

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.02.010

# 计及新能源构网控制参数的机组组合模型

黄慧<sup>1</sup>, 丁浩寅<sup>2</sup>, 邴朝辉<sup>1</sup>, 常海军<sup>1</sup>, 黄志光<sup>2</sup>, 吕睿<sup>1</sup>

(1. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 江苏 南京 211106;

2. 国家电网有限公司华东分部, 上海 200120)

**摘要:**为了在新能源机组组合时充分发挥其灵活调节能力, 弥补新能源接入造成的系统惯量缺失, 文中以构网型新能源惯量支撑与一次调频能力为基础, 采用新能源减载存储备用容量的手段, 构建计及动态频率约束及新能源构网控制参数的机组组合模型, 并将该非线性混合整数规划模型转化为多目标双层优化问题进行迭代求解, 从而获得满足系统频率约束条件的同步机最优开机方式以及新能源最优减载量与对应的控制参数。以甘肃某风电高占比送端电网为例进行仿真验证分析, 算例结果表明, 与现有仅考虑频率约束的方案以及恒定构网控制参数的机组组合方案相比, 文中所提可变构网控制参数的机组组合方案在频率安全约束条件下能进一步提升系统运行经济性和新能源利用率。

**关键词:** 构网型新能源; 机组组合; 双层优化; 多目标粒子群优化; 频率约束; 构网控制参数

**中图分类号:** TM73

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2025)02-0100-11

## 0 引言

在当前全球范围内, 低碳经济已成为社会发展的重要目标。新能源的应用已成为实现低碳经济的重要手段之一。与传统火电机组相比, 新能源机组的出力波动性较大, 这使得电力系统面临更大的挑战<sup>[1-10]</sup>。传统电力系统机组组合通常采用保留备用容量的方式以应对新能源的波动及惯量需求<sup>[11]</sup>, 这种被动的应对方法导致系统运行成本增大, 缺乏调度的灵活性。此外, 新能源的运行模式通常基于最大功率捕获, 无法提供调频调压支撑, 其高比例接入将降低系统惯量, 导致频率偏差及变化率增大, 进而引起连锁性事故。为此, 需要了解新能源接入后电力系统的频率响应特性, 在保证频率安全的前提下制定最优的机组组合方案。

目前, 国内外学者考虑新能源接入后系统的频率响应特性<sup>[12-13]</sup>, 提出了计及频率安全约束的机组组合模型。文献[14]建立了考虑暂态频率指标的新能源电力系统机组组合模型, 采用 Benders 分解将原问题分解为主从子问题, 从而降低计算复杂度。文献[15]基于平均频率响应模型, 将系统频率约束转化为有功功率约束, 并采用分段线性化技术对约束进行简化。文献[16]在新能源机组组合模型中增加了动态频率约束, 通过新能源减载为系统提供备用的调频容量。文献[17]考虑系统整体频率响应特性, 以高比例新能源电力系统运行经济性

为目标, 提出双层机组组合模型, 算例验证了其策略的有效性。文献[18]以西北外送电网为例, 通过构建调频容量与暂态频率指标的定量关系, 提出计及生产模拟结果及频率安全约束的新能源外送规模评估方法。文献[19]考虑传统机组一次/二次调频特性, 构建计及新能源电力系统市场出清费用的联合机组组合模型, 并采用多阶段规划方法求解模型。文献[20]考虑风电不确定性, 提出多场景多时段机组组合模型, 并将模型解耦并行计算, 缩短求解时间。上述考虑频率约束的机组组合模型中, 新能源均未主动参与系统的惯量及调频支撑, 使得负荷较高时段将启动更多的同步机以提供最小惯量, 增加了系统的运行成本。

为此, 近年来学者将新能源的主动支撑能力引入机组组合中, 提出了计及新能源调频能力的机组组合模型。文献[21-22]将风电机组超速减载获得的备用容量引入机组组合中, 提出考虑风电惯量支撑控制的新能源电力系统机组优化模型, 同时采用线性化手段解决非线性频率约束的问题。文献[23]基于同步机与风机协同调频特性, 提出考虑同步机调差系数灵敏度的多目标机组组合模型, 改善了系统的频率响应。文献[24]充分考虑系统一次调频及二次调频时段的备用容量需求, 提出了计及系统全过程动态约束的新能源电力系统机组组合方法。文献[25]提出考虑同步机调频死区的频率约束条件, 在此基础上构建含风电电力系统的机组组合模型, 并采用补充优化割的方法求解机组最优开机方案。文献[26]构建计及风电机组和调相机协

收稿日期: 2024-08-10; 修回日期: 2024-10-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U2066210)

同调频的机组组合模型, 充分利用系统灵活性调节资源, 提高了运行的经济性。文献[27]提出考虑新能源最优减载方案的机组组合双层优化方法, 仿真结果表明该策略能降低常规机组启停次数, 提升新能源消纳能力。文献[28-29]计及区域互联系统的频率差异问题, 将动态频率约束嵌入机组组合中, 提出基于新能源惯量及调频支撑的机组优化调度策略, 提升不同区域间的功频响应能力。上述新能源参与调频的机组组合模型有效降低了同步机的启停次数, 提高了系统运行的经济性, 但是未考虑新能源调频控制参数对机组组合方式及新能源减载备用容量的影响, 容易造成新能源备用容量的过剩或者不足, 从而影响新能源的利用率及全局经济性。

综上所述, 文中基于构网型新能源的惯量及一次调频能力, 分析了构网新能源参与系统频率调节的响应特性, 在此基础上构建了计及频率安全约束及构网控制参数的机组组合模型。该模型通过优化同步机开机方式以及新能源减载量及其对应的控制参数, 弥补新能源接入造成的系统惯量缺失, 在频率安全稳定约束下进一步降低了同步机组的启停次数及新能源减载备用容量, 提升系统运行经济性及新能源消纳水平。

## 1 构网型新能源参与的系统频率响应特性

含构网型新能源的电力系统如图1所示, 其中, SG1、SG2为同步机, T1—T3为电力变压器, L1、L2为电力负荷, WT1—WT3为风力发电机, GFM1、GFM2为构网型变流器。由图1可知, 新能源经构网型变流器接入电网, 该变流器模拟传统同步机的二阶模型, 在控制环节中引入有功调频( $P-f$ )和无功调压( $Q-U$ )模块, 通过上述环节得到并网点电压的参考相位和幅值, 从而为系统提供惯量及调频支撑。

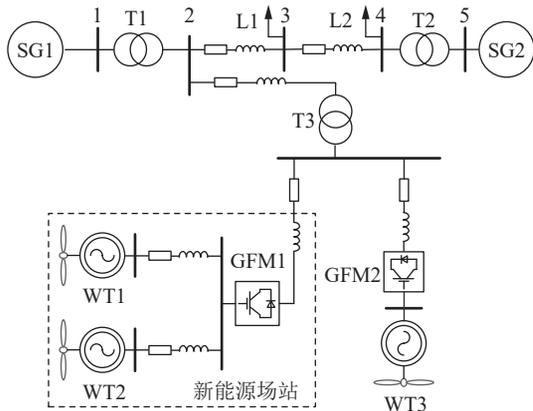


图1 含构网型新能源的电力系统

Fig.1 Power system with grid-forming based new energy

新能源参与系统惯量及调频支撑时必须保留一定的备用容量, 目前该备用容量的获取有3种方式: (1) 新能源的物理惯性, 即依靠自身转子存储动能; (2) 通过新能源减载存储备用容量; (3) 利用储能系统提供备用容量。文中采用新能源减载的方式保留备用容量, 具体减载方法为根据系统给定的减载量, 通过变桨距控制(风力发电)或变电压控制(光伏发电)重新设置新能源的静态工作点, 使其脱离最大功率输出实现减载运行<sup>[21]</sup>。值得注意的是, 该方法适用于能够快速进行功率控制的新能源, 也即能够快速改变工作点的新能源, 当无法满足上述要求时, 必须在新能源侧加装储能装置以补偿构网型变流器与新能源输出功率间的不平衡量。

