^2}. \quad (9)$$

其中,  $i=1, 2, \dots, Ng, t=1, 2, \dots, Nt$ ;  $P_i^{\max}$ 、 $P_i^{\min}$  表示机组  $i$  的有功输出上下限(原动机功率上下限),  $Q_{i,t}^{\max}$ 、 $Q_{i,t}^{\min}$  表示机组  $i$  在时段  $t$  的无功输出上下限, 是机组端电压和有功输出的函数; 公式(7)为机组静稳储备约束, 公式(8)为定子绕组温升约束, 公式(9)为励磁绕组温升约束;  $\delta_{\max}$  为发电机端电压与交轴的夹角最大值, 一般取  $70^\circ \sim 85^\circ$ ;  $X_{i,d}$  为发电机  $i$  的直轴电抗;  $I_{i,d}^{\max}$ 、 $E_{i,q}^{\max}$  为定子电流最大值和最大空载电势, 可依据发电机的额定有功、无功输出、端口电压以及  $X_{i,d}$  进行估算<sup>[26]</sup>。

### (5) 输电元件载流约束

$$|I_{l,t}| \leq I_l^{\max}, \quad (10)$$

其中,  $t=1, 2, \dots, Nt, l=1, 2, \dots, Nl, Nl$  为系统中输电元件总数;  $I_{l,t}$  为输电元件  $l$  上流过的电流幅值,  $I_l^{\max}$  为输电元件  $l$  的最大允许热电流。

### (6) 输电元件变比约束

$$T_l^{\min} \leq T_{l,t} \leq T_l^{\max}, \quad (11)$$

其中,  $t=1, 2, \dots, Nt, l=1, 2, \dots, Nl$ ;  $T_{l,t}$  为输电元件  $l$  在时段  $t$  的变比,  $T_l^{\max}$ 、 $T_l^{\min}$  分别为变比的上下限, 输电线路的变比为 1。

### (7) 节点电压幅值约束

$$V_m^{\min} \leq V_{m,t} \leq V_m^{\max}. \quad (12)$$

其中,  $m=1, 2, \dots, N, t=1, 2, \dots, Nt$ ;  $V_{m,t}$  为节点  $m$  在时段  $t$  的电压幅值,  $V_m^{\max}$ 、 $V_m^{\min}$  分别为节点  $m$  的电压幅值上下限。

公式(1)~(12)式构成了交流潮流约束下的机组组合模型, 交流潮流约束的引入使得机组组合模型成为极度复杂的混合整数非线性规划问题, 尤其是添加发电机安全运行约束使得问题求解更加复杂, 难以找到适合的统一求解方法。本文在以往研究的基础上, 基于 Benders 分解思想, 将原问题分解为单母线模型机组组合主问题和交流潮流约束检验子问题, 并构建二者之间的协调优化机制, 经验证是一种有效的求解方法。

## 2 基于 Benders 分解的问题求解

### 2.1 主问题

主问题为单母线模型的机组组合, 由目标函数(1)、约束条件(2)~(5)以及节 2.2 中的 Benders 割组成, 其中的潮流方程(2)替换为单母线模型下

的有功发电负荷平衡约束:

$$\sum_{i=1}^{Ng} P_{i,t} \cdot \gamma_{i,t} = D_t + P_t^{\text{loss}}, \quad (13)$$

其中,  $P_t^{\text{loss}}$  分别为  $t$  时段系统网损, 在每次迭代中依据子问题的计算结果进行更新。

在子问题反馈的 Benders 割中存在非线性项  $P_{i,t} \gamma_{i,t}$ , 但由于在机组的输出功率  $P_{i,t}$  中隐含了机组的启停状态  $\gamma_{i,t}$ , 故可以用  $P_{i,t}$  代替  $P_{i,t} \gamma_{i,t}$  使割变为线性约束而不影响计算结果。同时, 参照文献[29]的方法, 将目标函数中的发电成本和启动成本分段线性化, 并将最小开停机约束(4)转换为线性约束表达, 并由此建立主问题的混合整数线性规划模型。

### 2.2 子问题

在主问题给出机组的启停状态  $\hat{\gamma}$  以及有功输出功率  $\hat{P}$  之后, 建立子问题用以校验各时段交流潮流约束是否满足。为了表达简洁, 下文中各变量忽略时段下标  $t$ 。

