

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20222015

# 基于变速抽蓄机组的新型电力系统调频控制策略

成昕雨, 王 丹, 毛承雄

(华中科技大学强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 为解决新能源机组大规模并网引发的频率安全问题, 将变速抽蓄机组纳入新型电力系统调频控制。首先通过根轨迹方法分析了变速抽蓄机组的 AGC 调频稳定性; 然后设计机组功率指令响应性能评价方案, 衡量了变速抽蓄机组调频出力的快速性与准确性; 在此基础上, 提出基于频率变化率的有功动态优化分配策略, 并通过 Simulink 中搭建的两区域互联电力系统 LFC 模型模拟新能源出力波动, 仿真验证所提策略的有效性。结果表明, 基于频率变化率的有功动态优化分配策略可充分发挥变速抽蓄机组的调频优势, 有效防止频率发生越限、维持系统频率稳定。

**关键词:** 变速抽蓄机组; 电力系统频率; 调频控制策略; 频率变化率; 有功功率分配

**中图分类号:** TV734. 2; TM76

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)09-0189-05

新型电力系统最大频率偏差。

## 1 引言

随着新型电力系统中大量新能源机组并网运行, 系统的频率安全面临着严峻挑战<sup>[1]</sup>。自动发电控制(AGC)是电力系统调频的主要手段, 以火电、水电为主的传统调频资源受爬坡速率等因素约束, 难以快速跟随新能源出力波动对系统进行频率支撑。抽水蓄能具有调节速度快、可靠性高等特点, 在解决新型电力系统面临的频率安全问题方面具有显著优势。目前我国主流的抽蓄机组为常规定速抽蓄机组, 但其在发电工况下受水锤效应影响严重, 容易失稳; 在抽水工况下只能保持近似额定功率运行, 无法参与调频。变速抽蓄机组(ASPSU)运行特性较好, 在发电工况下有功稳定调节范围更大; 由于机组转速与功率解耦控制, ASPSU 在抽水工况下仍可调节有功<sup>[2]</sup>。现有的关于抽蓄调频的研究大多集中在对控制器及算法进行优化<sup>[3,4]</sup>, 缺乏对机组自身调节性能与作用发挥情况的关注。朱珠等<sup>[5]</sup>推导了 ASPSU 频率响应机理模型, 但仅分析了其一次调频性能。为解决新能源机组大规模并网引发的频率安全问题, 本文针对 ASPSU 的 AGC 调频稳定性进行分析, 进一步评价了 ASPSU 的机组功率指令响应性能, 并设计了基于频率变化率的有功动态优化分配策略, 旨在充分发挥 ASPSU 调频作用, 抑制

## 2 ASPSU 模型搭建及调频稳定性分析

### 2.1 ASPSU 模型

由于 ASPSU 的转速与系统频率解耦, 其参与调频需依靠频率辅助控制器, 频率偏差  $\Delta f$  经过频率辅助控制器计算得到有功控制外环设定功率, 进而改变 ASPSU 的有功出力。调频功率满足下式:

$$\Delta P_{\text{ref}} = -(K_p + K_i/s) \Delta f \quad (1)$$

式中,  $\Delta P_{\text{ref}}$  为调频功率指令改变量;  $K_p$ 、 $K_i$  分别为控制器比例系数和积分系数;  $s$  为拉普拉斯算子。

发电工况下, ASPSU 的传递函数<sup>[5]</sup>可表示为:

$$\begin{cases} G_{P1}(s) = \frac{\Delta P_{m1}}{\Delta P_{\text{ref}}} = \frac{H_p s + b_1}{2H_p s + b_1} \\ b_1 = K_{G1}(1 - T_w s)/(1 + 0.5T_w s) \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\Delta P_{m1}$  为 ASPSU 发电功率改变量;  $H_p$  为 ASPSU 的惯性时间常数;  $K_{G1}$  为调速器增益;  $T_w$  为水流惯性时间常数。