构网型新能源输出特性通过模拟同步机二阶模型实现, 如式(1)所示。

$$\begin{cases} \frac{d\theta}{dt} = \omega \\ J\omega_n \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_c - D(\omega - \omega_n) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\theta$ 为构网型变流器的虚拟转角;  $\omega$ 、 $\omega_n$ 分别为构网型变流器的虚拟转动频率及系统的额定频率;  $J$ 为构网型变流器的虚拟转动惯量;  $P_m$ 、 $P_c$ 分别为新能源输出功率与构网型变流器输出电功率;  $D$ 为构网型变流器的阻尼系数。

为了模拟传统机组的功频下垂特性, 新能源输出功率  $P_m$  为:

$$P_m = P_0 + k_w(\omega_n - \omega) \quad (2)$$

式中:  $P_0$ 为新能源减载后的输出功率;  $k_w$ 为有功-频率下垂系数。根据上述模型, 构网型新能源的动态频率响应特性为:

$$2H_v \frac{d\Delta\omega^*}{dt} + D_v \Delta\omega^* = -\frac{1}{R_v} \Delta\omega^* - \Delta P_c^* \quad (3)$$

式中:  $H_v$ 为虚拟惯性时间常数,  $H_v = J\omega_n^2 / S_B$ ,  $S_B$ 为基准容量;  $D_v$ 为等效阻尼系数,  $D_v = D\omega_n^2 / S_B$ ;  $R_v$ 为等效调差系数,  $R_v = S_B / (k_w \omega_n)$ ;  $\Delta\omega^*$ 、 $\Delta P_c^*$ 分别为虚拟角频率变化量标幺值及构网型变流器有功支撑量标幺值, 该有功支撑量用于对系统进行惯量及一次调频支撑。因此, 由  $N$  台同步机与  $M$  个构网型新能源组成的电力系统, 其简化的频率响应平均模型可表示为:

$$2H_{eq} \frac{d\Delta\omega^*}{dt} + D_s \Delta\omega^* = \Delta P_G^* + \Delta P_R^* - \Delta P_L^* \quad (4)$$

式中:  $H_{eq}$ 为系统等效惯性时间常数, 其值为系统内部所有同步机与构网型新能源惯性时间常数之和;  $D_s$ 为负载阻尼系数;  $\Delta P_L^*$ 为系统内总负荷变化量标幺值;  $\Delta P_G^*$ 、 $\Delta P_R^*$ 分别为同步机和新能源一次调频功

率增量标么值,如式(5)所示。

$$\begin{cases} \Delta P_G^* = \sum_{i=1}^N \Delta P_{Gi}^* = \sum_{i=1}^N \frac{K_i(1+F_{Hi}T_{Ri}s)}{R_{Gi}(1+T_{Ri}s)} \Delta \omega^* \\ \Delta P_R^* = \sum_{j=1}^M \Delta P_{Rj}^* = \sum_{j=1}^M \frac{1}{R_{vj}(1+T_{W}s)} \Delta \omega^* \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $K_i$ 、 $F_{Hi}$  分别为同步机  $i$  的增益与总功率分数;  $R_{Gi}$  为同步机  $i$  静态调差系数;  $T_{Ri}$  为同步机  $i$  调速器的时间常数;  $R_{vj}$  为构网型新能源  $j$  的等效调差系数;  $T_W$  为新能源一次调频时间常数。根据式(4)、式(5),含构网型新能源的电力系统各机组惯量支撑与一次调频响应过程如图2所示。

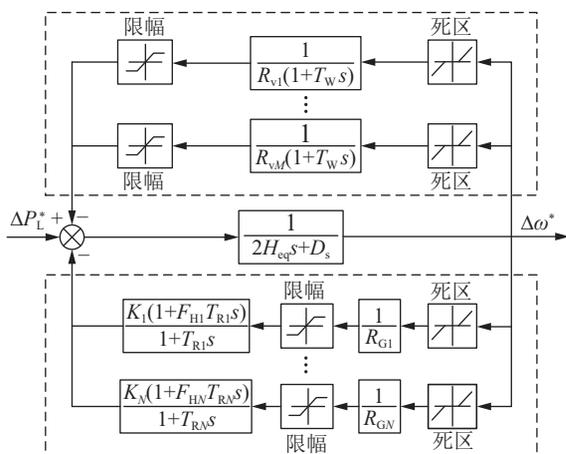


图2 新能源参与调频的系统频率响应模型

Fig.2 System frequency response model of new energy participation in frequency regulation

由频率响应模型可知,同步机数量及构网型新能源的备用容量决定了系统受扰后频率的响应特性,因此在机组组合及备用容量选取时必须考虑频率的约束条件,在频率安全稳定前提下获得最优的机组组合及减载方案。由式(3)可知,当系统内同步机数量一定时,新能源构网型变流器有功支撑量  $\Delta P_v^*$  与其构网控制参数  $H_v$  及  $R_v$  有关。当  $H_v$  偏大或  $R_v$  偏小时,受扰后的有功支撑量较大,新能源减载量(备用容量)变大,影响其消纳率及经济性,反之,当  $H_v$  偏小或  $R_v$  偏大时,受扰后的有功支撑量较小,影响系统频率安全。因此,新能源构网控制参数不仅影响稳态运行的经济性,也将影响暂态频率的安全性。然而,现有考虑频率约束的机组组合模型中,大多未考虑新能源构网控制参数的影响或者构网控制参数直接整定为恒定值,未对其进行优化,造成新能源备用容量的过剩或者不足。为此,文中提出了计及频率安全约束及构网控制参数的机组组合模型,通过优化同步机开机方式及新能源构网控制参数,最大限度地降低新能源的减载备用容量及系统运行成本。

## 2 计及频率约束及构网参数的机组组合模型

### 2.1 目标函数

文中所提计及构网控制参数的机组组合模型目标函数由同步机运行成本、新能源运维成本及新能源减载成本组成。

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (C_i^f P_{i,t} + C_i^U + C_i^D) + \sum_{j=1}^M \sum_{t=1}^T [(k_s(1-\delta_{jt})P_{Rj,t} + \mu\delta_{jt}P_{Rj,t})] \quad (6)$$

式中:  $P_{i,t}$  为同步机  $i$  在时段  $t$  的出力;  $C_i^f$  为同步机  $i$  的煤耗成本;  $C_i^U$  为同步机  $i$  的总开机成本;  $C_i^D$  为同步机  $i$  的总停机成本;  $P_{Rj,t}$  为构网型新能源  $j$  在时段  $t$  的最大出力;  $\delta_{jt}$  为构网型新能源  $j$  在时段  $t$  的减载比例;  $k_s$ 、 $\mu$  分别为构网型新能源的维护及减载成本系数;  $T$  为调度周期。