子问题的目标函数为

$$\min w(\hat{\gamma}, \hat{P}) = \sum_{l=1}^{Nl} \alpha_l \cdot SI_l + \sum_{m=1}^N \beta_m \cdot (SV_{1,m} + SV_{2,m}). \quad (14)$$

约束条件:

$$\theta_{Ns} = 0, \quad (15)$$

$$P_i = \hat{P}_i \cdot \hat{\gamma}_i, \quad (16)$$

$$V_m^{\min} - SV_{1,m} \leq V_m \leq V_m^{\max} + SV_{2,m}, \quad (17)$$

$$|I_{l,t}| - SI_l \leq I_l^{\max}. \quad (18)$$

其中,  $Ns$  为平衡节点号;  $SV_{1,m}$ 、 $SV_{2,m}$  为电压上下限约束的非负松弛变量;  $SI_l$  为输电元件最大允许载流约束的非负松弛变量,  $\alpha_l$  和  $\beta_m$  为支路  $l$  的载流松弛量以及节点  $m$  电压上下限松弛量对应的惩罚因子。约束(15)表示定义平衡节点的相角为 0; 约束(16)表示除连接在平衡节点上的机组以外其他机组的有功输出功率由主问题给定, 连接在平衡节点上的边际机组用来平衡网损; 约束(17)为松弛的节点电压幅值约束; 约束(18)为松弛的输电元件载流约束。目标函数(14)加上约束条件(15)~(18)以及(2)、(6)~(9)、(11)构成子问题的数学模型。

由数学模型可知, 子问题对应每个时段  $t$  下的交流潮流约束检验, 其实质是有功调度确定下的无功优化决策。当支路载流或节点电压发生越限时, 以松弛变量暂缓这一现象, 保证该子问题有可行解。当子问题目标函数值大于 0 时, 存在非零的松弛变量, 此时需要向主问题反馈如下 Benders 割:

$$w(\gamma, P) = \hat{w}(t) + \sum_{i=1}^{Ng} y_{i,t}^p \cdot (P_{i,t} \gamma_{i,t} - \hat{P}_{i,t} \hat{\gamma}_{i,t}) +$$

$$\sum_{i=1}^{Ng} y_{i,t}^{q1} \cdot \hat{Q}_{i,t}^{\max} \cdot (\gamma_{i,t} - \hat{\gamma}_{i,t}) - \sum_{i=1}^{Ng} y_{i,t}^{q2} \cdot \hat{Q}_{i,t}^{\min} \cdot (\gamma_{i,t} - \hat{\gamma}_{i,t}) \leq 0. \quad (19)$$

式中,  $\hat{w}$  为子问题目标函数值,  $y_{i,t}^p$  为约束(16)对应的拉格朗日乘子,  $y_{i,t}^{q1}$ 、 $y_{i,t}^{q2}$  为约束(6)对应的机组无功输出功率上下限约束的拉格朗日乘子,  $\hat{Q}_{i,t}^{\max}$ 、 $\hat{Q}_{i,t}^{\min}$  为子问题求得的机组  $i$  在时段  $t$  的无功输出功率上下限。通过在主问题中添加该约束,使得在下次迭代中求解主问题时,调整机组启停状态及有功输出,以消除非零的松弛变量,使有功输出满足交流潮流约束。

### 2.3 算法的流程

基于 Benders 分解思想构建的模型,需要通过主、子问题之间的迭代获取最终的决策结果。具体求解流程如图 1 所示。

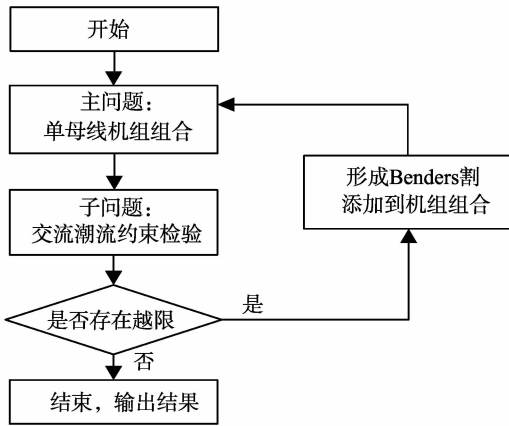


图 1 问题的求解流程

Fig. 1 The flowchart of solution obtaining

- (1) 求解主问题,获取解  $(\hat{\gamma}_{i,t}, \hat{P}_{i,t})$  并传递给子问题(计算启动时,主问题中 Benders 约束集为空);
- (2) 在主问题给定解的基础上各时段分别验证交流潮流约束是否满足,若子问题目标函数为 0,则不存在越限,计算结束;否则生成 Benders 割反馈给主问题,返回(1)。