抽水工况下, ASPSU 的传递函数<sup>[5]</sup>为:

$$\begin{cases} G_{P2}(s) = \frac{\Delta P_{m2}}{\Delta P_{\text{ref}}} = \frac{-H_p s + b_2}{-2H_p s + b_2} \\ b_2 = \frac{e_\omega - T_w s(e_{q\omega} e_h - e_{qh} e_\omega)}{1 + e_{qh} T_w s} \end{cases} \quad (3)$$

收稿日期: 2022-09-27, 修回日期: 2022-11-23

作者简介: 成昕雨(2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制, E-mail: xinyucheng@hust.edu.cn

式中,  $\Delta P_{m2}$  为 ASPSU 抽水功率改变量;  $e_\omega$  为水泵水轮机力矩对转速的传递系数;  $e_h$  为力矩对水头的传递系数;  $e_{q\omega}$  为流量对转速的传递系数;  $e_{qh}$  为流量对水头的传递系数。

### 2.2 ASPSU 调频稳定性分析

电力系统频率与有功的关系<sup>[6]</sup>可用下式表示:

$$G(s) = \frac{\Delta f(s)}{\Delta P_m(s) - \Delta P_L(s)} = \frac{1}{Ms + D} \quad (4)$$

式中,  $\Delta P_m$  为 ASPSU 出力变化量;  $\Delta P_L$  为负荷功率扰动;  $M$  为系统惯性时间常数;  $D$  为负荷阻尼系数。

AGC 调频框图见图 1, 朱珠等<sup>[5]</sup>分析了频率下垂系数 ( $1/R$ ) 对 ASPSU 调频稳定性的影响, 在此基础上选取典型  $R$  值, 进一步分析二次积分控制环的增益  $K_i$  对调频稳定性的影响。

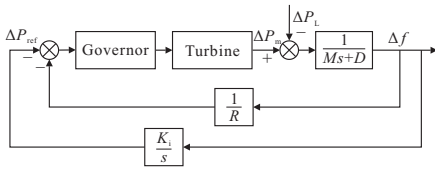


图 1 ASPSU 的 AGC 调频框图

Fig. 1 Block diagram of AGC frequency regulation of ASPSU

#### 2.2.1 ASPSU 发电工况

以负荷变化作为输入, 频率偏差作为输出, 发电工况下 ASPSU 参与 AGC 调频的闭环传递函数为:

$$\frac{\Delta f(s)}{-\Delta P_L(s)} = \frac{1}{(Ms + D) + G_{P1}(1/R + K_{i1}/s)} \quad (5)$$

特征方程为:

$$\begin{cases} Rs(Ms + D) + G_{P1}(s + K_{i1}R) = 0 \\ K_{i1}RG_{P1}/[Rs(Ms + D) + G_{P1}s] = -1 \end{cases} \quad (6)$$

将  $K_{i1}$  视为开环增益, 则对应的等效开环传递函数可表示为:

$$G_{open1} = \frac{K_{i1}RH_{P1} + K_{i1}Rb_1}{2MRH_{P1}s^3 + (MRb_1 + 2DRH_P + H_P)s^2 + (DRb_1 + b_1)s} \quad (7)$$

依据式(7)画出根轨迹, 见图 2(a)。

#### 2.2.2 ASPSU 抽水工况

同理, 抽水工况下 ASPSU 关于  $K_{i2}$  的等效开环传递函数为:

$$G_{open2} = \frac{-K_{i2}RH_{P2} + K_{i2}Rb_2}{-2MRH_{P2}s^3 + (MRb_2 - 2DRH_P - H_P)s^2 + (DRb_2 + b_2)s} \quad (8)$$

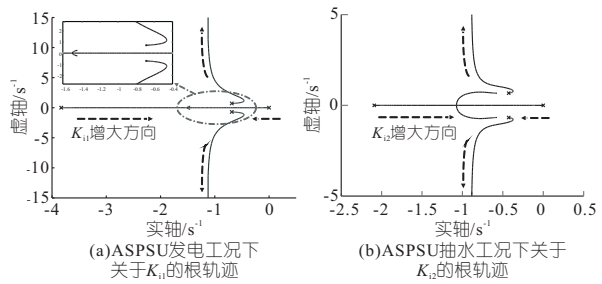


图 2 ASPSU 关于 AGC 系统控制器积分系数的根轨迹  
Fig. 2 Root locus of AGC frequency regulation of ASPSU with respect to  $K_i$

