

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.04.010

# 考虑风机一次调频的风电高占比电网机组组合

郭树锋<sup>1</sup>, 李威<sup>2</sup>, 胡珊珊<sup>3</sup>, 谢东亮<sup>2</sup>, 张节潭<sup>1</sup>

(1. 国网青海省电力公司, 青海 西宁 810008; 2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106; 3. 南京理工大学自动化学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:**随着风电大规模、高渗透率接入电网, 单纯常规机组一次调频已难以满足系统调频需求, 迫切需要风电参与一次调频。文中在风机调频控制研究的基础上, 提出一种考虑风机参与系统一次调频的机组组合模型。该模型通过加入稳态频率、频率最低点和频率变化率为约束条件, 确保含风电电力系统预留足够的备用容量以支撑一次调频。文中采用大 M 法将非线性模型转化为混合整数线性规划模型, 并调用 Matlab 中 CPLEX 程序包求解。最后, 在 IEEE 39 节点系统上验证了该模型的有效性。仿真结果表明, 该模型能提升系统承受负荷扰动的能力, 从而满足更大负荷扰动下系统一次调频的备用需求。

**关键词:**机组组合; 一次调频; 风力发电; 调频约束; 负荷扰动

**中图分类号:** TM734

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2020)04-0061-07

## 0 引言

据《全球风电报告: 年度市场发展》统计, 2016 年丹麦风电渗透率已达 40%<sup>[1]</sup>, 各国风电装机容量和风电渗透率也在逐年递增。风电占比持续提升会加剧系统频率的不稳定性<sup>[2-4]</sup>, 一旦电网供需失衡将导致系统频率跌落。区域电网中同步机组占比减少导致电网缺乏足够的调频能力来减缓频率跌落的速度, 易引发系统低频减载, 造成电网负荷损失甚至崩溃。在此背景下, 风电参与电网一次调频迫在眉睫, 相关课题已成为全球的研究热点。

目前应用广泛的变速风电机组一般采用最大功率点跟踪的控制方式, 转子转速和系统频率之间不存在耦合关系, 使得风电机组无法像常规同步机组一样响应电网频率变化<sup>[5-6]</sup>。但是通过附加调频控制器, 如虚拟惯性控制<sup>[7-8]</sup>、下垂控制<sup>[9-10]</sup>等, 风电机组可以提供与常规同步机组相似的频率支撑, 即当系统频率跌落时, 风电机组增加有功出力以提供频率支撑<sup>[5, 11]</sup>。针对风电机组一次调频控制的研究已取得丰硕成果, 在此基础上可在机组组合问题中进一步考虑风电调频。

已有风电并网的机组组合模型主要考虑风电与火电机组之间的功率协调分配问题, 即考虑风电机组的发电功能, 系统调频任务由常规同步机组承

担。文献[12]分析了大量风电接入时系统有功功率的确定和分配问题。文献[13]基于调速器的下垂控制特性推导出系统稳态频率偏差的表达式, 描述了同步机组参与调频的方式, 风电在机组组合模型中充当负荷, 并不承担调频任务。文献[14-15]考虑了常规同步机组预留备用以提供系统一次调频支撑的方式, 尚未考虑风电机组同时参与系统一次调频。

考虑风电参与一次调频的必然趋势, 提出风电参与系统一次调频的机组组合模型。具体地, 以频率变化率 (rate of change-of-frequency, ROCOF)、频率最低点和稳态频率为约束条件, 加入到现有机组组合优化模型中, 采用大 M 法将非线性的机组组合模型转化为混合整数线性规划 (mixed integer linear programming, MILP) 模型, 并调用 Matlab 中的 CPLEX 程序包求解。最终, 在 IEEE 39 节点系统中, 仿真验证新模型在提升系统承受负荷扰动能力方面的优越性。

## 1 风电参与一次调频的数学模型

首先, 介绍风电机组参与系统一次调频的原理; 然后, 根据风电与火电机组的一次调频控制策略, 推导风电与火电机组同时参与一次调频的数学模型, 其中风电机组模拟传统同步机组的调频方式参与一次调频。

### 1.1 风电机组的调频特性

图 1 为风电机组附加转子动能控制环节的调速器出力特性,  $\Delta P_a$  为风电机组为应对负荷突增而线性增加的有功出力量。

收稿日期: 2020-01-01; 修回日期: 2020-02-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61773214, 51977111); 国家电网有限公司科技项目“大型新能源基地送端电网调频特性分析及优化控制技术研究” (52280016-00DT)