同步机组的煤耗函数可用出力的二次函数表述:

$$C_i^f P_{i,t} = a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i \quad (7)$$

式中:  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  为同步机  $i$  的煤耗系数。

### 2.2 常规约束条件

#### (1) 功率平衡约束。

系统中任意时刻所有处于开机状态的同步机总发电功率与新能源实际出力之和与总负荷相等:

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t} + \sum_{j=1}^M (1-\delta_{jt})P_{Rj,t} = \sum_{d=1}^{N_L} P_{d,t} \quad (8)$$

式中:  $N_L$  为负荷节点数;  $P_{d,t}$  为负荷  $d$  在时段  $t$  的需求量。

#### (2) 同步机出力约束。

$$u_{i,t} P_{i,\min} \leq P_{i,t} \leq u_{i,t} P_{i,\max} \quad (9)$$

式中:  $P_{i,\min}$  为同步机  $i$  最小出力值;  $P_{i,\max}$  为同步机  $i$  最大出力值;  $u_{i,t}$  为同步机  $i$  在时段  $t$  的启停状态,取1时为开机,取0时为停机。

#### (3) 系统热备用约束。

$$\sum_{i=1}^N (u_{i,t} P_{i,\max} - P_{i,t}) \geq \rho \sum_{d=1}^{N_L} P_{d,t} \quad (10)$$

式中:  $\rho$  为热备用系数,取0.05。

#### (4) 同步机爬坡约束。

$$\begin{cases} P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq u_{i,t-1}(R_u - S_{i,u}) + S_{i,u} \\ P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq u_{i,t}(R_d - S_{i,d}) + S_{i,d} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $S_{i,u}$ 、 $S_{i,d}$  分别为同步机  $i$  开机、停机的最大升降出力;  $R_u$ 、 $R_d$  分别为同步机的上、下爬坡限值。文中将开机最大升速率和停机最大降速率取为机组出力最大值和最小值的平均值。

#### (5) 同步机开停机时间约束。

$$\begin{cases} \sum_{k=t}^{t+T_s-1} (1-u_{i,k}) \geq T_s(u_{i,t-1}-u_{i,t}) \\ \sum_{k=t}^{t+T_o-1} u_{i,k} \geq T_o(u_{i,t}-u_{i,t-1}) \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $T_s$ 、 $T_o$  分别为最小停机、开机时间;  $u_{i,k}$  为同步机  $i$  在时段  $k$  的开停状态。

(6) 同步机开停机费用约束。

$$\begin{cases} C_{i,t}^U \geq H_i(u_{i,t}-u_{i,t-1}) & C_{i,t}^U \geq 0 \\ C_{i,t}^D \geq Q_i(u_{i,t-1}-u_{i,t}) & C_{i,t}^D \geq 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $C_{i,t}^U$  为同步机  $i$  在时段  $t$  的开机成本;  $C_{i,t}^D$  为同步机  $i$  在时段  $t$  的停机成本;  $H_i$ 、 $Q_i$  分别为同步机  $i$  的单机开机、停机成本。

(7) 新能源输出功率约束。

$$\begin{cases} P_{0,j,t} \leq P_{R,j,t} \\ P_{0,j,t} + \delta_{j,t} P_{R,j,t} = P_{R,j,t} \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $P_{0,j,t}$  为构网型新能源  $j$  在时段  $t$  减载后的出力值。

(8) 新能源最大有功支撑量约束。

$$\max \left| \Delta P_{e,j,t}^* \right| \leq \frac{\delta_{j,t} P_{R,j,t}}{S_B} \quad (15)$$

式中:  $\max \left| \Delta P_{e,j,t}^* \right|$  为构网型新能源  $j$  在时段  $t$  的最大有功支撑量标么值。式(15)表明, 新能源在任意时段的最大有功支撑量均需小于其备用容量。由式(3)可知, 该最大值由虚拟惯性时间常数、调差系数、系统频率变化率及最大偏差决定。

### 2.3 频率安全约束

影响系统安全稳定运行的频率指标主要有频率变化率以及频率最低点  $f_{\text{nadir}}$ , 为了计算不同时间段内系统的这两项指标, 文中进行如下假设: 忽略图2中调频死区和限幅环节; 由于不同机组的调速器时间常数  $T_{Ri}$  在允许范围内对系统频率偏差的影响很小<sup>[21]</sup>, 因此将式(5)中  $T_{Ri}$  全部统一替换为  $T_R$ ; 由于新能源构网型变流器响应速度快, 因此忽略其时间常数  $T_W$ 。基于上述假设条件, 联立式(4)、式(5)可得系统受扰后的频率响应传递函数为:

$$\begin{cases} \Delta \omega^* = \frac{-(1+T_R s)}{2H_{\text{eq}} T_R s^2 + W_S + R_{T1} + R_{T2}} \Delta P_L^* \\ H_{\text{eq}} = \sum_{i=1}^N u_i H_{Gi} + \sum_{j=1}^M H_{vj} \\ R_{T1} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_{Gi}} \\ R_{T2} = \sum_{j=1}^M \frac{1}{R_{vj}} \\ W = 2H_{\text{eq}} + F_H T_R R_{T1} + T_R R_{T2} \\ n = \sum_{i=1}^N u_i \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $H_{Gi}$  为同步机  $i$  的惯性时间常数;  $H_{vj}$  为构网型新能源  $j$  的虚拟惯性时间常数;  $u_i$  为同步机  $i$  的开停状态;  $F_H$  为同步机的总功率分数;  $n$  为系统总开机数量。式(16)为新能源参与调频的系统频率响应传递函数, 值得注意的是, 当系统发生极端故障导致机组及新能源输出功率限幅时, 式(16)不再成立, 此时频率将发生大幅跌落从而触发电力系统“三道防线”进行频率紧急控制, 此时不属于稳态的机组组合问题, 文中不再赘述。由式(16)计算的指标需要满足以下约束:

$$\begin{cases} \Delta \omega_{\text{nadir}}^* \leq \Delta \omega_{\text{max}}^* \\ \frac{\omega_n d \Delta \omega^*}{dt} \leq F_{\text{max}} \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $\Delta \omega_{\text{nadir}}^*$ 、 $\Delta \omega_{\text{max}}^*$  分别为系统受扰后的最大频差标么值和允许的最大频差标么值;  $F_{\text{max}}$  为允许的频率变化率最大值, 其计算方法参考文献[23], 文中不再叙述。另外, 考虑构网型新能源场站减载部分用于惯量支撑和一次调频, 其须满足如下不等式约束:

$$\begin{cases} \frac{2H_{vj} S_B}{\omega_n} F_{\text{max}} \leq \delta_{j,t} P_{R,j,t} \\ \frac{\Delta \omega_{\text{nadir}}^* S_B}{R_{vj,t}} \leq \delta_{j,t} P_{R,j,t} \end{cases} \quad (18)$$

由目标函数及约束条件可知, 模型的决策变量为  $P_{i,t}$ 、 $u_{i,t}$ 、 $\delta_{j,t}$  以及构网控制参数  $H_{vj}$ 、 $R_{vj}$ 。在满足式(8)—式(15)、式(17)、式(18)的约束下, 最小化目标函数式(6), 即可得到考虑机组开停成本、运行成本、新能源消纳率、频率安全约束的同步机开机出力优化方案以及构网型新能源最优减载量。

