

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220815

## 考虑风-储-直参与调频的电力系统频率特征定量分析

周霞<sup>1</sup>, 刘懿诗<sup>2</sup>, 戴剑丰<sup>2</sup>, 张腾飞<sup>2</sup>

(1. 南京邮电大学先进技术研究院, 江苏 南京 210023; 2. 南京邮电大学自动化学院、  
人工智能学院, 江苏 南京 210023)

**摘要:** 以风电、储能、柔性直流输电为代表的高比例可再生能源和大量电力电子设备的并网, 使得电网中传统火电的比例下降, 这将在一定程度上影响电力系统的频率稳定性。为定量分析风电、储能、柔性直流输电系统参与调频下电力系统的频率特征, 首先提出多种调频资源参与调频下的电网频率特征定量分析总体思路, 建立风-储-直调频频率响应模型。然后基于频率特性传递函数对电力系统稳态频率偏差、初始频率变化率、最大频率偏差和频率安全裕度进行理论推导; 且定量分析了稳态频率偏差变化规律以及惯性时间常数、辅助调频单元控制比例系数对频率稳定性的影响, 并计算稳态频率偏差与功率扰动的关系。最后, 基于仿真软件验证了所提分析方法的可行性和有效性。仿真表明所提方法可有效定量分析电力系统频率特征, 可为双高电力系统下电网频率安全稳定运行与控制提供指导依据。

**关键词:** 双高电力系统; 频率响应模型; 风-储-直调频; 频率特征定量分析

### Quantitative analysis of power system frequency characteristics considering wind power-energy storage-flexible HVDC transmission participation in frequency modulation

ZHOU Xia<sup>1</sup>, LIU Yishi<sup>2</sup>, DAI Jianfeng<sup>2</sup>, ZHANG Tengfei<sup>2</sup>

(1. Institute of Advanced Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;

2. College of Automation & College of Artificial Intelligence, Nanjing University of

Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** The integration of a high proportion of renewable energy and a large number of pieces of power electronic equipment represented by wind power, energy storage, and VSC-HVDC transmission has reduced the proportion of traditional thermal power in the grid. This will affect the frequency stability of the power system. In order to quantitatively analyze the frequency characteristics of the power system under the joint frequency modulation of wind power, energy storage, and VSC-HVDC systems, this paper first proposes the overall idea of quantitative analysis of the grid frequency characteristics in these circumstances and establishes a wind power-energy storage-flexible HVDC transmission joint frequency modulation frequency response model. Second, based on a frequency characteristic transfer function, this paper theoretically deduces the steady-state frequency error, the initial frequency change rate, the maximum frequency deviation and the frequency safety margin of the power system. Then it quantitatively analyzes the variation law of steady-state frequency error and the influence of the inertia time constant and auxiliary frequency modulation unit control proportional coefficient on frequency stability, and calculates the relationship between steady-state frequency error and power disturbance. Finally, the feasibility and effectiveness of the analysis method proposed are verified by simulation software. The simulation shows that the method proposed can effectively and quantitatively analyze the frequency characteristics of the power system, and can provide guidance for the safe and stable operation and control of the frequency of the power grid for a power system with a large amount of renewables and number of power electronics.

This work is supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China (No. 61933005).

**Key words:** power system with high penetration of renewables and inverters; frequency response model; wind power-energy storage-flexible HVDC combined frequency modulation; quantitative analysis of frequency characteristics

**基金项目:** 国家自然科学基金重点资助(61933005); 国家自然科学基金项目资助(62073173, 61833011); 江苏省自然科学基金项目资助(BK20191376)

## 0 引言

近年来,随着能源结构的低碳化转型<sup>[1]</sup>,高比例新能源、高比例电力电子设备接入成为了现代电力系统的显著特征<sup>[2]</sup>。在电源侧,以风电为代表的可再生能源大部分通过电力电子接口实现并网,使得大量同步发电机被电力电子设备所取代<sup>[3]</sup>;在输电侧,20世纪末兴起的柔性直流输电等输电技术推动了电力电子设备在输电网络中的占比不断提高<sup>[4]</sup>;在负荷侧,以新能源汽车为代表的新型负荷也大多采用电力电子接口<sup>[5]</sup>。源-网-荷多层次物理架构的发展使得现代电力系统呈现出电力电子化的发展趋势。