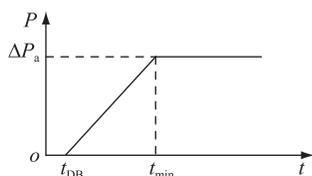


图1 风电机组调速器出力特性

Fig.1 Output characteristics of wind turbine governor

当电网负荷突增  $\Delta P_L$  时,系统频率随之下降,如图2所示。考虑到转子动能控制环节的调频死区  $\Delta f_{DB}$ ,当频率跌落小于  $\Delta f_{DB}$  时,转子动能控制环节无反馈。频率进一步下降至越过  $\Delta f_{DB}$  时,转子动能控制环节产生反馈信息,风电机组出力随时间快速线性增加,此时频率下降的速度减缓。当系统频率下降至最低点  $f_{min}$  时,风电机组出力保持不变。此后,系统频率逐步回升至新稳态频率  $f_{ss}$ 。

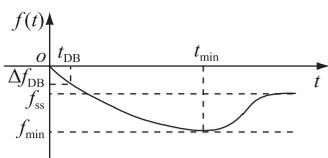


图2 系统频率响应模型

Fig.2 System frequency response model

## 1.2 风火联合一次调频的数学模型

由系统频率响应模型,可以推导出风火共同提供一次调频支撑系统中的系统最低点频率、稳态频率和频率变化率。

已知发电机转子运动方程为:

$$J \frac{d\omega}{dt} = \Delta T = T_m - T_e \quad (1)$$

式中: $J$  为转动惯量; $\omega$  为发电机转速; $T_m$  为机械转矩; $T_e$  为电磁转矩。

当发电机极对数为2,考虑负荷阻尼影响,发电机转子运动方程为:

$$\frac{2HP}{f_0} \frac{df}{dt} = P_m - P_e - \Delta P_D \quad (2)$$

式中: $H$  为发电机组惯性时间常数; $P$  为发电机有功出力;基频  $f_0 = 50$  Hz; $P_m$  为机械功率; $P_e$  为电磁功率; $\Delta P_D$  为频率变化  $\Delta f$  引起的负荷变化,  $\Delta P_D = k_D \Delta f$ ,  $k_D$  取值与负荷阻尼率  $D$ 、负荷等级  $L_f$  有关,  $D = 0.01$ 。

令惯量  $H^* = HP/f_0$ ,由于火电机组与风电机组共同提供一次调频支撑,则  $H^*$  为:

$$H^* = \frac{\sum_{i=1}^N H_i p_{i,max} u_{i,t} + \sum_{w=1}^W H_w W_{f,t}}{f_0} \quad (3)$$

式中: $H_i$ ,  $H_w$  分别为火电机组  $i$  和风电机组  $w$  的时

间常数; $N$  为火电机组总数; $W$  为风电机组总数; $u_{i,t}$  为第  $t$  时段机组  $i$  的开关机状态,  $u_{i,t} = 1$  表示机组处于开机状态,  $u_{i,t} = 0$  表示机组处于关机状态; $p_{i,max}$  为火电机组  $i$  有功出力最大值; $W_{f,t}$  为风电功率预测值。

(1) 最低点频率。当频率下降至最低点时,对转子运动方程求积得到频率偏差为:

$$\Delta f(t) = \frac{-\Delta P_L}{k_D} [1 - e^{-k_D t / (2H^*)}] \quad (4)$$

式中: $\Delta P_L$  为突增负荷扰动。

对式(4)求导,并令求导结果为0,得到:

$$|\Delta f_{max}| = \frac{\Delta P_L}{k_D} + \frac{2H^* \Delta P_a}{T_d k_D^2} \ln \frac{2H^* \Delta P_a}{2H^* \Delta P_a + T_d (k_D \Delta P_L - k_D^2 \Delta f_{DB})} \quad (5)$$

式中: $\Delta f_{DB}$ ,  $T_d$  分别为截止频率和截止时间; $\Delta P_a$  为系统一次调频总响应。

从而得到最低点频率为:

$$f_{min} = |f_0 - \Delta f_{max}| \quad (6)$$

(2) 稳态频率。系统进入新稳态后,  $df/dt = 0$ , 负荷扰动仍为  $\Delta P_L$ , 调频响应保持在  $\Delta P_a$ , 代入转子运动方程可得:

$$|\Delta f_{ss}| = \frac{\Delta P_L - \Delta P_a}{k_D} \quad (7)$$

(3) 频率变化率。同样根据转子运动方程,由于在初始极短时间内,频率变化量  $\Delta f$  近似为0,此时调频响应  $\Delta P_a$  可忽略,且  $df/dt$  是整个调频过程中的最大值,求得频率变化率为:

$$\left| \frac{d\Delta f}{dt} \right| = \frac{\Delta P_L}{2H^*} \quad (8)$$

频率约束中,最大频率偏差、稳态频率偏差和频率变化率均取绝对值,从而保证在满足低频约束的同时能满足高频约束,因此高频约束(负荷突增量为负的情况)可以不用体现在优化模型中。