当出现越限时才会生成 Benders 割,而且多次迭代产生的 Benders 割在整个迭代过程中始终有效,必须都添加到主问题的约束集合中。当没有越限存在,不再产生新的 Benders 割时,计算结束。

由于在实际网络中,出现支路载荷及电压越限的时段较少且越限也仅出现在少数支路及节点处,一般经过少数几次迭代即可收敛。极少数情况下,出现迭代次数超过设定上限,说明不存在满足交流潮流约束的解,此时可以在负荷节点添加虚拟发电机以模拟切负荷来满足交流潮流约束的限制。

### 3 算例分析

本研究基于 GAMS 建模平台对交流约束下机组组合问题进行计算分析。主问题是混合整数线性规划,调用 CPLEX 进行求解,子问题则是非线性最优潮流问题,调用 CONOPT 进行求解。以修正的 IEEE-14 节点 9 机系统(见图 2)为例,来说明本方法的有效性。此处设置电压上下限的标幺值为 0.95 ~ 1.1,电网参数以及其他机组参数、负荷数据等分别见表 1 ~ 表 4。下面就计算结果进行分析讨论。

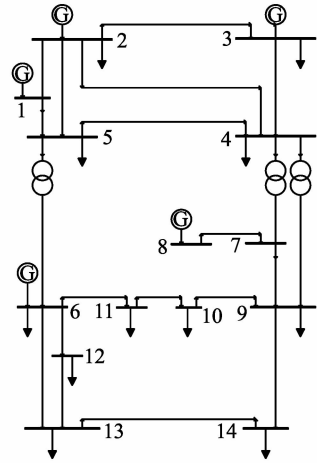


图 2 修正的 IEEE-14 节点系统  
Fig. 2 Modified IEEE-14 system

表 1 机组参数

Table 1 Parameters of the Unit

机组编号	节点号	$a/(\$ \cdot (\text{MW}^2\text{h})^{-1})$	$b/(\$ \cdot (\text{MWh})^{-1})$	$c/\$$	$P_{\max}/(\text{MW})$	$P_{\min}/(\text{MW})$	$Q_{\max}/(\text{MVar})$	$Q_{\min}/(\text{MVar})$	$k/\$$	$b/\$$	$\tau/\text{h}$	$X_0/\text{h}$	$t^{\text{on}}/\text{h}$	$t^{\text{off}}/\text{h}$	$X_d$
u1	3	0.004 63	10.694	142.735	155	54	100	-10	200	0	1	5	3	2	2.0
u2	2	0.014 33	20.890	118.821	100	25	80	-10	115	0	1	-3	1	1	1.8
u3	3	0.087 60	13.327	81.136	100	15	65	-10	80	0	1	3	2	1	2.0
u4	1	0.089 50	13.354	81.298	76	15	50	-10	80	0	1	3	2	1	1.8
u5	8	0.006 12	18.100	218.335	60	15	60	-10	100	0	1	-3	2	1	1.8
u6	6	0.014 33	19.327	157.364	50	10	40	-10	80	0	1	3	1	1	1.8
u7	6	0.007 12	19.100	230.000	20	4	10	-5	30	0	1	-1	1	1	1.8
u8	2	0.016 33	39.890	128.821	20	4	5	0	30	0	1	-1	1	1	1.8
u9	1	0.024 36	49.327	187.364	50	10	15	0	70	0	1	3	1	1	1.8

表2 24时段系统有功负荷  
Table 2 24 h system load

时段	$D_i/(MW)$	时段	$D_i/(MW)$
1	383.50	13	451.81
2	348.09	14	440.42
3	325.31	15	435.37
4	301.28	16	435.37
5	289.90	17	458.13
6	289.90	18	510.00
7	301.28	19	503.68
8	336.70	20	492.29
9	394.89	21	475.84
10	440.42	22	463.20
11	451.81	23	435.37
12	458.13	24	399.94

表3 节点负荷有功分配因子及功率因数  
Table 3 Nodal active power distribution factors and power factors