### 2.4 机组组合优化模型求解

由于式(15)、式(17)、式(18)所描述的约束之间具有强耦合性, 故可以将其拆分为主、子问题进行迭代求解, 主、子问题间通过新能源最大有功支撑量进行交互。主问题为不含频率安全约束的传统机组组合问题, 其决策变量为同步机开机方案以及新能源的减载量, 该模型为混合整数非线性规划 (mixed integer nonlinear programming, MINP) 模型, 可用求解器进行求解; 子问题为计及频率安全约束的新能源最优支撑量问题, 其决策变量为构网控制参数, 用以优化不同新能源的最大有功支撑量, 该模型为结构复杂的非线性优化问题, 且不同新能源的最大有功支撑量间相互影响, 故文中采用多目标粒子群优化 (multi-objective particle swarm optimization, MOPSO) 算法对其进行优化, 该方法具有收敛速度快、稳定性强的优点。

子问题的最优解即为当满足频率约束条件下

新能源的最大支撑量大于主问题求得的减载量时,子问题将最优解返回主问题,主问题将其作为减载量的约束条件继续进行优化,在迭代中不断寻求全局最优解。因此文中采用的双层优化模型求解流程如下:

(1) 对主问题进行优化求解。该问题目标为式(6),决策变量为  $P_{i,t}$ 、 $\delta_{j,t}$ ,约束条件为式(8)—式(15),通过优化确定每个时段下机组的开停机组合  $U^{\text{opt}}$ 、机组最优出力  $P^{\text{opt}}$ 、新能源最优减载量  $\delta^{\text{opt}}$ ,即主问题各决策变量组成的向量。

(2) 对子问题进行优化求解。基于主问题最优解,根据以下多目标模型对新能源最大支撑量进行优化:

$$\begin{cases} \min \{f_1, f_2, \dots, f_j, \dots, f_M\} \\ f_j = \max \left| 2H_{vj,t} \frac{d\Delta\omega^*}{dt} + \frac{1}{R_{vj,t}} \Delta\omega^* \right| \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $f_j$  为构网型新能源  $j$  的子问题模型目标函数,决策变量为  $H_{vj,t}$ 、 $R_{vj,t}$ ,约束条件为式(17)、式(18),通过多目标优化确定每个时段下各新能源的最优支撑量,即  $\max |\Delta P_{ej,t}^*|^{\text{opt}}$ ,将其返还至主问题。该子问题的 MOPSO 求解步骤如下。

步骤 1: 输入主问题的最优解及粒子群算法参数,随机生成初始种群;

步骤 2: 以子问题目标函数作为适应度值,根据式(16)计算当前种群的适应度值;

步骤 3: 对种群进行非支配排序,找出当前最优解和全局最优解;

步骤 4: 计算粒子位置差距值和动态惯性权重,根据约束条件更新粒子位置和速度;

步骤 5: 对更新后的粒子进行交叉变异操作,计算子代种群适应度值;

步骤 6: 将父代与子代混合形成新种群,对新种群进行非支配排序,选择较优粒子形成下一代种群;

步骤 7: 重复步骤 2 直至迭代完成并输出最优的决策变量,以及最优支撑量。

(3) 根据式(15)进行判断,若满足该约束,则求解结束,否则将子问题的最优解作为式(15)的边界继续进行主问题的优化,直至任意时段满足所有约束条件。基于上述内容,考虑频率安全约束及构网控制参数的机组组合模型求解流程如图 3 所示,其中,  $\delta_{jt}^{\text{opt}}$  为构网型新能源  $j$  在时段  $t$  的最优减载量。

### 3 算例分析

#### 3.1 模型基本参数及数据

文中以甘肃某风电高占比的送端电网为例,其

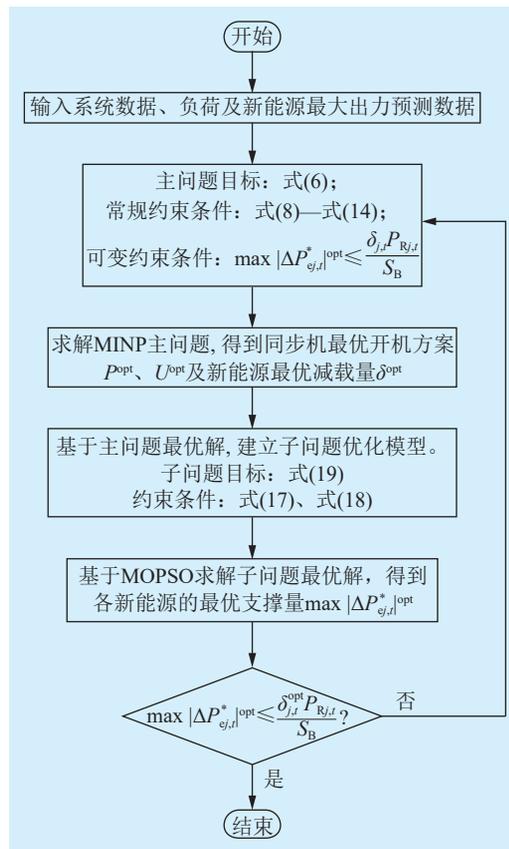


图 3 优化模型求解流程

Fig.3 Flow chart of the optimization model solving

简化结构如图 4 所示。该送端电网的线路数据由该地区实际电网的电力系统分析程序导出,具体数据如表 1 所示。系统中包含 6 台同步机组 SG1—SG6 及 5 个新能源风电场,同步机组的经济性参数及物理参数如表 2 和表 3 所示,新能源风电场 1—新能源风电场 3 的容量为 520 MW,新能源风电场 4—新能源风电场 5 的容量为 310 MW,风电场运维及减载成本系数与文献[30]一致。有功负荷除本地节点负荷外,还包括一条特高压直流送出。新能源风电场最大出力采用当地实测数据,见图 5。