## 2 机组组合中负荷不确定模型与备用预留

负荷具有一定的随机性与波动性,各机组调频出力随负荷变化而变化,负荷预测的不确定性影响整个系统机组出力分配的合理性,因而需对其建模。风电机组通过预留备用来提供一次调频出力,需先确定其备用容量。

### 2.1 负荷不确定模型

受用户用电时间影响,负荷存在一定的随机性与波动性,且预测准确度随预测时间增长而降低,

但考虑到负荷存在日多夜少、与季节相关的周期性,且目前短期负荷预测技术已较为成熟,因此一般认为负荷预测的准确度较高。负荷预测误差一般服从均值为0,标准偏差为 $\sigma_{L,t}$ 的正态分布。 $\sigma_{L,t}$ 取负荷预测值的2%,表示为:

$$\sigma_{L,t} = 0.02L_{f,t} \quad (9)$$

式中: $L_{f,t}$ 为负荷预测值。

## 2.2 风电备用预留方式

风电提供一次调频支撑的控制策略中,预留风电备用方式通常有2种<sup>[16-17]</sup>。一是在已有备用容量的基础上额外增加10%~30%的风电预测功率作为一次备用容量;二是用系统可靠性约束代替备用约束,保证系统备用充足。文中将风电预测功率分为风电出力与风电备用2部分,在方法一的基础上有选择地预留风电备用。

首先计算规定百分比下的风电功率 $P_{w,t}$ 用于风力发电,然后将剩余下的风电功率作为风电备用容量以提供风电一次调频出力。由于规定百分比是一系列待选择的离散值 $a_{j,t}$ ,因此引入二元变量 $M_{j,t}$ 作为选择序号,得到风电备用容量为:

$$s_{w,t} = \sum_{j=1}^D M_{j,t} a_{j,t} P_{w,t} \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^D M_{j,t} = 1 \quad (11)$$

式中: $D$ 为待选择的百分比总数。

## 3 风火联合参与一次调频的机组组合建模

传统风电参与的机组组合优化模型包括目标函数与约束条件2部分。其中,目标函数包括火电机组出力成本、开机成本、备用成本;约束函数包括系统的功率平衡约束、备用约束、网络安全约束、火电机组有功出力上下限约束、爬坡率约束和最小开停机时间约束。在已有风电参与机组组合模型的基础上,增加确保风电参与一次调频的相关约束,建立考虑风电机组参与系统一次调频的机组组合模型。基于现有研究<sup>[2,11,18]</sup>结论,认为风电机组在合理的控制下能如同步机组一样参与电网调频。

### 3.1 目标函数

随着风电渗透率提高,一方面,风电在系统中的占比增加令电网总运行成本降低;另一方面,面对相同的负荷扰动 $\Delta P_L$ ,风电渗透率越高,系统最低点频率 $f_{\min}$ 和稳态频率 $f_{ss}$ 越低,对电网稳定性的危害越大。

根据以上矛盾因素构造目标函数,在保证电网稳定性的前提下以最小化系统总发电成本为目标函数,采用Matlab中CPLEX求解机组组合问题。

频率约束可保证 $f_{\min}$ , $f_{ss}$ 和频率变化率在规定阈值之内。通过比较不同阈值下的 $f_{\min}$ , $f_{ss}$ 和频率变化率,可以反映频率约束对稳定系统频率的优势。综上,构造目标函数:

$$C_G(x) =$$

$$\min \left\{ \sum_{t=1}^T \left[ \sum_{i=1}^N (c_{i,t} u_{i,t} p_{i,t} + s_{i,t} u_{i,t} + q_{i,t} r_{i,t}) \right] \right\} \quad (12)$$

式中: $T$ 为调度时段数,取24h为一个调度周期,即 $T=24$ ,一个调度时段为1h; $c_{i,t}$ 为第 $t$ 时段火电机组 $i$ 单位运行成本; $p_{i,t}$ 为第 $t$ 时段火电机组 $i$ 出力; $s_{i,t}$ 为第 $t$ 时段火电机组 $i$ 单位开机成本; $q_{i,t}$ 为第 $t$ 时段火电机组 $i$ 单位备用成本; $r_{i,t}$ 为第 $t$ 时段火电机组 $i$ 的备用容量; $x$ 为机组组合模型约束中决策变量的集合。