节点号	节点有功分配因子	节点功率因数
2	0.364	0.980
3	0.084	0.863
4	0.185	0.997
5	0.029	0.979
6	0.043	0.831
9	0.114	0.871
10	0.035	0.841
11	0.014	0.889
12	0.024	0.967
13	0.052	0.919
14	0.058	0.948

表4 支路参数(标么值)  
Table 4 Parameters of Branches

支路编号	电阻	电抗	电纳	首节点	末节点	$t_{max}/h$	$t_{min}/h$	$I_{max}$
1	0	0.252	0	6	5	1	0.95	1.0
2	0	0.209	0	7	4	1	0.95	1.0
3	0	0.556	0	9	4	1	0.95	1.0
4	0.018	0.059	0.026	4	2	1	1.00	2.0
5	0.047	0.198	0.021	2	3	1	1.00	2.0
6	0.058	0.176	0.018	2	4	1	1.00	2.0
7	0.054	0.223	0.024	1	5	1	1.00	2.0
8	0.057	0.173	0.017	2	5	1	1.00	2.0
9	0.067	0.171	0.017	3	4	1	1.00	2.0
10	0.013	0.042	0.006	4	5	1	1.00	2.0
11	0	0.176	0	7	8	1	1.00	0.7
12	0	0.110	0	7	9	1	1.00	0.7
13	0.031	0.084	0	9	10	1	1.00	0.7
14	0.095	0.198	0	6	11	1	1.00	0.7
15	0.122	0.255	0	6	12	1	1.00	0.7
16	0.066	0.130	0	6	13	1	1.00	0.7
17	0.127	0.270	0	9	14	1	1.00	0.7
18	0.082	0.192	0	10	11	1	1.00	0.7
19	0.220	0.199	0	12	13	1	1.00	0.7
20	0.170	0.348	0	13	14	1	1.00	0.7

### 3.1 决策结果分析

单母线模型下的系统总发电费用为 \$ 178 344.71,有功调度结果如表5所示。

表5 不计网络约束时的机组有功输出功率  
Table 5 Results of UC without network constraints MW

时段	机组编号							
	u1	u2	u3	u4	u5	u6	u7	u8-u9
1	132	95.2	43.3	53.0	60.0	0	0	0
2	155	0.0	71.7	61.4	60.0	0	0	0
3	155	0.0	54.6	55.7	60.0	0	0	0
4	155	0.0	43.3	42.9	60.0	0	0	0
5	155	0.0	43.3	35.3	56.2	0	0	0
6	155	0.0	43.3	35.3	56.2	0	0	0
7	155	0.0	43.3	42.9	60.0	0	0	0
8	155	0.0	66.0	55.7	60.0	0	0	0
9	155	0.0	71.7	58.2	60.0	50	0	0
10	155	76.4	43.3	55.7	60.0	50	0	0
11	155	87.8	43.3	55.7	60.0	50	0	0
12	155	94.1	43.3	55.7	60.0	50	0	0
13	155	87.8	43.3	55.7	60.0	50	0	0
14	155	76.4	43.3	55.7	60.0	50	0	0
15	155	71.4	43.3	55.7	60.0	50	0	0
16	155	71.4	43.3	55.7	60.0	50	0	0
17	155	94.1	43.3	55.7	60.0	50	0	0
18	155	100.0	71.7	73.3	60.0	50	0	0
19	155	100.0	71.7	67.0	60.0	50	0	0
20	155	100.0	71.6	55.7	60.0	50	0	0
21	155	100.0	55.2	55.7	60.0	50	0	0
22	155	99.2	43.3	55.7	60.0	50	0	0
23	155	71.4	43.3	55.7	60.0	50	0	0
24	155	0.0	71.7	63.3	60.0	50	0	0

当考虑交流潮流约束,机组无功输出上下限为定值(无功输出上限取为发电机额定运行状态下的无功输出,下限 $\delta_{max}$ 取 $70^\circ$ ,发电机有功输出达额定值时的无功输出)时,经4次迭代收敛,其中前3次迭代分别产生7、3、2个Benders割。计算结果显示,20、21共2个时段支路12的载流越限在调整机组u3、u4、u5的输出功率之后而消除,而1、2、8、18、19共5个时段需要通过调整机组启停状态来实现消除越限的目的。其中,时段1、18、19出现的支路12的载流越限通过启动机组u6而消除;时段18、19由于运行成本最小化目标的导引,使得节点14附近的机组处在停运状态,这是导致时段2、8出现节点14电压越下限的原因。在迭代中通过Benders割集对主问题的牵制,使得在时段2.8机组u6启动,将节点14的电压由0.949 1、0.949 8提高到0.95。表6为相对单母线机组组合的机组有功输出变化情况。系统总发电成本提高到 \$ 178 835.05。