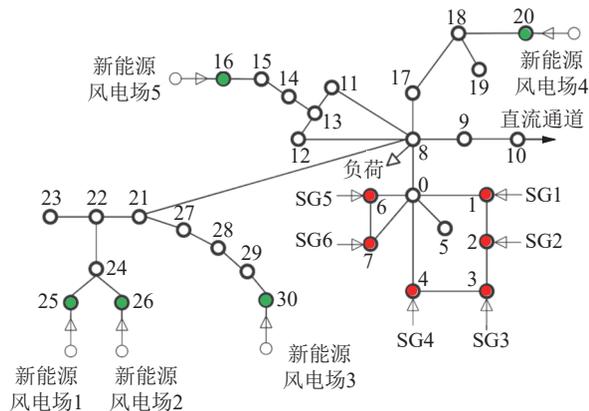


图 4 含新能源的电网网架结构

Fig.4 Grid structure of the power grid with new energy

表 1 送端电网线路参数

Table 1 Line parameters of sending-end grid

| 支路首端号 | 支路末端号 | 支路电抗标么值/10 <sup>-2</sup> | 支路电纳标么值 |
|-------|-------|--------------------------|---------|
| 0     | 1     | 0.34                     | 0.40    |
| 0     | 4     | 0.45                     | 0.52    |
| 0     | 5     | 0.19                     | 0.82    |
| 0     | 6     | 0.43                     | 0.52    |
| 0     | 7     | 0.43                     | 0.52    |
| 0     | 8     | 0.41                     | 0       |
| 0     | 9     | 0.01                     | 0       |
| 1     | 2     | 0.01                     | 0       |
| 2     | 3     | 0.18                     | 0.20    |
| 3     | 4     | 0.01                     | 0       |
| 6     | 7     | 0.01                     | 0       |
| 8     | 9     | 0.41                     | 0       |
| 8     | 11    | 0.96                     | 5.89    |
| 8     | 12    | 0.96                     | 2.20    |
| 8     | 17    | 0.03                     | 1.62    |
| 8     | 21    | 0.15                     | 3.60    |
| 9     | 10    | 0.01                     | 0       |
| 11    | 13    | 0.01                     | 0       |
| 12    | 13    | 0.01                     | 0       |
| 13    | 14    | 0.40                     | 0       |
| 14    | 15    | 0.01                     | 0       |
| 15    | 16    | 0.20                     | 0       |
| 17    | 18    | 0.40                     | 0       |
| 18    | 19    | 0.20                     | 0       |
| 18    | 20    | 0.20                     | 0       |
| 21    | 22    | 0.60                     | 0       |
| 21    | 27    | 0.66                     | 4.00    |
| 22    | 23    | 1.60                     | 0       |
| 22    | 24    | 0                        | 0.02    |
| 24    | 25    | 0.50                     | 0       |
| 24    | 26    | 0.50                     | 0       |
| 27    | 28    | 0.77                     | 5.06    |
| 28    | 29    | 1.30                     | 0       |
| 29    | 30    | 0.50                     | 0       |

算例选取初始频率变化率上限为 0.5 Hz/s, 频率最低值下限为 49.2 Hz, 功率扰动量为总负荷的 10%, 备用容量系数为 10%, 新能源最大减载比例不超过 40%, 调度周期为 24 h, 整个系统计算的基准容量均为 1 000 MW。粒子群算法的参数设置为: 种群规模为 100, 迭代次数为 200, 变异率为 0.05, 交叉率为 0.1, 惯性系数为 0.4, 动态学习因子为  $c_{1q} = 2.5 + (0.5 - 2.5)q/g_{en}$  和  $c_{2q} = 0.5 + (2.5 - 0.5)q/g_{en}$ ,  $q$  为当前迭代次数;  $g_{en}$  为总迭代次数。文中设置以下 3 种开机方案进行对比分析。

方案 1: 考虑系统频率约束, 但新能源风电场不提供惯量与一次调频支撑的机组组合。

表 2 同步机组经济性参数

Table 2 Economic parameters of synchronous generators

| 同步机组 | 节点 | $P_{max}/$<br>MW | $P_{min}/$<br>MW | $a/10^{-4}$ (美元·<br>MW <sup>-1</sup> ·h <sup>-2</sup> ) | $b/$ (美元·<br>MW <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ) |
|------|----|------------------|------------------|---|--|
| SG1  | 1  | 850              | 255              | 4.8   | 17.5   |
| SG2  | 2  | 750              | 225              | 50  | 18.5   |
| SG3  | 3  | 750              | 225              | 33  | 18.5   |
| SG4  | 4  | 750              | 225              | 45  | 18.5   |
| SG5  | 6  | 660              | 198              | 42.6  | 24.8   |
| SG6  | 7  | 660              | 198              | 80  | 22.5   |

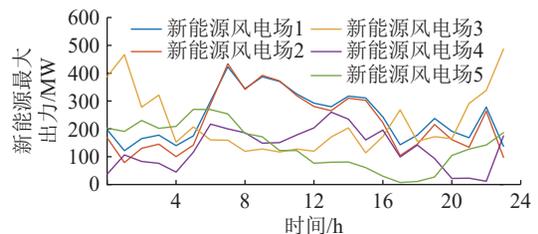
  

| 同步机组 | $c/$<br>(美元·h <sup>-1</sup> ) | $\frac{R_u}{R_d}$ | $\frac{T_s}{T_o}$ | $H/$<br>(美元·次 <sup>-1</sup> ) | $Q/10^{-4}$<br>(美元·次 <sup>-1</sup> ) |
|------|-------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------------------|--------------------------------------|
| SG1  | 1 000                         | 125               | 6                 | 9 500                         | 1.969                                |
| SG2  | 700                           | 100               | 5                 | 8 600                         | 1.650                                |
| SG3  | 750                           | 105               | 5                 | 8 500                         | 1.750                                |
| SG4  | 700                           | 105               | 5                 | 9 000                         | 1.800                                |
| SG5  | 450                           | 85                | 4                 | 7 200                         | 1.500                                |
| SG6  | 440                           | 85                | 4                 | 7 500                         | 1.500                                |

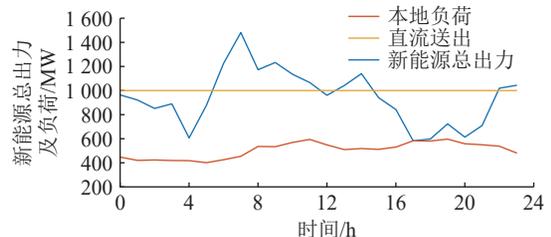
表 3 同步机组物理参数

Table 3 Physical parameters of synchronous generators

| 同步机组 | 机组惯量<br>$J_s/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$ | $R_G/\text{p.u.}$ | $F_H/\text{p.u.}$ | $K/\text{p.u.}$ | $T_R/\text{p.u.}$ |
|------|--|-------------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| SG1  | 55 000                                   | 0.055             | 0.326             | 0.95            | 18                |
| SG2  | 45 000                                   | 0.045             | 0.326             | 0.95            | 18                |
| SG3  | 45 000                                   | 0.051             | 0.326             | 0.93            | 18                |
| SG4  | 45 000                                   | 0.030             | 0.326             | 0.95            | 18                |
| SG5  | 40 000                                   | 0.025             | 0.326             | 0.95            | 18                |
| SG6  | 40 000                                   | 0.033             | 0.326             | 1.00            | 18                |



(a) 新能源最大出力曲线



(b) 新能源总出力及负荷曲线

图 5 新能源风电场出力及负荷曲线

Fig.5 New energy station output and load curve

方案 2: 考虑系统频率约束, 新能源风电场提供惯量与一次调频支撑的机组组合, 但构网控制参数恒定。

方案 3: 文中所提计及频率安全约束及新能源

构网控制参数的机组组合。

### 3.2 方案分析与比较

文中采用求解器+MOPSO 算法对双层模型进行优化,计算 3 种方案下各同步机出力、开停安排、各新能源风电场出力、减载比例等结果。根据开停方案和构网控制参数计算各方案各时段的频率最低点。

计算各方案的运行成本,得到方案 1 的综合运行成本为  $6.35 \times 10^5$  美元,方案 2 的综合运行成本为  $5.34 \times 10^5$  美元,方案 3 的综合运行成本为  $5.01 \times 10^5$  美元。可知,方案 1 考虑频率约束后,在新能源出力较大时段开启了较多同步机组,并且消纳了大量新能源以维持功率平衡,因此其综合运行成本最高;方案 2 通过减载新能源出力以提供惯量支撑及调频能力,在新能源出力较大时段减少了同步机的开机数量,从而增加了新能源的消纳水平,因此综合运行成本减少;方案 3 在方案 2 的基础上对构网控制参数进行了优化,增加了新能源的支撑能力,与方案 2 对比同步机的开机数量及新能源减载量进一步减少,经济性最高。各机组有功出力、开机数量及新能源减载量如图 6—图 8 所示,对不同时段各方案的特点进一步分析。