### 3.2 常规约束

常规约束包括系统的功率平衡约束、备用约束、网络安全约束、火电机组有功出力上下限约束、爬坡率约束和最小开停机时间约束。其中,火电机组有功出力上下限约束、爬坡率约束和最小开停机时间约束与传统机组组合模型中的相应约束相同,此处不再赘述。

#### (1) 功率平衡约束。

$$L_{f,t} - (W_{f,t} - s_{w,t}) - \sum_{i=1}^N p_{i,t} = 0 \quad (13)$$

$$0 \leq s_{w,t} \leq W_{f,t} \quad (14)$$

由于文中基于直流潮流法计算线路潮流,因而线路损耗忽略不计。

#### (2) 火电机组备用约束。

$$r_{i,t} \leq \min(u_{i,t} p_{i,\max} - p_{i,t}, u_{i,t} r_{i,10}) \quad (15)$$

式中: $r_{i,10}$ 为10s内火电机组能够提供的最大出力。

#### (3) 网络安全约束。

$$p_{i,t,k} + (p_{w,t,k} - p_{ws,t,k}) - p_{l,t,k} = \sum_l \frac{1}{X_{kl}} (\theta_{k,t} - \theta_{l,t}) \quad (16)$$

$$-p_{kl,\max} \leq \frac{1}{X_{kl}} (\theta_{k,t} - \theta_{l,t}) \leq p_{kl,\max} \quad (17)$$

式中: $p_{kl,\max}$ 为支路 $kl$ 潮流限值, $k$ 为支路首端节点号, $l$ 为支路末端节点号; $X_{kl}$ 为支路 $kl$ 的电抗值; $\theta_{k,t}$ , $\theta_{l,t}$ 分别为支路 $kl$ 首、末端的电压相角; $p_{i,t,k}$ , $p_{w,t,k}$ , $p_{ws,t,k}$ , $p_{l,t,k}$ 分别为节点 $k$ 处火电出力、风电预测功率、风电机组预留备用及负荷预测功率值。文中基于直流潮流法构建网络安全约束。

### 3.3 MILP模型的一次调频约束

根据第1节推导的系统最低点频率、稳态频率

和频率变化率,构建机组组合约束模型。其中,系统最低点频率的非线性函数需用大 M 法进行两阶段线性化处理,处理之后得到风电机组参与一次调频新约束的 MILP 模型。

(1) 频率最低点约束。将式(5)表示为:

$$\frac{\Delta P_L}{k_D} + \frac{2H^* \Delta P_a}{T_d k_D^2} \times \ln \frac{2H^* \Delta P_a}{2H^* \Delta P_a + T_d(k_D \Delta P_L - k_D^2 \Delta f_{DB})} \leq \Delta f_{\max} \quad (18)$$

式中:  $\Delta f_{\max}$  为人为规定的频率降低的最大值。

由于  $H^*$ ,  $\Delta P_a$  均为连续变量,式(18)的非线性约束需要转化为线性约束。利用两阶段大 M 法经过 2 次引入连续、离散变量,将非线性约束转化为线性约束。令  $z = xy$ , 其中  $x$  为二元整型变量,  $y$  为连续变量,  $z$  为新增的控制变量,则约束等效为:

$$-Mx \leq z \leq Mx \quad (19)$$

$$y - M(1 - x) \leq z \leq y + M(1 - x) \quad (20)$$

式中:  $M$  为一个很大的常数。通过引入新变量将非线性约束线性化,虽然最终约束个数有所增加,但从数学上降低了约束的维度,减小了计算复杂度。经两阶段大 M 法线性化后的频率最低点约束为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{2z}{T_d k_D} \ln \frac{2z}{2z + T_d(k_D \Delta P_L - k_D^2 \Delta f_{DB})} = k_D \Delta f_{\max} - \Delta P_L \\ z \leq \frac{\sum_{i=1}^N H_i P_{i,\max} y_{i,t} + \sum_{w=1}^W W_{f,t} y_{w,n,t}}{f_0} \\ -M(1 - u_{w,n,t}) \leq y_{w,n,t} - H_{w,n} \Delta P_a \leq M(1 - u_{w,n,t}) \\ -M u_{w,n,t} \leq y_{w,n,t} \leq M u_{w,n,t} \\ \sum_{n=1}^N u_{w,n,t} = 1 \\ H_{w,t} = \sum_{n=1}^N u_{w,n,t} H_{w,n} \\ \Delta P_a - M(1 - u_{i,t}) \leq y_{i,t} \leq \Delta P_a + M(1 - u_{i,t}) \\ -M u_{i,t} \leq y_{i,t} \leq M u_{i,t} \end{array} \right. \quad (21)$$