AGC 调频系统关于  $K_{i2}$  的根轨迹见图 2 (b)。由图 2 可知, 在发电、抽水工况下, ASPSU 参与 AGC 调频时, 随积分增益系数增大根轨迹一直处于虚轴左侧, 调频系统稳定, 频率偏差可快速得到调节。在新型电力系统中, 有效发挥 ASPSU 的频率调节作用可更好地维持系统安全稳定运行。

## 3 基于频率变化率的有功动态优化分配策略

### 3.1 两区域互联系统负荷频率控制模型

构建两区域互联电力系统, 区域 1 内含有火电厂、抽蓄电站(含定速抽蓄机组和 ASPSU)、风电场, 区域 2 内含有水电厂、抽蓄电站、风电场、光伏电站。其中区域 1 内各发电资源的容量为火电 460 MW, 定速抽蓄 300 MW, 变速抽蓄 200 MW, 风电 600 MW; 区域 2 内发电资源的容量为水电 600 MW, 变速抽蓄 300 MW, 风电 680 MW, 光伏 100 MW。两区域的基准容量均取 1 000 MW。

在 Matlab/Simulink 中搭建互联电力系统的负荷频率控制(LFC)模型。模型中考虑各机组调速死区、发电速率约束(GRC)等非线性环节<sup>[5,6]</sup>。

### 3.2 机组功率指令响应性能评价

在满足调频系统稳定的前提下, 机组出力的快速性与准确性决定了频率调节效果。本文设计了机组功率指令响应性能评价方案用以衡量各机组的调频性能。假设区域内有  $N$  台机组, 在同一功率指令下, 测量以下三个指标: ①机组出力达到 90% 功率指令所需要的时间  $t_i$ :

$$t_i = t_{90\%} - t_{act} \quad (9)$$

②机组出力变化量与功率指令比  $P_i$ :

$$P_i = (P_{max} - P_{min})/P_{step} \quad (10)$$

③60 s 内时间乘有功出力绝对误差积分  $P_{ITAEi}$ :

$$P_{ITAEi} = \int_0^{60} |P_m - P_{step}| t dt \quad (11)$$

得到各机组的数据后, 利用熵权法计算  $t_i$ 、

$P_i$ 、 $P_{ITAEi}$  三项指标的权重并对各机组的功率指令响应性能进行排序。响应性能为  $G_N > G_{N-1} > \dots > G_1, N \geq 2$ 。

对区域 1, 在  $\Delta P_{ref} = 0.2$  的指令下, 得到火电机组、定速抽蓄机组和 ASPSU 的功率响应数据见表 1。利用熵权法求得  $t_i$ 、 $P_i$ 、 $P_{ITAEi}$  的权重分别为 0.368、0.299、0.333。经计算, ASPSU 的功率响应性能最好, 其次是定速抽蓄机组, 火电机组较差。对区域 2, 与上述过程类似, 计算得到 ASPSU 响应性能优于水电机组。

表 1 机组功率指令响应数据

Tab. 1 Unit power command response data

机组	$t_i$	$P_i$	$P_{ITAEi}$
火电机组	105.8	1.00	256.9
定速抽蓄	66.9	1.01	126.4
变速抽蓄	5.5	1.00	4.736

### 3.3 基于频率变化率的动态功率分配策略设计

#### 3.3.1 调频控制策略设计

目前 AGC 调频的有功分配方式大多为调度中心依据各机组的容量按比例分配或依据耗量等微增率准则进行经济分配。分配系数在功率扰动前确定, 发生功率扰动时各机组只能按照固定分配进行有功调节, 限制了调频的灵活性<sup>[7]</sup>。此外, 比例分配、经济分配等策略忽略了机组间频率调节性能的差异, 不能充分发挥 ASPSU 等优势机组的频率支撑能力。本文针对大量新能源并网背景下, 由于功率急剧波动引起的频率越限情况, 提出了基于频率变化率的有功动态优化分配策略。