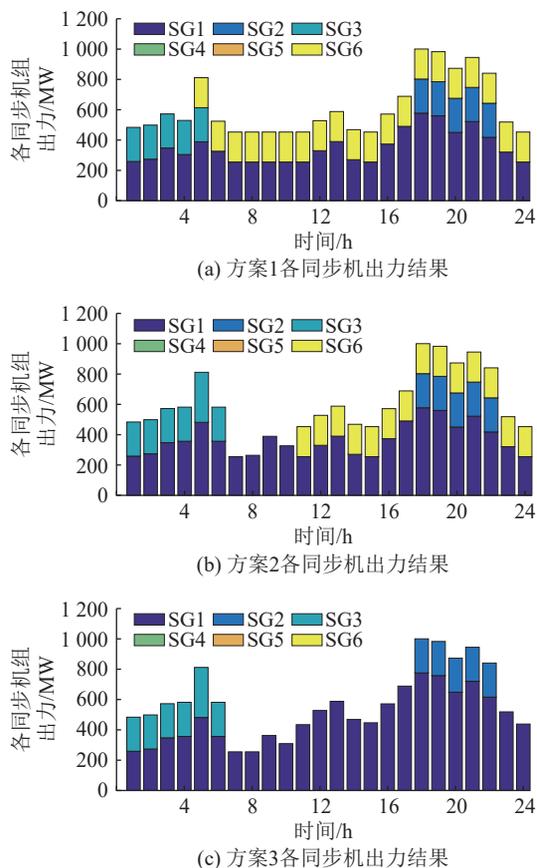


图 6 不同方案下各同步机出力情况

Fig.6 Output of each synchronous generator under different schemes

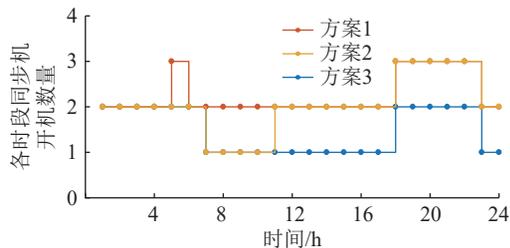
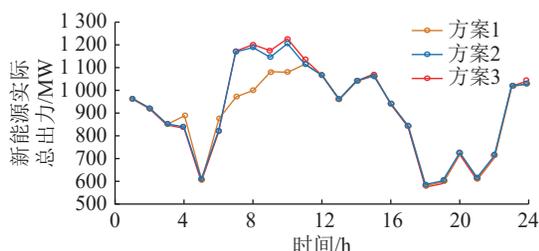
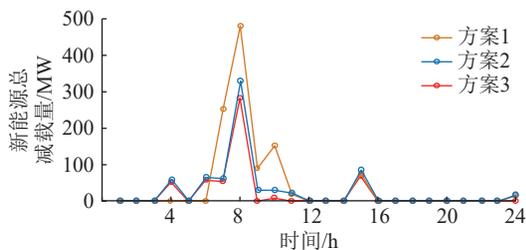


图 7 不同方案下各同步机开机情况

Fig.7 Start-up of each synchronous generator under different schemes



(a) 新能源实际总出力曲线



(b) 新能源总减载量曲线

图 8 不同方案下新能源出力及减载情况

Fig.8 New energy output and shedding under different schemes

根据图 5 可知,将全天 24 h 分成 4 个阶段进行分析:第 1 阶段 1 h—5 h,该阶段新能源总出力较小,总负荷也不大,此时新能源基本上全额消纳。在机组组合优化下,1 h—3 h 各方案均启动了 2 台相同的同步机组,新能源无减载现象,如图 6—图 8 所示。在 4 h,方案 2 和方案 3 根据优化结果减载 52 MW 新能源,此时该部分备用容量的用途不同。方案 2 由于采用恒定控制参数将对受扰系统进行有功支撑,而方案 3 采用可变控制参数,其优化结果如表 4 所示。从表 4 可知,4 h 方案 3 的构网控制参数均为 0,即此时新能源不参与有功支撑,因此 4 h 受扰后方案 2 的频率偏差最小,如图 9 所示。在 5 h,根据优化结果,方案 1 开启了 3 台同步机组,因此其受扰后的频率偏差最小,此时新能源全额消纳,但同时经济性变差。

第 2 阶段 6 h—10 h,该时间段新能源总出力大于总负荷,因此各方案对新能源进行了减载。在该时段,方案 1 为了保证功率平衡及频率约束条件,将 SG3 改为调频能力更强的 SG6,并且最大消减

表4 方案3中新能源最优构网控制参数  
Table 4 Optimal grid-forming control parameters of new energy in scheme 3

| 参数      | 时间 | 新能源<br>风电场1 | 新能源<br>风电场2 | 新能源<br>风电场3 | 新能源<br>风电场4 | 新能源<br>风电场5 |
|---------|----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $H_v$   | 4  | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           |
|         | 6  | 3.03        | 0           | 0.43        | 0.70        | 0           |
|         | 7  | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           |
|         | 8  | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           |
|         | 10 | 0.09        | 0           | 0           | 0.66        | 0           |
|         | 15 | 0.23        | 0.24        | 0           | 0.43        | 1.11        |
| $1/R_v$ | 4  | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           |
|         | 6  | 3.97        | 0           | 0.82        | 0.50        | 0           |
|         | 7  | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           |
|         | 8  | 11.97       | 0           | 0           | 0           | 0           |
|         | 10 | 0.83        | 0           | 0           | 1.60        | 0           |
|         | 15 | 0.14        | 0.01        | 0           | 0.24        | 0.98        |

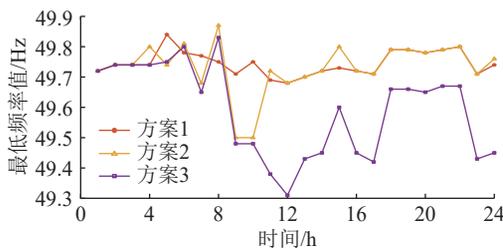


图9 各时段最低频率值

Fig.9 The lowest frequency of each time

了480 MW的新能源,造成运行经济性变差。对于方案2和方案3,根据优化结果减载了部分新能源用于频率支撑,因此在关停了SG3后系统受扰频率偏差仍然满足要求,并且新能源减载量较方案1更少,提高了运行经济性,如图8和图9所示。此外,在6h—8h及10h,由于方案3对其构网控制参数进行了优化,因此在系统受扰后各新能源的有功支撑量较方案2更少,因此需要的减载量更少,经济性更好,如图8(b)所示。从表4也可以看出,在不同时间各新能源参与频率调节的作用不同,例如新能源风电场1在6h同时提供惯量及一次调频支撑,而在8h仅提供一次调频支撑。最后,由于方案3总体有功支撑量变少,因此受扰后频率偏差较方案2更大,但是仍然满足要求,如图9所示。

第3阶段11h—17h,该时段新能源出力已经下降,基本能实现全额消纳。但是,此时新能源能减载获得的备用容量较少,无法提供足够的功率支撑,并且此时负荷仍然较大,因此方案2根据优化结果开启了SG6以提高系统惯量,如图6所示。相比方案2,方案3根据优化结果未开启其余同步机

组,因此,在该时段下系统受扰后频率偏差最大,但是频率仍然在约束范围内,且由于减少了机组的煤耗及启停费用,经济性更好。在15h,由于新能源最大出力值升高,因此在该时段方案2、方案3都进行了减载并提供有功支撑,但由于方案3仅开启了1台同步机,因此方案3的频率偏差更大,如图9所示。