然而,不同区域电网电力电子接口的并入使得在频率动态过程中,各节点调频特性的异质化更加明显,恶化了电力系统的频率特性。在双高电力系统中,电网源侧新能源的快速波动性弱化了电力系统的瞬时功率稳定性。同时由于风电对频率波动的敏感性极易出现脱网事故,造成大功率缺额,从而带来频率骤降问题<sup>[6]</sup>。另一方面,与传统机械接口的物理结构不同,采用电力电子接口使源侧输入机械功率与网侧输出电磁功率解耦,且源侧有功功率与系统频率解耦。电力电子的解耦特性使得电网缺乏传统发电惯量<sup>[7-8]</sup>,极大地削弱了电网的频率支撑能力。

电力系统的频率运行特性直接影响电能质量、安全性和稳定性。因此,针对双高电力系统电力电子化趋势下的惯量降低及频率支撑能力弱化问题,进一步分析电力系统频率响应特性并提出调频设备的合理配置策略,需建立含多类型调频资源的双高电力系统频率响应模型,在此基础上实现系统的频率态势预测。

一方面,电力系统动态频率响应分析模型主要有全时域仿真模型<sup>[9]</sup>、人工智能频率响应估算模型<sup>[10]</sup>、平均系统频率模型(ASF)<sup>[11]</sup>和系统频率响应模型(SFR)<sup>[12]</sup>。相较于前3种模型,在确保分析精度的前提下,SFR模型的扩展能力更强。尽管低阶的经典SFR模型无法表征其他类型机组的调频特性,但其为双高电力系统下多资源调频提供了模型基础。因此,国内外学者针对不同的调频策略,基于SFR改进模型对电力电子化趋势下的电力系统频率态势进行预测<sup>[13-16]</sup>。

另一方面,尽管大规模电力电子型电源并网为双高电力系统调频提供了灵活的控制手段<sup>[17-18]</sup>,但是计及电力电子型电源虚拟惯量参与联合调频的电力系统频率态势预测研究目前较为匮乏。因此,在

双高电力系统调频资源多元化的趋势下,如何分析及多资源参与调频的双高电力系统频率特性成为研究热点。文献[19]考虑了风电、储能调频资源,利用经典SFR模型建立风储联合调频策略下的频率响应模型,并基于该模型定量分析了系统频率特征以及储能配置。该研究考虑到储能参与调频快速响应的优点,通过一阶简化模型建立储能单元的频率响应特性模型。然而,该研究只适用于区域电网的频率特性分析。针对电网远距离调度,该策略缺乏对网侧高压直流输电并网影响的思考。文献[20]分析了超高压直流输电参与频率支撑的机理,并定量计算了送端系统频率偏差、最大频率偏差时间等频率特征。该研究利用根迹法分析了频率响应控制参数对送端频率稳定的影响,通过仿真验证了超高压直流输电参与调频为电力系统提供了惯量支撑。同样,随着柔性直流输电技术的成熟发展,文献[21]将电网侧柔性直流输电逆变站模拟为同步发电机,为受端交流系统提供虚拟惯量。该研究提出了一种柔性直流输电虚拟惯量控制策略,通过所建立的频率响应模型,求出最大频率偏差并给出暂态频率调整策略。

然而,文献[19-21]的研究重点在于利用频率态势预测的结果验证多资源参与调频的可行性,缺少电力系统内部调频控制参数对频率特性影响机理的量化分析。与上述文献不同,文献[22]考虑储能参与电力系统调频,基于频率响应传递函数量化分析了功率变化扰动下的系统稳态和动态性能。该研究首先计算电力系统时域特性表达式,并针对惯性时间常数、调频容量系数等系统内部调频控制系数进行量化分析。然而,该研究无法表征整个电网内电力电子型电源参与调频的等值频率响应模型。针对此,文献[23]基于聚合简化模型,建立新能源高渗透率电力系统的频率模型和传递函数,并引入新能源发电比重系数,通过对动态特性及稳态特性下的频率特征进行量化计算与分析,并比较两种新能源参与调频方式下的频率特征,得到不同调频控制参数配置下的最佳运行方式。然而,上述文献尽管分析了控制参数的影响,但没有考虑到双高电力系统源网储调频资源配置的多元化,且对调频单元运行控制机理的量化解析较弱,难以准确预测多资源参与调频下双高电力系统的频率态势。