式中:  $H_i$  为火电机组  $i$  的时间常数;  $u_{w,n,t}$  为将非线性的频率最低点约束线性化而引入的二元变量,用于选择可变的风电调速器的时间常数  $H_{w,n}$ ;  $y_{w,n,t}$ ,  $y_{i,t}$  为将非线性的频率最低点约束线性化而引入的连续变量。严格意义下,两阶段大 M 法线性化后引入 2 个常数  $M$ ,但由于其均为很大的正数,此处不做区分,取  $M = 10\ 000$ 。

(2) 稳态频率约束。将式(7)表示为:

$$\Delta P_a \geq \Delta P_L - k_D \Delta f_{\max,ss} \quad (22)$$

式中:  $\Delta f_{\max,ss}$  为规定的最大稳态频率变化量。

(3) 频率变化率约束。将式(8)表示为:

$$\sum_{w=1}^W \sum_{i=1}^N (u_{i,t} H_i P_{i,\max} + H_w W_{f,t,w}) \geq \left| \frac{\Delta P_L f_0}{2F_{\max}} \right| \quad (23)$$

式中:  $H_w$  为风电机组  $w$  的时间常数;  $F_{\max}$  为人为规定的系统最大频率变化率。

(4) 快速频率响应约束。

$$\begin{cases} 0 \leq \Delta P_{ai,t} \leq \Delta P_{ai,\max} \\ \Delta P_{ai,t} \leq r_{i,t} \end{cases} \quad (24)$$

式中:  $\Delta P_{ai,t}$  为第  $t$  时段机组  $i$  的一次调频出力;  $\Delta P_{ai,\max}$  为机组  $i$  的最大一次调频出力。

(5) 附加约束。

$$\Delta P_a = \sum_{i=1}^N \Delta P_{ai,t} + \sum_{w=1}^W \Delta P_{aw,t} \quad (25)$$

$$\Delta P_{aw,t} \leq s_{w,t} \quad (26)$$

式中:  $\Delta P_{aw,t}$  为第  $t$  时段风电机组  $w$  的一次调频出力;  $s_{w,t}$  为第  $t$  时段风电机组  $w$  的备用容量。

(6) 系统总备用约束。总备用容量为  $\sum_t r_{i,t} + s_{w,t}$ , 需同时满足约束式(14), (15), (24), (26)。

需要说明的是,机组组合模型的目标是优化电力系统的平衡点,因此该模型关注的是风电机组有功功率输出特性,并不需要具体到风电机组的控制策略。基于此,在构建机组组合模型时,并未体现风机控制,而是以约束的形式将控制策略下的风电有功出力特性应用于模型中。

## 4 仿真算例

### 4.1 仿真模型

采用图 3 的 IEEE 10 机 39 节点测试系统验证机组组合模型的合理性。系统含有 5 台常规机组(节点 30 接入平衡机组),总装机容量为 460 MW。在  $t = 0$  时,负荷取 100 MW,以系统发电成本最小为目标函数先确定常规机组初始有功出力。

由于风电不需要消耗化石燃料,忽略风电机组的出力成本和一次调频备用成本,火电机组的调频成本系数等于该火电机组的出力成本系数。原始负荷功率如图 4 所示。

### 4.2 仿真结果及分析

由最大负荷 450 MW,计算得到风电场的装机总容量约为 180 MW,接入节点为 3, 11, 17, 33, 36。令系统中风电的渗透率分别为 40%, 35%, 取不同的负荷突增量  $\Delta P_L$ , 得到仿真结果如表 1、表 2 所示。

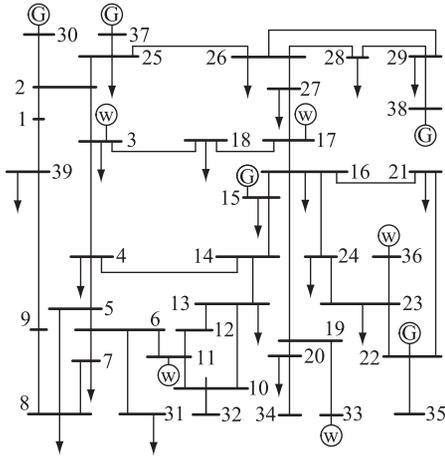


图3 IEEE 10机39节点测试系统

Fig.3 IEEE 10-machine 39-bus system

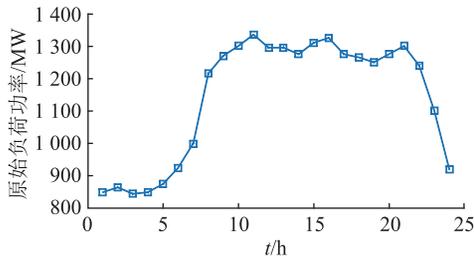


图4 原始负荷功率

Fig.4 Initial load power

表1 40%风电渗透率时2种一次调频模型的成本

$\Delta P_L$ /MW	风机参与/元	火电机组/元
30	4 876 470	4 888 490
33	4 956 370	4 948 840
36	5 000 470	4 972 610
39	5 008 980	4 984 640
42	5 011 440	4 971 000