表 6 计及交流潮流约束,固定机组输出上下限时的有功调度方案调整

Table 6 Active power output of UC with AC power flow constraints and constant Var limits MW

时段	机组编号					
	u2	u3	u4	u5	u6	u7
1	45.2	43.3	53.0	60.0	50	0
2	0	43.3	39.8	60.0	50	0
8	0	43.3	35.3	60.0	43	0
18	100.0	71.7	57.7	55.7	50	20
19	100.0	63.0	55.7	60.0	50	20
20	100.0	71.7	71.9	43.8	50	0
21	100.0	58.9	55.7	56.3	50	0

考虑发电机安全运行极限时,机组无功输出的上下限变为有功输出以及机端电压的函数,在有功输出小于最大值时,实际无功输出上限可能大于原有固定的无功输出上限,因此提供了更大的无功、电压调节范围。计算结果显示,与固定机组的无功输出上下限时相比,时段 8 并没有出现节点电压越限,原因在于在固定取值时,机组 u4 的无功输出达到其固定上限 50 MVar,而考虑到其有功输出未达到额定值,且机端电压水平偏高的影响,u4 在该时段的无功输出上限可提高至 64.2 MVar。因此,与固定无功上限相比,在时段 8 并没有启动机组 u6 用于支撑节点 14 的电压,故运行费用也有所降低,为 \$ 178 823.64。表 7 为相对单母线机组组合的机组有功输出变化情况。

表 7 计及交流潮流约束,机组无功输出上下限变动时的有功调度方案调整

Table 7 Active power output of UC with ac power flow constraints and variable Var limits MW

时段	机组编号					
	u2	u3	u4	u5	u6	u7
1	45.2	43.3	53.0	60.0	50	0
2	0	43.3	39.8	60.0	50	0
18	100.0	71.7	60.7	52.7	50	20
19	100.0	69.0	55.7	54.0	50	20
20	100.0	71.7	70.8	44.8	50	0
21	100.0	58.1	55.7	57.1	50	0

### 3.2 有关支路载流约束的讨论

在传统分析中,支路载流约束一般都采用支路允许通过的最大有功功率来表示。而实际上,其本质是热电流约束。由于有功无功之间的耦合作用以及支路两端电压的变化,使得支路允许通过的最大有功功率始终处在变动之中,而不是一个固定的值。上例中,当支路 12 在时段 17~22 达到最大热电流 0.7(标么值)时,其允许传输的有功功率则要低于

0.7(标么值),见表 8。

表 8 支路 12 允许的有功功率传输上限

Table 8 Active transmission limit of branch 12

时段	17	18	19	20	21	22
支路 12 (标么值)	0.642	0.637	0.635	0.632	0.650	0.646

由表 8 可知,在本研究算例情况下若采用最大有功功率来表征支路载流约束是冒进的,系统存在安全隐患,故传统分析中用支路允许通过的最大有功功率来表征支路载流约束是不合适的。

## 4 结论

机组组合问题作为短期调度理论中的核心部分,是实现资源优化配置的关键。伴随电网互联、大规模消纳可再生资源以及节能减排的发展,在关注有功的同时必须考虑电压支撑问题,必须在机组组合问题中考虑交流潮流约束。本研究基于 Benders 分解思想,给出了一种分解协调的求解方法,在计及交流潮流约束的同时考虑发电机安全运行极限。相关结论总结如下:

- (1)当系统中由于无功分布不合理而导致电压支撑不足时,可能导致传统仅考虑有功的机组组合决策结果不可行,由此出现电压无功制约机组启停的现象;
- (2)交流潮流约束下的机组组合体现了电网电磁功率与机械功率之间的耦合关系,能够反映支路载流、电压制约机组组合的本质;
- (3)发电机安全运行极限约束的引入使得交流潮流约束下的机组组合决策结果更加符合实际。

### 参考文献:

[1] SENJYU T, KSHIMABUKURO K, UEZATO K, et al. A fast technique for unit commitment problem by extended priority list[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2):882-888.