第4阶段18h—24h,该阶段负荷远远大于新能源,因此3种方案下新能源都全额消纳,但由于此时负荷较大,方案3中负荷10%波动造成的频率变化率 $F$ 无法满足要求(最低频率值虽满足要求,但也偏低),为此根据优化结果方案2和方案3均启动SG2来完成频率控制目标,但相应的成本增加。

综合对比3种方案可知,方案2和方案3相比方案1,由于增加新能源构网控制能力,为系统提供惯量及一次调频支撑,同步机的开机数量及减载量有所减少,提高经济性;此外,方案3优化构网控制参数,扰动后有功支撑量变小,虽然最低频率值变小,但在此方案下新能源备用容量较小,经济性更优。当新能源最大出力日前预测结果产生较大误差时,系统将根据日内短期预测值进行减载量及构网参数的滚动校正,一般分为2种情况:(1)若短期预测值远大于日前预测,则根据式(6)及文中约束条件重新计算减载量及构网控制参数;(2)若短期预测值远小于日前预测,则新能源不参与惯量及调频支撑,其构网参数均设为0,同步机承担预测误差,如果此时不满足频率约束,则启动热备用机组。

## 4 结语

含高比例新能源的电力系统频率响应能力同时受到同步机与新能源控制参数的影响,在机组开机数量较少的情况下,负荷波动对频率安全稳定的影响不可忽视。文中基于新能源场站的构网控制方法,在机组组合模型中考虑了频率安全约束及构网控制参数的影响,建立了机组组合的双层优化模型,结果表明,在新能源高占比的送端电网,可通过减载新能源获得一定备用容量,从而提供惯量及一次调频支撑能力,使得在不增加同步机组的前提下满足频率约束条件,降低运行成本,并且通过优化构网控制参数可以进一步降低备用容量,提高系统经济性。此外,文中所述新能源经构网型变流器接入的系统强度需满足一定的要求,系统强度过大会引起构网型变流器的并网稳定性问题,强度过低时扰动引起的电压频率波动也会影响新能源的可靠并网。

## 致谢

本文得到国家电网有限公司华东分部项目(SGHD0000GHJS2310435)资助,谨此致谢!

## 参考文献:

- [1] 曹炜, 钦焕乘, 陆建忠, 等. 新型电力系统下虚拟同步机的定位和应用前景展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(4): 190-207.  
CAO Wei, QIN Huancheng, LU Jianzhong, et al. Orientation and application prospect of virtual synchronous generator in new power system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(4): 190-207.
- [2] 林晓煌, 文云峰, 杨伟峰. 惯量安全域: 概念、特点及评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(9): 3065-3079.  
LIN Xiaohuang, WEN Yunfeng, YANG Weifeng. Inertia security region: concept, characteristics, and assessment method[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(9): 3065-3079.
- [3] 张桂红, 刘飞, 王世斌, 等. 高比例新能源电力系统频率稳定性的惯量需求分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(7): 81-87.  
ZHANG Guihong, LIU Fei, WANG Shibin, et al. Inertia requirement analysis of frequency stability of renewable-dominant power system[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2022, 34(7): 81-87.
- [4] 王博, 杨德友, 蔡国伟. 高比例新能源接入下电力系统惯量相关问题研究综述[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 2998-3007.  
WANG Bo, YANG Deyou, CAI Guowei. Review of research on power system inertia related issues in the context of high penetration of renewable power generation[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(8): 2998-3007.
- [5] 李响, 武海潮, 王文雪, 等. 考虑大规模新能源接入的电网性能评价指标体系[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(15): 178-187.  
LI Xiang, WU Haichao, WANG Wenxue, et al. Performance evaluation index system of a power grid considering large-scale new energy[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(15): 178-187.
- [6] 姜河, 周航, 赵琰, 等. 计及新能源消纳与碳捕集电厂的多能源系统优化调度研究[J]. 可再生能源, 2024, 42(11): 1536-1545.  
JIANG He, ZHOU Hang, ZHAO Yan, et al. Research on multi-time scale optimal scheduling considering optimal consumption of new energy and carbon capture power plants[J]. *Renewable Energy Resources*, 2024, 42(11): 1536-1545.
- [7] 谈竹奎, 文贤馗, 杨涛, 等. 面向新型电力系统的双馈风力发电机并网控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 181-187.  
TAN Zhukui, WEN Xiankui, YANG Tao, et al. A grid-connected control strategy for doubly-fed wind turbines for new power systems[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(3): 181-187.
- [8] 胡凯利, 轩建举, 刘智伟, 等. 计及并网强度最大化的新能源集群出力优化研究[J]. 可再生能源, 2023, 41(3): 411-419.  
HU Kaili, XUAN Jianju, LIU Zhiwei, et al. Research on output optimization of new energy cluster considering the maximization of grid connection intensity[J]. *Renewable Energy Resources*, 2023, 41(3): 411-419.
- [9] 孙靛雨, 林泽源, 李伟. 考虑氢储能的多目标综合能源优化配置方案研究[J]. 高压电器, 2024, 60(7): 88-96.  
SUN Jingyu, LIN Zeyuan, LI Wei. Research on multi-objective comprehensive energy optimization configuration scheme considering hydrogen storage[J]. *High Voltage Apparatus*, 2024, 60(7): 88-96.
- [10] 郑婉婷, 赵倩宇, 王璇, 等. 绿证-碳交易机制下新型电力系统电-氢-气混合储能容量优化配置方法[J]. 供用电, 2024, 41(3): 24-31, 41.  
ZHENG Wanting, ZHAO Qianyu, WANG Xuan, et al. Optimization configuration method for hybrid energy storage capacity of electricity-hydrogen-gas for new power system under the green certificate carbon trading mechanism[J]. *Distribution & Utilization*, 2024, 41(3): 24-31, 41.
- [11] MALEKPOUR M, ZARE M, AZIZIPANAH-ABARGHOEE R, et al. Stochastic frequency constrained unit commitment incorporating virtual inertial response from variable speed wind turbines[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2020, 14(22): 5193-5201.
- [12] 张祥宇, 胡剑峰, 付媛, 等. 风储联合系统的虚拟惯量需求与协同支撑[J]. 电工技术学报, 2024, 39(3): 672-685.  
ZHANG Xiangyu, HU Jianfeng, FU Yuan, et al. Virtual inertia demand and collaborative support of wind power and energy storage system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024, 39(3): 672-685.
- [13] AHMADI H, GHASEMI H. Security-constrained unit commitment with linearized system frequency limit constraints[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(4): 1536-1545.
- [14] 王博, 杨德友, 蔡国伟. 大规模风电并网条件下考虑动态频率约束的机组组合[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2513-2519.  
WANG Bo, YANG Deyou, CAI Guowei. Dynamic frequency constraint unit commitment in large-scale wind power grid connection[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(7): 2513-2519.
- [15] 林恒先, 侯凯元, 陈磊, 等. 高比例风电电力系统考虑频率安全约束的机组组合[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 1-13.  
LIN Hengxian, HOU Kaiyuan, CHEN Lei, et al. Unit commitment of power system with high proportion of wind power considering frequency safety constraints[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(1): 1-13.