表2 35%风电渗透率时2种一次调频模型的成本

$\Delta P_L$ /MW	风机参与/元	火电机组/元
30	5 022 620	5 059 550
35	5 112 860	5 038 660
40	5 034 580	5 080 220
45	5 113 700	5 096 540
50	5 070 870	5 097 880
60	5 083 600	

对比表1、表2可知,相同风电渗透率下,单纯火电机组调频与风电机组参与一次调频的成本并无显著差异。表2火电机组调频成本最后一项由于此时火电机组已经无法应对突发干扰,造成机组组合问题无解。当风电渗透率提高,其他条件不变时,2种模型下的系统运行总成本都有所降低。

逐步递增  $\Delta P_L$ , 通过遍历算法算出不同风电渗透率下,风电机组参与一次调频和单独火电机组调频可以应对的最大负荷扰动  $\Delta P_{L,max}$ , 如表3所示。

表3 不同风电渗透率下系统能承受的最大负荷干扰

Table 3 The maximum load interference that the system can withstand under different wind power permeability

风电渗透率/%	$\Delta P_{L,max}$ /MW	
	风火联合	火电机组
35	70.97	52.70
40	78.49	42.85

对比表3数据,将  $\Delta P_{L,max}$  作为衡量系统承受负荷扰动能力(即调频能力)的指标,提出的风机参与一次调频的调度模型与原模型相比,在不同风电渗透率下,  $\Delta P_{L,max}$  均有效增大,体现了新模型能使系统承受更大的负荷扰动。此外,系统调频能力受到风电渗透率影响。风机参与一次调频的模型中,系统调频能力随风电渗透率降低而降低;单纯火电机组提供一次调频的模型的调频能力随风电渗透率降低而增加。这是由于火电机组新增开机机组以增加出力,其备用容量增加使调频能力增强。图5为风电机组参与一次调频,每个调度时段  $f_{ss}$  和  $f_{min}$  的变化情况。

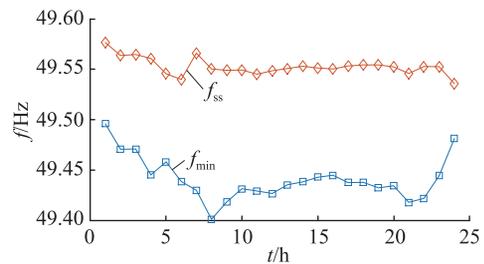


图5 风火联合调频下的频率变化

Fig.5 Frequency of combined frequency modulation between wind turbine and thermal turbine

由图5可知,  $f_{ss}$  被有效限制在不低于阈值49.5 Hz,  $f_{min}$  被有效限制在不低于阈值49.2 Hz, 均符合约束条件,进一步验证了风电机组参与一次调频机组组合模型的可靠性。对比图4、图5,可见负荷变化较大的节点处  $f_{ss}$  与  $f_{min}$  变化也较大,即系统频率受负荷变化影响。图6(a)、(b)分别为仅常规机组调频、考虑风机调频的各机组出力情况。

对比图6(a)、(b)中常规机组调频出力与风电机组调频出力,在常规机组与风电场出力近似的情况下,考虑风机调频的模型中,风电机组承担了一部分调频容量,而仅常规机组调频的模型中,完全由常规机组承担调频任务。此对比一方面体现出考虑风机调频模型在更加充分地利用风能方面