[2] LEE F N. The application of commitment utilization factor (CUF) to thermal unit commitment[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(2):691-698.

[3] PANG C, CHEN H. Optimal short-term thermal unit commitment[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1976, 95(4):1336-1346.

[4] Van den Bosch PPJ, HONDERD G. A solution of the unit commitment problem via decomposition and dynamic programming[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1985, PAS-104(7):1684-1690.

[5] COHEN A I, YOSHIMURA M. A branch-and-bound al-

- gorithm for unit commitment[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1983, PAS-102(2):444-451.
- [6] LAUERT G, SANDELL N, BERTSEKAST D, et al. Solution of large-scale optimal unit commitment problems [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1982, PAS-101(1):79-86.
- [7] COHEN A I, WAN S. A method for solving the fuel constrained unit commitment problem [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1987, 2(3): 608-614.
- [8] ONGSAKUL W, PETCHARAKS N. Unit commitment by enhanced adaptive Lagrangian relaxation [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(1): 620-628.
- [9] VIRMANI S, ADRIAN E C, IMHOF K, et al. Implementation of a Lagrangian relaxation based unit commitment problem[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4(4):1373-1380.
- [10] 吴金华, 吴耀武, 熊信良. 机组组合问题的扩展 Hopfield 神经网络算法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(7): 41-44.  
WU Jinhua, WU Yaowu, XIONG Xinyin. Optimization of unit commitment by Hopfield neural network algorithm[J]. Automation of Electric Power System, 2003, 27(7):41-44.
- [11] 胡家声, 郭创新, 曹一家. 一种适合于电力系统机组组合问题的混合粒子群优化算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 24-28.  
HU Jiasheng, GUO Chuangxin, CAO Yijia. A hybrid particle swarm optimization method for unit commitment problem[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 24-28.
- [12] 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 CSEE, 2010, 30(25): 101-107.
- [13] eBRAHIMI J, HOSSEINIAN S H, GHAREHPETIAN G B. Unit commitment problem solution using shuffled frog leaping algorithm[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2011, 26(2): 573-581.
- [14] WANG S, SHAHIDEHPOUR S M, KIRSCHEN D, et al. Short-term generation scheduling with transmission and environmental constraints using an augmented Lagrangian relaxation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(3):1294-1301.
- [15] 张利, 赵建国, 韩学山. 考虑网络安全约束的机组组合新算法[J]. 电网技术, 2006, 30(21): 50-55.  
ZHANG Li, ZHAO Jianguo, HAN Xueshan. A new unit commitment algorithm considering network security constraints[J]. Power System Technology, 2006, 30(21):50-55.
- [16] MA H, SHAHIDEHPOUR S M. Transmission constrained unit commitment based on Benders decomposition[C]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 1998, 20(4): 287-294.
- [17] 杨朋朋, 韩学山, 查浩. 一种计及静态安全约束机组组合的有效算法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(08): 39-43.  
YANG Pengpeng, HAN Xueshan, ZHA Hao. A novel algorithm for static security-constrained unit commitment [J]. Automation of Electric Power System, 2009, 33(08): 39-43.
- [18] 杨朋朋, 王葵, 李磊, 等. 机组组合问题的两层优化研究[J]. 山东大学学报: 工学版, 2011, 41(3):167-172.  
YANG Pengpeng, WANG Kui, LI Lei, et al. Bi-level programming research on unit commitment[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2011, 41(3):167-172.
- [19] WITHIRONPRASERT K, CHUSANAPIPUTT S, NUALHONG D, et al. Hybrid ant system/priority list method for unit commitment problem with operating constraints[C]//IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). Gippsland, Australia; the IEEE Press, 2009:1-6.
- [20] 王敏蔚, 杨莉. 考虑安全约束的机组组合免疫算法模型[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(22): 57-61.  
WANG Minwei, YANG Li. A security constrained unit commitment model based on immune algorithm[J]. Automation of Electric Power System, 2010, 34(22): 57-61.
- [21] 苏济归, 舒隽, 谢国辉, 等. 大规模机组组合问题计及网络约束的线性化求解方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 135-139.  
SU Jigui, SHU Jun, XIE Guohui, et al. Linerization method of large scale unit commitment problem with network constraints[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 135-139.
- [22] MA H, SHAHIDEHPOUR S M. Unit commitment with transmission security and voltage constraints [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(2): 757-764.
- [23] FU Yong, SHAHIDEHPOUR S M, LI Zuyi. Security-constrained unit commitment with AC constraints [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(3): 1538-1550.
- [24] BAI X, WEI H. Semi-definite programming-based method for security-constrained unit commitment with operational and optimal power flow constraints[J]. IET on Generation, Transmission & Distribution, 2009, 3

(2): 182-197.