针对上述不足,本文考虑传统火电、风电、储能、柔直参与电力系统调频。基于模型分析法不仅定量分析多资源参与调频下电力系统频率特征以及相关控制参数与频率特征的动态数量关系,且利用稳态频率响应系数表征该调频策略下的稳态频率特

性指标。最后通过 Matlab/Simulink 电磁暂态仿真平台对本文所提频率特征定量分析方法进行时域验证, 并利用 PSD-BPA 软件证明本文所提多资源联合调频策略的有效性。

### 1 风-储-直参与调频下电力系统频率特征分析总体思路

传统的时域仿真分析法依靠复杂的电磁暂态模型对系统进行仿真分析, 而针对多资源参与调频下

的电力系统频率态势预测需要对频率特征进行量化分析, 因此单一的时域仿真分析无法满足量化分析需求。而模型分析法普遍采用惯性中心理论, 将系统惯量集中于等效惯量中心, 且简化为单节点系统。由于模型分析法重点关注影响频率动态特性的主要参数, 可以给出频率特性与参数的解析关系, 因此具有较强的解释能力和泛化能力。针对上述分析, 本文提出基于模型分析法的频率特征计算方法, 频率特征分析总体思路如图 1 所示。

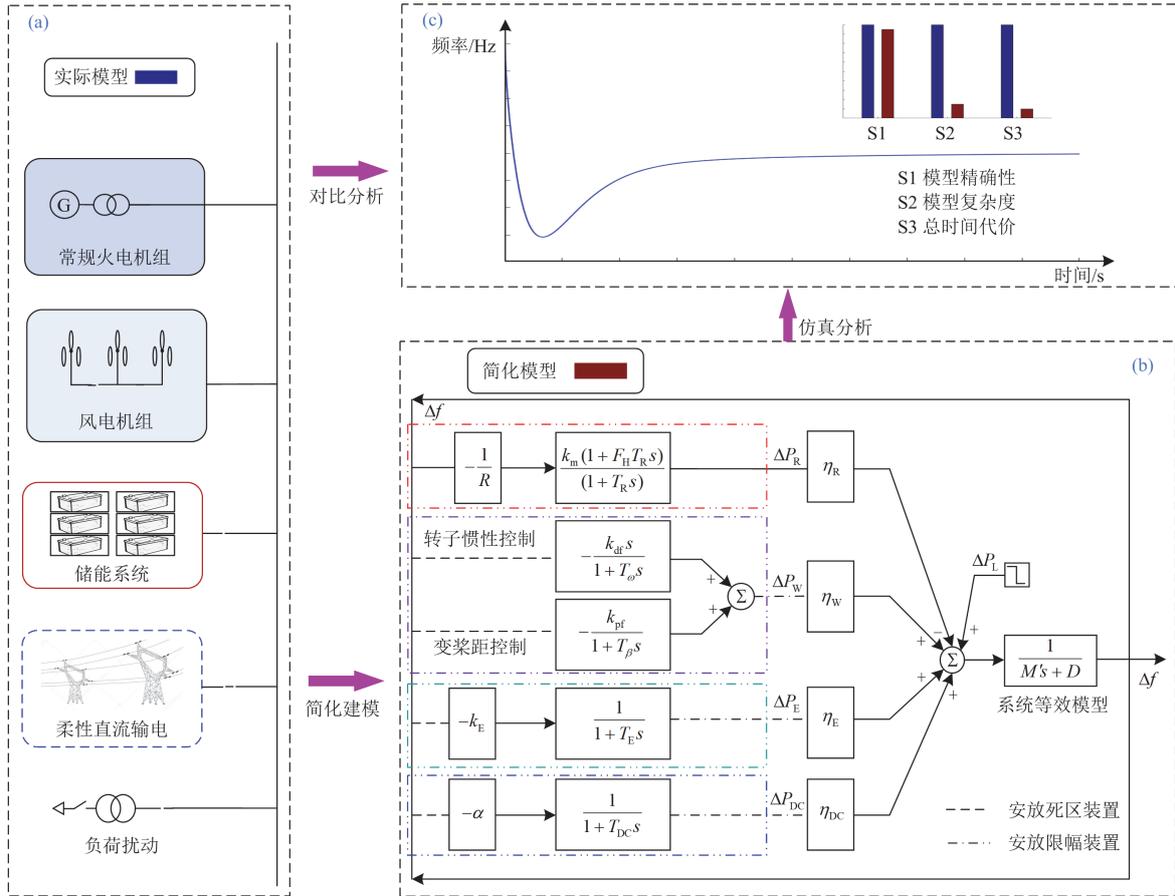


图 1 风-储-直参与调频下电力系统频率特征分析总体思路图

Fig. 1 General idea diagram of power system frequency characteristic analysis under wind power-energy storage-flexible HVDC transmission participation in frequency modulation

图 1(a)是风-储-直调频策略下的时域仿真图, 基于实际模型分别建立了传统火电、风电、储能、柔性直流输电的频率响应模型; 在此基础上, 利用模型分析法对调频单元传统频率时域模型进行控制环节的简化建模, 建立双高电力系统下的频率响应模型, 如图 1(b)所示; 图 1(c)表明该系统简化控制模型在保证精确性的前提下解决了传统时域电磁暂态仿真难以快速响应的难题, 显著降低了建模复杂度以及仿真计算难度, 为多资源参与调频下的双高

电力系统频率态势量化分析提供指导。

### 2 风-储-直频率响应模型

本节参考 P. M. Anderson 于 1990 年所提出的系统频率响应模型<sup>[12]</sup>, 通过分析发电机组与负荷之间的关系, 建立各调频单元的频率响应模型。其中, 常规火电采用低阶线性传递函数表示其控制模块的频率响应特性, 如图 1(b)所示。R 为一次调频下垂系数,  $\Delta P_R$  为火电机组发电功率增量,  $F_H$  为原动机