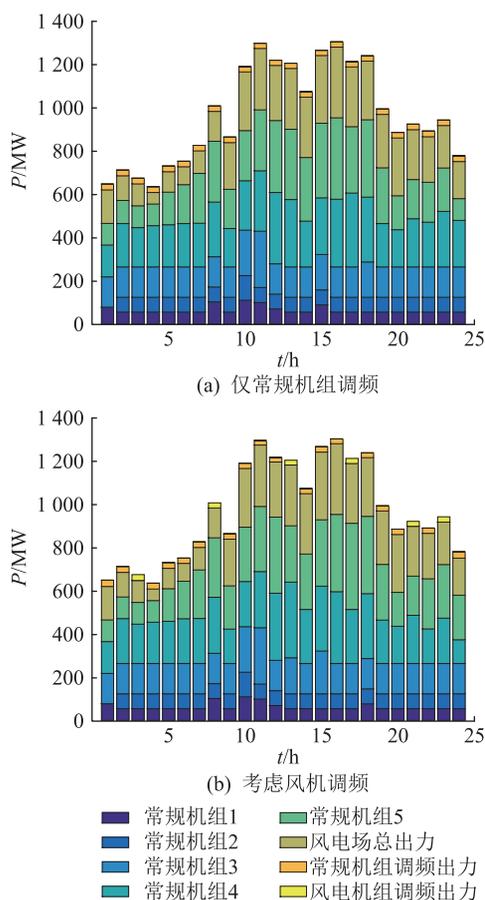


图6 仅常规机组调频和考虑风机调频的机组出力  
Fig.6 Output of only conventional units and units considering wind turbine frequency modulation

的优越性;另一方面,风电场提供调频支撑给常规机组备用留下更多裕度,间接增强了系统抗扰能力。

综上,所提考虑风机参与一次调频的调度模型与原模型相比,能有效提升系统承受负荷扰动的能力。一定范围内,风电渗透率升高时,风机参与调频的系统抗干扰能力增强,系统总运行成本降低。需要指出的是,过高的风电渗透率会造成机组组合问题无解。

### 5 结语

文中在传统机组组合模型中增加了风电参与一次调频的约束函数,提出了一种考虑风电机组参与一次调频的机组组合模型。采用大M法和CPLEX程序包对该模型求解,获得满足各项约束条件的系统运行总成本和能承受的最大负荷扰动量。仿真结果表明,与单纯火电机组承担一次调频的模型相比,风电参与一次调频的机组组合模型在成本上并无显著差异,但由于挖掘了风机的调频潜力,可有效提升系统的抗负荷扰动能力,在电网调度层面缓解了风电占比过高导致的系统一次调频容量

不足的问题。并且,在2种模型均有可行解时,风电渗透率越高,抗扰动能力的提升越明显。

需要指出的是,文中是基于风电机组具备类似同步机组调频功能这一前提所做的研究,忽略了风电自身的波动性,仅讨论负荷波动对机组组合建模的影响。后续工作中,会进一步分析风速波动可能导致的风电调频备用容量不足问题,完善风电参与调频的机组组合模型。

### 参考文献:

- [1] Global Wind Energy Council. Global wind report 2016[R]. New Delhi:Global Wind Energy Council,2017.
- [2] 唐西胜,苗福丰,齐智平,等. 风力发电的调频技术研究综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(25):4304-4314.  
TANG Xisheng, MIAO Fufeng, QI Zhiping, et al. Survey on frequency control of wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2014,34(25):4304-4314.
- [3] DELILLE G, FRANCOIS B, MALARANGE G. Dynamic frequency control support by energy storage to reduce the impact of wind and solar generation on isolated power system's inertia[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012,3(4):931-939.
- [4] KEUNG P K, LI P, BANAKAR H, et al. Kinetic energy of wind-turbine generators for system frequency support[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009,24(1):279-287.
- [5] 谷俊和,刘建平,江浩. 风电接入对系统频率影响及风电调频技术综述[J]. 现代电力,2015,32(1):46-51.  
GU Junhe, LIU Jianping, JIANG Hao. Literature review on the influence of wind power on system frequency and frequency regulation technologies of wind power[J]. Modern Electric Power, 2015,32(1):46-51.
- [6] 刘吉臻,姚琦,柳玉,等. 风火联合调度的风电场一次调频控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12):3462-3469.  
LIU Jizhen, YAO Qi, LIU Yu, et al. Wind farm primary frequency control strategy based on wind & thermal power joint control[J]. Proceedings of the CSEE, 2017,37(12):3462-3469.
- [7] 赵婷,吕志鹏,刘国宇,等. 虚拟同步机技术系列标准解读[J]. 供用电,2019,36(4):13-17,36.  
ZHAO Ting, LYU Zhipeng, LIU Guoyu, et al. Interpretation of virtual synchronous machine technology series standards[J]. Distribution & Utilization, 2019,36(4):13-17,36.
- [8] RAVANJI M H, PARNIANI M. Modified virtual inertial controller for prudential participation of DFIG-based wind turbines in power system frequency regulation[J]. IET Renewable Power Generation, 2019,13(1):155-164.
- [9] DREIDY M, MOKHLIS H, MEKHILEF S. Inertia response and frequency control techniques for renewable energy sources: a review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017,69:144-155.
- [10] ARANI M F M, MOHAMED A R I. Dynamic droop control for wind turbines participating in primary frequency regulation in

- microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2018,9(6): 5742-5751.
- [11] 付媛,王毅,张祥宇,等. 变速风电机组的惯性与一次调频特性分析及综合控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27):4706-4716.
- FU Yuan,WANG Yi,ZHANG Xiangyu,et al. Analysis and integrated control of inertia and primary frequency regulation for variable speed wind turbines[J]. Proceedings of the CSEE, 2014,34(27):4706-4716.
- [12] 张国强,吴文传,张伯明. 考虑风电接入的有功运行备用协调优化[J]. 电力系统自动化,2010,34(17):64-67.
- ZHANG Guoqiang,WU Wenchuan,ZHANG Boming. Optimization of operation reserve coordination considering wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17):64-67.
- [13] ULRICH M,AMER M,MICHAEL M,et al. Robust optimal dispatch,secondary,and primary reserve allocation for power systems with uncertain load and generation[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology,2018,6(26):475-485.
- [14] 葛晓琳,金言,夏澍,等. 面向调峰调频需求的风水火电协调优化调度[J]. 电网技术,2019,43(11):3917-3026.
- GE Xiaolin,JIN Yan,XIA Shu,et al. A coordinated optimization scheduling of wind-hydro-thermal power system based on the requirement of peak load and frequency regulation[J]. Power System Technology,2019, 43(11):3917-3026.
- [15] 叶婧,林涛,徐遐龄,等. 考虑稳态频率约束的含高渗透率风电的孤立电网机组组合[J]. 高电压技术,2018,44(4): 1311-1318.
- YE Jing,LIN Tao,XU Xialing,et al. Research on unit commitment considering steady state frequency constraints of isolated grids with high permeability wind power[J]. High Voltage Engineering,2018,44(4):1311-1318.
- [16] 隗霖捷,王德林,李芸,等. 基于可变系数的双馈风电机组与同步发电机协调调频策[J]. 电力系统自动化, 2017,41(2):94-100.
- WEI Linjie,WANG Delin,LI Yun,et al. Variable coefficient based coordinated frequency modulation strategy between DFIG-based wind turbine and synchronous generator[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(2):94-100.
- [17] 赵嘉兴,高伟,上官明霞,等. 风电参与电力系统调频综述[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(21):157-169.
- ZHAO Jiaying,GAO Wei,SHANGGUAN Mingxia,et al. Review on frequency regulation technology of power grid by wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2017,45(21):157-169.
- [18] 赵晶晶,吕雪,符杨,等. 基于双馈感应风力发电机虚拟惯量和桨距角联合控制的风光柴微电网动态频率控制[J]. 中国电机工程学报,2015,35(15):3815-3822.
- ZHAO Jingjing,LYU Xue,FU Yang,et al. Dynamic frequency control strategy of wind/photovoltaic/diesel microgrid based on DFIG virtual inertia control and pitch angle control[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(15):3815-3822.

#### 作者简介:



郭树锋

郭树锋(1984),男,硕士,工程师,从事新能源发电并网与运行控制相关工作(E-mail: guoshufeng123@126.com);

李威(1976),男,博士,研究员级高级工程师,从事电力系统安全稳定分析与控制相关工作;

胡珊珊(1995),女,硕士在读,研究方向为电网规划与经济调度。

## Unit commitment considering the primary frequency regulation of wind turbine in grids with a high proportion of wind power

GUO Shufeng<sup>1</sup>, LI Wei<sup>2</sup>, HU Shanshan<sup>3</sup>, XIE Dongliang<sup>2</sup>, ZHANG Jietan<sup>1</sup>

(1. State Grid Qinghai Electric Power Company, Xining 810008, China; 2. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China; 3. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** With large-scale and high penetration level wind integration, it is difficult to meet power grid need when only conventional units participate in primary frequency modulation, so the participation of wind power is urgently needed. Based on the research of wind power frequency modulation control, a unit commitment model considering the wind turbines participating in primary frequency modulation is proposed. By systematically adding the constraints of steady-state frequency, minimum frequency and rate of change-of-frequency, the model ensures that enough spare capacity is reserved to support primary frequency modulation. The big M method is used to transform the nonlinear model into a mixed integer linear programming model, and then the CPLEX package of Matlab is used to solve the problem. Finally, the validity of the proposed model is verified on IEEE 39-bus system. The simulation results show that the proposed model can improve the capacity of the system to withstand load disturbance, so as to meet the standby requirement of primary frequency modulation under larger load disturbance.

**Keywords:** unit commitment; primary frequency modulation; wind power; frequency constraints; load disturbance

(编辑 吴楠)