控制策略为当频率处于稳态时, 按可调容量和经济运行分配各机组出力; 在频率波动过程中, 增大 ASPSU 等调节性能较好的机组出力比例, 减小调节性能相对差一些的机组出力比例。

$$M d\Delta f / dt + D \Delta f = \Delta P_m - \Delta P_L \quad (12)$$

由式(12)可知, 在扰动初期, 系统的频率偏差很小, 频率变化率较大, 在变化过程中, 频率变化率对系统的频率调节起主导作用, 直接影响频率最高最低点。因此, 可将频率波动时功率分配系数设置为与频率变化率相关的变量。

考虑到系统频率偏差有正负, 本策略均取频率偏差绝对值, 即频率变化率为  $d|\Delta f|/dt$ 。当  $d|\Delta f|/dt < \lambda_1$  时, 功率按提前确定好的基准功率分配系数进行分配; 当  $\lambda_1 \leq d|\Delta f|/dt \leq \lambda_2$  时, 在基准功率分配系数中增加与频率变化率成比例的变量  $k d|\Delta f|/dt$ ; 当  $d|\Delta f|/dt > \lambda_2$  时, 变量为  $k\lambda_2$ 。理论上讲  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  值越小, 控制效果越

好, 由于目前电力系统中还未对频率变化率做出明确限定, 针对搭建的两区域互联系统取  $\lambda_1 = 0.02 \text{ Hz/s}$ 、 $\lambda_2 = 0.1 \text{ Hz/s}$ 。

完整的控制策略包含两个步骤。

**步骤 1** 考虑备用容量和经济成本计算基准功率分配系数。依据各机组的备用容量和机组出力的成本计算基准功率分配系数  $a_1, a_2, \dots, a_{N-1}, a_N$ ,  $\sum_{i=1}^N a_i = 1$ ; 当系统频率稳定或波动较小时, 有功功率按此分配系数进行分配。

**步骤 2** 基于频率变化率的可变分配系数。当系统内功率急剧波动时, 需增大 ASPSU 等调节性能较好的机组出力比例, 尽快将功率调节平衡。调节过程中需要注意, 对于出力比例减小的机组, 不能将机组的出力比例调为负, 设计系数时留有 20% 的裕度。若  $N = 2n, i \in [1, n]$ :

$$\Delta a_i = -\Delta a_{2n+1-i} = \begin{cases} 0 & \frac{d|\Delta f|}{dt} < \lambda_1 \\ -\frac{0.8a_i}{i\lambda_2} \frac{d|\Delta f|}{dt} & \lambda_1 \leq \frac{d|\Delta f|}{dt} \leq \lambda_2 \\ -\frac{0.8a_i}{i} & \frac{d|\Delta f|}{dt} > \lambda_2 \end{cases} \quad (13)$$

若  $N = 2n + 1, i \in [1, n]$ :

$$\Delta a_i = -\Delta a_{2n+2-i} = \begin{cases} 0 & \frac{d|\Delta f|}{dt} < \lambda_1 \\ -\frac{0.8a_i}{i\lambda_2} \frac{d|\Delta f|}{dt} & \lambda_1 \leq \frac{d|\Delta f|}{dt} \leq \lambda_2 \\ -\frac{0.8a_i}{i} & \frac{d|\Delta f|}{dt} > \lambda_2 \end{cases} \quad (14)$$

综上所述, 基于频率变化率的 AGC 调频功率分配系数为  $b_1 = a_1 + \Delta a_1, \dots, b_N = a_N + \Delta a_N$ ,  $\sum_{i=1}^N b_i = 1$ 。控制策略流程见图 3。