高压缸做功系数,  $T_R$  为再热时间常数,  $k_m$  为机械功率增益因数。

由于电力系统的频率响应特性取决于调频单元对源-荷功率不平衡量的控制调节能力, 因此本文忽略电力电子设备的开关特性, 而仅考虑多类型调频单元的控制环节。考虑到频率附加控制器的加入可能会引起频率波动, 在频率附加控制器前加入了死区装置, 其值为 $\pm 0.033$  Hz。并且, 为保证线路功率的稳定输送, 引入了限幅装置, 功率限幅的下限为 $-0.1$  p.u., 上限设为 $0.1$  p.u.。

## 2.1 风电频率响应模型

当前, 依据风电机组一次调频机制和机组运行控制方式的不同, 变速恒频风电机组参与电网调频的方法主要有动能控制方式和有功功率备用调制方式<sup>[24]</sup>。其中, 惯性控制、变桨距控制分别为动能控制方式和有功备用控制方式的典型方法。当风电场风速处于中风速区间及额定风速区间时, 风电机组针对风速改变转子角速度, 实现虚拟惯性控制响应; 当风电场风速处于高风速区间时, 桨距角上升, 通过控制桨距角大小以获得机械功率并参与电网一次调频。本文以惯性控制和变桨距控制为例进行分析并建立风电频率响应模型。

考虑其转子侧响应较快的控制特性, 采用传统电源的惯性响应近似替代风电机组惯性响应, 其频率传递函数如式(1)所示。

$$G_{\omega}(s) = \frac{\Delta P_{\omega}}{\Delta f} = -\frac{k_{df}s}{1+T_{\omega}s} \quad (1)$$

式中:  $G_{\omega}(s)$  为风电机组惯性响应频率传递函数;  $T_{\omega}$  为转子惯性响应时间常数;  $k_{df}$  为惯性响应系数;  $\Delta P_{\omega}$  为转子惯性控制的功率变化量。

由于桨距角受机械特性影响, 响应频率时间较长, 采用常规电源一次调频响应模型代替, 频率传递函数如式(2)所示。

$$G_{\beta}(s) = \frac{\Delta P_{\beta}}{\Delta f} = -\frac{k_{pf}}{1+T_{\beta}s} \quad (2)$$

式中:  $G_{\beta}(s)$  为风电机组变桨距控制频率响应传递函数;  $T_{\beta}$  为变桨距响应时间常数;  $k_{pf}$  为一次调频系数;  $\Delta P_{\beta}$  为变桨距控制单元功率变化量。