- [16] 叶婧, 林涛, 张磊, 等. 考虑动态频率约束的含高渗透率光伏电源的孤立电网机组组合[J]. 电工技术学报, 2017, 32(13): 194-202.  
YE Jing, LIN Tao, ZHANG Lei, et al. Isolated grid unit commitment with dynamic frequency constraint considering photovoltaic power plants participating in frequency regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(13): 194-202.
- [17] 王涛, 王廷涛, 刘芮, 等. 计及动态频率响应约束的高比例风电电力系统机组组合模型[J]. 高电压技术, 2021, 47(10): 3463-3479.  
WANG Tao, WANG Tingtao, LIU Rui, et al. Unit commitment model of high proportion wind power system considering dynamic frequency response constraints[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3463-3479.
- [18] 贺海磊, 张彦涛, 孙晓强, 等. 考虑频率安全约束的西北电网新能源开发及直流外送规模评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14): 4753-4762.  
HE Hailei, ZHANG Yantao, SUN Xiaoqiang, et al. Evaluation method of renewable energy development scale and DC transmission scale of China Northwest power grid by considering frequency security constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 4753-4762.
- [19] 王霞, 应黎明, 卢少平. 考虑动态频率约束的一次调频和二次调频联合优化模型[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 2858-2867.  
WANG Xia, YING Liming, LU Shaoping. Joint optimization model for primary and secondary frequency regulation considering dynamic frequency constraint[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2858-2867.
- [20] 吴雄, 何雯雯, 李晓飞, 等. 计及风电不确定性的多场景多时段安全约束机组组合解耦求解方法[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(3): 91-97.  
WU Xiong, HE Wenwen, LI Xiaofei, et al. Multi-scenario multi-temporal decomposition method for security-constrained unit commitment considering uncertainty of wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(3): 91-97.
- [21] 蔡国伟, 钟超, 吴刚, 等. 考虑风电机组超速减载与惯量控制的电力系统机组组合策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 134-142.  
CAI Guowei, ZHONG Chao, WU Gang, et al. Unit commitment strategy of power system considering overspeed load reduction and inertia control of wind turbine[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 134-142.
- [22] 毛颖群, 张建平, 程浩忠, 等. 考虑频率安全约束及风电综合惯性控制的电力系统机组组合[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(11): 61-70.  
MAO Yingqun, ZHANG Jianping, CHENG Haozhong, et al. Unit commitment of a power system considering frequency safety constraint and wind power integrated inertial control[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11): 61-70.
- [23] 张嘉琪, 胥国毅, 王程, 等. 考虑同步机调差系数灵敏度与频率约束的机组组合[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(13): 102-110.  
ZHANG Jiaqi, XU Guoyi, WANG Cheng, et al. Unit commitment considering the sensitivity of the synchronous generator adjustment coefficient and frequency constraint[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(13): 102-110.
- [24] 葛晓琳, 刘亚, 符杨, 等. 考虑惯量支撑及频率调节全过程的分布鲁棒机组组合[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4043-4058.  
GE Xiaolin, LIU Ya, FU Yang, et al. Distributed robust unit commitment considering the whole process of inertia support and frequency regulations[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4043-4058.
- [25] 申家镨, 李卫东, 李正文, 等. 计及一次调频死区与限幅的高比例风电电力系统机组组合[J]. 电网技术, 2022, 46(4): 1326-1337.  
SHEN Jiakai, LI Weidong, LI Zhengwen, et al. Unit commitment of power system with high proportion of wind power considering the deadband and limiter of primary frequency response[J]. Power System Technology, 2022, 46(4): 1326-1337.
- [26] 江一航, 赵书强, 王慧, 等. 计及风电、调相机支撑特性的频率安全约束分布鲁棒机组组合调度方法[J]. 电工技术学报, 2025, 40(1): 80-95.  
JIANG Yihang, ZHAO Shuqiang, WANG Hui, et al. Distributionally robust frequency constrained unit commitment with frequency support of wind power and synchronous condenser[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(1): 80-95.
- [27] 杨德友, 孟振, 王博, 等. 暂态频率约束下考虑新能源最优减载的机组组合双层优化策略[J]. 电力建设, 2023, 44(2): 74-82.  
YANG Deyou, MENG Zhen, WANG Bo, et al. Two-layer optimization strategy for unit commitment with transient frequency constraint considering optimized reserve of renewable energy[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(2): 74-82.
- [28] 信向誉, 王涛, 顾雪平, 等. 规模风电接入下考虑多区域频率动态安全的机组组合与风险调度[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(15): 5824-5839.  
XIN Xiangyu, WANG Tao, GU Xueping, et al. Unit commitment and risk dispatch considering multi-regional frequency dynamic security under large-scale wind power access[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 5824-5839.
- [29] 江一航, 赵书强, 韦子瑜, 等. 考虑区域间频率动态差异及频率响应全过程的分布鲁棒机组组合[J/OL]. 中国电机工程学

报: 1-16[2024-08-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107-tm.20240124.1802.009.html>.

JIANG Yihang, ZHAO Shuqiang, WEI Ziyu, et al. Distributionally robust unit commitment considering regional frequency dynamic differences and whole frequency response process [J/OL]. Proceedings of the CSEE; 1-16[2024-08-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107-tm.20240124.1802.009.html>.

[30] TROVATO V, BIALECKI A, DALLAGI A. Unit commitment with inertia-dependent and multispeed allocation of frequency response services[J]. *IEEE Transactions on Power*

*Systems*, 2019, 34(2): 1537-1548.

作者简介:



黄慧

黄慧(1984),女,硕士,高级工程师,从事电力系统安全稳定分析与控制(E-mail: [huanghui3@sgepri.sgcc.com.cn](mailto:huanghui3@sgepri.sgcc.com.cn));

丁浩寅(1986),男,硕士,高级工程师,从事电力系统安全稳定分析与控制;

郗朝辉(1985),男,硕士,高级工程师,从事电力系统安全稳定分析与控制。

## Unit combination model considering the grid-forming control parameters of new energy station

HUANG Hui<sup>1</sup>, DING Haoyin<sup>2</sup>, QIE Zhaohui<sup>1</sup>, CHANG Haijun<sup>1</sup>, HUANG Zhiguang<sup>2</sup>, LYU Rui<sup>1</sup>

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

2. East Branch of State Grid Corporation of China, Shanghai 200120, China)

**Abstract:** In order to take advantage of the flexible adjustment ability with new energy in unit combination and make up for the lack of system inertia caused by new energy access, a unit combination model is constructed in this paper, which takes the inertia support and primary frequency regulation capabilities of grid-forming new energy. The model incorporates dynamic frequency constraints and grid-forming control parameters, utilizing the shedding capacity stored through new energy curtailment. Then, the nonlinear mixed integer programming model is transformed into a multi-objective two-layer optimization problem for iterative solution. Thus, the optimal start-up mode of synchronous generators, the optimal reduction of new energy and the corresponding control parameters are obtained which meet the system frequency constraints. A high proportion of wind power transmission grid in Gansu province is taken as an example to verify the method. The results show that compared with the existing scheme that only considers frequency constraints and the unit combination scheme with constant grid-forming control parameters, the unit combination scheme with variable grid-forming control parameters proposed in this paper can further improve the system operation economy and new energy utilization rate under the frequency security constraints.

**Keywords:** grid-forming based new energy station; unit combination; two-layer optimization; multi-objective particle swarm optimization; frequency constraint; grid-forming control parameters

(编辑 吴昊)