#### 3.3.2 两区域互联系统功率分配系数设置

依据分析, 设计两区域内各机组的功率分配系数见表 2。需要注意, 抽蓄机组处于抽水工况时, 定速抽蓄不能参与调频。

## 4 仿真实验

#### 4.1 ASPSU 的频率支撑能力验证

在新型电力系统面临较大功率扰动时, 验证 ASPSU 对系统频率的支撑能力。

(1) ASPSU 处于发电工况。仿真设定  $t = 10 \text{ s}$  时, 风电机组出力减少了 0.12 pu, 频率变化见

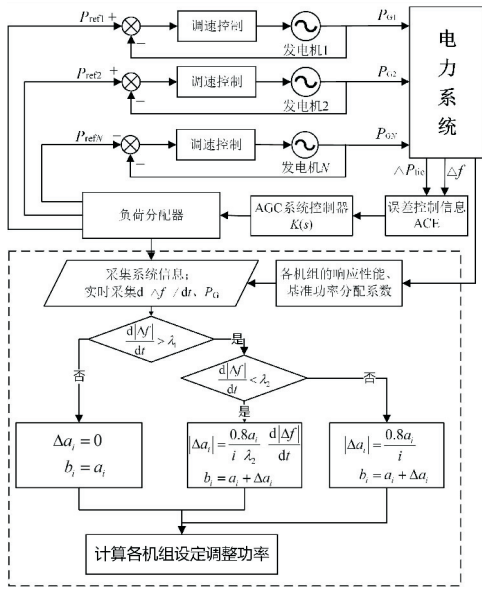


图3 调频控制策略流程图

Fig. 3 Flow chart of frequency regulation control strategy

表2 区域1和区域2功率分配系数

Tab. 2 Unit power allocation coefficients in areas 1 and 2

区域	系数类型	机组	分配系数	分配系数
			(ASPSU 发电)	(ASPSU 抽水)
区域1	基准	火电	0.40	0.7
		ASPSU	0.30	0.3
		定速抽蓄	0.30	0
区域1	可变	比例系数 $k$	3.20	5.6
		基准	ASPSU	0.65
区域2	基准	水电机组	0.35	0
		可变	比例系数 $k$	5.20

图4(a)。当ASPSU参与调频后,区域1频率偏差最低点由 $-0.673\text{ Hz}$ 提升到了 $-0.16\text{ Hz}$ ,频率偏差最高点由 $0.17\text{ Hz}$ 变为 $0.018\text{ Hz}$ ,有效防止了频率越限;与此同时,区域2的频率偏差也明显减小。联络线最大功率由 $0.03\text{ pu}$ 降为 $0.0026\text{ pu}$ ,削弱了扰动对区域2造成的影响。此外,ASPSU使得频率调节速度加快,在扰动发生后 $20\text{ s}$ 内频率偏差和联络线功率偏差均能快速恢复为 $0$ 。

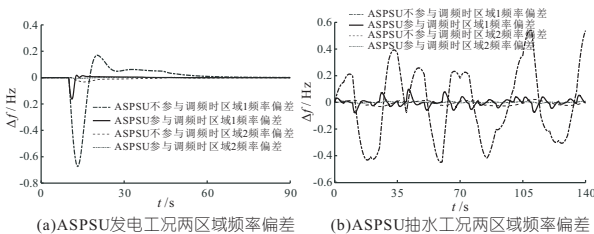


图4 有无ASPSU参与调频对比

Fig. 4 Comparison of whether ASPSU participates in frequency regulation

(2)ASPSU处于抽水工况。仿真设定区域1内由于风速变化导致风电机组出力产生波动,以功率随机扰动来模拟此波动。频率变化见图

4(b),在功率频繁扰动下,仅由火电机组调频难以跟踪负荷变化,系统频率会产生较大振荡;定义 $[0, t_1]$ 内时间乘频率绝对误差积分为 $F_{ITAE} = \int_0^{t_1} t |f - f_N| dt$ ,ASPSU参与调频后,140 s内区域1的 $F_{ITAE}$ 由2371减小为208,系统稳定性增强,区域2的 $F_{ITAE}$ 和联络线功率也明显减小。