[25] 江全元, 张铭泽, 高强. 考虑交流潮流约束的机组组合并行解法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(08): 120-126.

JIANG Quanyuan, ZHANG Mingze, GAO Qiang. A parallel algorithm for unit commitment including AC power flow constraints[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(08): 120-126.

[26] 范磊, 陈珩. 静态电压稳定分析中发电机的无功功率及其越限处理[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(12): 20-23.

FAN Lei, CHEN Heng. Treatment of generator reactive power limit violation in static voltage stability analysis

[J]. Automation of Power System, 1998, 22(12): 20-23.

[27] BENDERS J F. Partitioning procedures for solving mixed-variables programming problems [J]. Numerische Mathematik, 1962, 4(1): 238-252.

[28] GEOFFRION A M. Generalized benders decomposition [J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 1972, 10(4): 237-260.

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

(编辑: 陈斌)

(上接第 129 页)

[17] 陈伟贤. 电网过电压教程[M]. 北京: 中国电力出版社, 1996.

[18] 张维钺, 何金良, 高玉明. 过电压防护及绝缘配合[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.

[19] 宋国兵, 李森, 康小宁, 等. 一种新的相模变换矩阵[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(14): 57-60.

SONG Guobing, LI Sen, KANG Xiaoning, et al. A no-

vel phase-mode transformation matrix [J]. Automation of Electric Power System, 2007, 31(14): 57-60.

[20] 夏道止. 电力系统分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

[21] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.

(编辑: 孙培芹)

## · 会 讯 ·

### 第十六届全国图像图形学学术会议暨第六届立体图像技术学术研讨会

由中国图像图形学学会和中国图像图形学学会立体图像技术专业委员会主办, 吉林大学承办的“第十六届全国图像图形学学术会议(NCIG2012)暨第六届立体图像技术学术研讨会”将于2012年7月29日~31日在美丽的春城——吉林省长春市召开。全国图像图形学学术会议(NCIG)是中国图像图形学会主办的最高级别的系列国内会议, 每两年举办一届, 迄今已经成功举办了15届。本次会议旨在为从事图像图形相关领域的基础研究和应用推广的广大专家学者和工程技术人员提供一个相互交流的平台。会议期间同时举办3D立体成像技术领域科研成果以及相关产品展示, 召开第七届学会理事会。

NCIG涵盖了计算机图形学、图像处理、视频通讯、虚拟现实、三维可视化、医学影像、数字艺术和游戏设计、机器学习、信息安全等广泛领域。此次会议旨在聚集从事图像图形相关领域基础研究和应用推广的广大专家学者和企业, 为其提供一个相互交流的平台, 共同探讨图像图形及相关研究领域各方向的学术动态及发展趋势。就计算机图形学、图像处理、视频通讯、虚拟现实、三维可视化、医学影像、数字艺术和游戏设计、机器学习、信息安全等广泛领域目前的热点问题展开深入、广泛研讨, 共享研究成果, 促进图像图形及相关研究领域研究人员的相互交流与合作。

大会将推荐全部录用论文到合作期刊。合作期刊:

(1)《山东大学学报(工学版)》, 详细情况请了解网址: <http://njournal.sdu.edu.cn>;

(2)《吉林大学学报(工学版)》(EI全文检索)增刊, 网址: <http://xuebao.jlu.edu.cn>;

(3)《光学精密工程》(EI全文检索)增刊, 详细情况请了解网址: <http://www.eope.net>;

(4)《中国图像图形学报》, 详细情况请了解网址: <http://www.cjig.cn>。

重要日期

2012年5月20日, 投稿截止

2012年6月15日, 发出录用通知

2012年6月25日, 会议注册, 版面费收缴, 论文终稿提交

2012年7月29日~31日, 开会。