综上可知,无论是发电或抽水工况下,ASPSU对系统内功率的急剧变化能迅速反应,可快速削弱区域内频率偏差和联络线交换功率波动对其他区域产生的影响,提高频率稳定性。

### 4.2 基于频率变化率的有功动态优化分配策略有效性验证

对比本文所提策略与传统的固定比例分配控制策略,验证所提有功动态分配策略对抑制频率最大偏差的有效性。

(1)ASPSU处于抽水工况。 $t=10\text{ s}$ 时,区域1内功率增加了 $0.15\text{ pu}$ ,仿真结果见图5。由图5(a)、(b)可知,当采用可变分配系数时,区域1频率偏差最低点为 $-0.147\text{ Hz}$ ,比采用固定分配系数提升了 $27.58\%$ ,频率超调为 $0.014\text{ Hz}$ ,比采用固定分配系数减少了 $53.33\%$ ;出现功率扰动时,主要是由ASPSU迅速调整出力进行频率支撑,频率恢复稳定后火电机组和ASPSU出力仍按基准分配系数 $7:3$ 分配。由图5(c)、(d)可知,该扰动对区域2影响较小,但采用本文提出的控制策略后,系统稳定性仍略微增强。

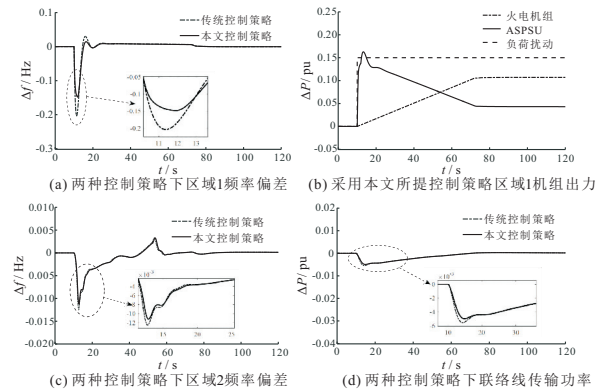


图5 区域1发生功率扰动两种控制策略对比

Fig. 5 Comparison of two control strategies in the case of power disturbance in area 1

(2)参照文献[8]选取典型风、光、负荷出力曲线,设定区域2内风电场、光伏电站在 $90\text{ s}$ 内出力波动 $\Delta P_{PV}$ 、 $\Delta P_{Wind}$ 和该段时间内的负荷变动 $\Delta P_{Load}$ 见图6(a),将其叠加为功率扰动。图6(b)展示了水轮机和ASPSU的出力情况,可看到ASPSU的反应速度更迅速,能够跟随负荷波动迅速调整有功。由图6(c)、(d)可知,采用本文提

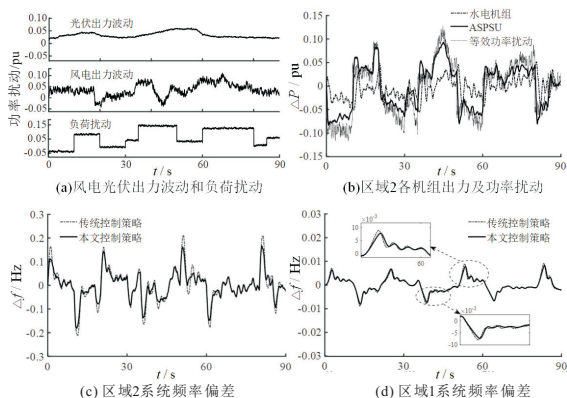


图 6 区域 2 发生功率扰动两种控制策略对比

Fig. 6 Comparison of two control strategies in the case of power disturbance in area 2

出的控制策略后,频率偏差最高最低点均得到了抑制,尤其在 50~55 s 时段内,抑制效果接近 50%;90 s 内区域 2 的  $F_{ITAE}$  由 182.7 减小到了 156.9,区域 1 的  $F_{ITAE}$  也略微减小,系统更加稳定。

对比了两种功率分配策略,证明本文所提控制策略的优越性。在新型电力系统背景下,采用基于频率变化率的有功动态优化分配策略可更好地发挥 ASPSU 的频率支撑作用,防止发生频率越限,维持系统频率稳定。

### 4.3 不同新能源渗透率下调频控制策略适用性验证

在新能源占比不断提高情况下,仿真验证本文所提控制策略随着功率扰动增大,作用效果更显著。设定  $t = 10$  s 时,区域 2 风电机组出力减小了 30%,在风电渗透率为 20%~50% 情况下进行仿真,见图 7。区域 2 内频率波动相关数据见表 3,  $\Delta F_M$  为最大频率偏差。

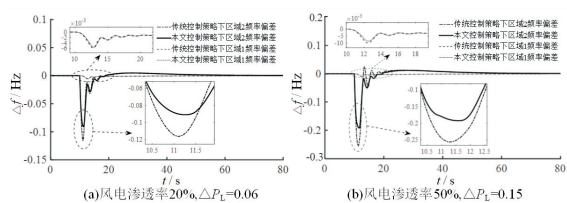


图 7 不同风电渗透率下两区域频率偏差

Fig. 7 Frequency deviation of two areas under different wind power permeability

表 3 不同风电渗透率下区域 2 数据

Tab. 3 Relevant data of area 2 under different wind power permeability

风电渗透率/%	$\Delta F_M$			$F_{ITAE}$		
	固定 /Hz	可变 /Hz	改善情况/%	固定 $/(Hz \cdot s^2)$	可变 $/(Hz \cdot s^2)$	改善情况/%
20	-0.116	-0.093	19.82	7.54	7.49	0.66
30	-0.164	-0.130	20.73	11.15	10.95	1.79
40	-0.210	-0.166	20.95	15.02	14.70	2.13
50	-0.256	-0.199	22.27	19.22	18.33	4.63

由图 7、表 3 可知,当系统功率扰动不超过 0.15 pu 时,本文提出的控制策略可将区域 2 频率偏差控制在  $\pm 0.5$  Hz 以内,且随风电渗透率的增加,对最大偏差抑制作用更明显,由此可验证基于频率变化率的可变功率分配策略可较好地适应高比例新能源电力系统。

## 5 结论

a. 本文通过分析和仿真,验证了 ASPSU 具有良好的调频稳定性和优越的功率指令响应性能,在发生负荷波动时,ASPSU 能够迅速调整出力对新型电力系统进行频率支撑。

b. 本文所提基于频率变化率的有功动态优化分配策略可在系统面临急剧功率扰动情况下,有效发挥 ASPSU 的调频优势,抑制频率最大偏差,对保障新型电力系统的安全稳定运行具有重要意义。

### 参考文献:

- [1] 张子扬,张宁,杜尔顺,等. 双高电力系统频率安全问题评述及其应对措施[J]. 中国电机工程学报, 2022,42(1):1-25.
- [2] ZHU Z, PAN W X, LIU T C, et al. Dynamic modeling and eigen analysis of adjustable-speed pumped storage unit in pumping mode under power regulation[J]. IEEE Access, 2021, 9: 155035-155047.
- [3] 邵泰衡,麻常辉,马欢,等. 基于改进飞蛾优化算法的水火互联网负荷频率控制[J]. 水电能源科学, 2020,38(8):197-201,196.
- [4] 杨一凡,项雷军,郭新华,等. 含抽水蓄能电站的互联网负荷频率自抗扰优化控制研究[J]. 电网技术, 2021,45(1):276-283.
- [5] 朱珠,潘文霞,刘铜锤,等. 变速抽蓄机组频率响应机理模型与性能研究[J/OL]. 电网技术, 1-12[2022-09-27]. DOI: 10. 13335/j. 1000-3673. pst. 2022. 0635.
- [6] ZHENG Y, ZHOU J Z, XU Y H, et al. A distributed model predictive control based load frequency control scheme for multi-area interconnected power system using discrete-time Laguerre functions[J]. ISA transactions, 2017, 68:127-140.
- [7] 杜鸣. 火电机灵活运行下的负荷频率控制优化研究[D]. 北京:华北电力大学,2021.
- [8] KHOOBAN M, NIKNAM T, BLAABJERG F, et al. A robust adaptive load frequency control for micro-grids[J]. ISA transactions, 2016, 65: 220-229.