将变桨距控制和惯性单元相结合, 风电机组频率响应模型如图 2 所示。

$\Delta P_w$  为风力发电功率增量。由图 2 可得风电机组频率响应传递函数  $G_w(s)$  为

$$G_w(s) = \frac{\Delta P_w}{\Delta f} = -\frac{(k_{df}T_{\beta})s^2 + (k_{df} + k_{pf}T_{\omega})s + k_{pf}}{T_{\omega}T_{\beta}s^2 + (T_{\omega} + T_{\beta})s + 1} \quad (3)$$

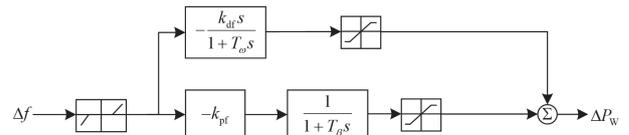


图 2 风电频率响应模型

Fig. 2 Frequency response model of wind farm

## 2.2 储能频率响应模型

为减缓风电机组调频压力, 电力系统接入储能装置参与辅助调频。按照电能存储方式可将储能分为物理储能、电磁场储能和电化学储能<sup>[25]</sup>。本文以电化学储能为例, 在 DC/DC 换流器外环控制侧加入频率附加控制器将储能并入风电直流侧, 建立储能频率响应模型, 其频率附加控制比例系数由风电机组交流母线频率  $\Delta f$  决定。

加入频率附加控制的储能系统频率响应模型传递函数为

$$G_E(s) = \frac{\Delta P_E}{\Delta f} = -\frac{k_E}{T_E s + 1} \quad (4)$$

式中:  $G_E(s)$  为储能系统频率响应传递函数;  $k_E$  为储能频率附加控制比例系数;  $T_E$  为内环控制响应时间常数;  $\Delta P_E$  为储能系统送出功率变化量。储能系统频率响应模型如图 3 所示。

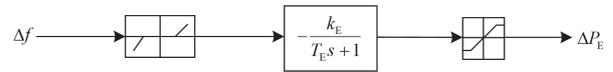


图 3 储能系统频率响应模型

Fig. 3 Frequency response model of energy storage system

## 2.3 柔性直流输电频率响应模型

柔性直流输电具有快速的动态特性且能够独立控制有功和无功功率, 这使其在正常输送功率的同时还可以实现附加控制功能, 其中最主要的是经 VSC 换流站提供频率支撑和阻尼控制两种附加控制方式<sup>[26]</sup>。

本文利用柔性直流输电频率支撑功能将其并网并建立相应的柔性直流输电频率响应模型。当一端出现较大频率波动时, 另一端可经过 VSC-HVDC 进行频率附加控制实现频率调整。

加入频率附加控制后的柔性直流频率响应模型如图 4 所示。



图 4 柔性直流输电频率响应模型

Fig. 4 Frequency response model of flexible HVDC transmission

其中, 附加控制器通过极点配置法选取合适的下垂系数  $\alpha$ ;  $T_{DC}$  为惯性环节时间常数;  $\Delta P_{DC}$  为柔

性直流输电功率增量。功率限幅下限设为 0，上限设为 0.1 p.u。

柔性直流输电频率响应传递函数  $G_{DC}(s)$  为

$$G_{DC}(s) = \frac{\Delta P_{DC}}{\Delta f} = \frac{-\alpha}{1 + sT_{DC}} \quad (5)$$

考虑 2.1、2.2、2.3 节所建的频率响应模型与传统火电共同作用，采用并联的方式将 4 组调频单元组合成风-储-直联合调频模型。下一节在此基础上定量分析风-储-直参与调频模式下的电力系统频率特征。

### 3 风-储-直参与调频模式下电力系统频率特征定量分析

本节根据所建立的频率响应模型，利用数学分析法及自动控制原理理论对风-储-直参与调频下的电力系统频率特征进行量化分析，并针对不同的研究目标设置数据组进行定量计算。

#### 3.1 电力系统频率特性模型

基于传统火电机组并采用风-储-直参与调频模式，电力系统调频单元为火电机组、风电机组、储能系统和柔性直流输电，按照各自发电功率提供调频服务，参考文献[19]并根据图 1(b)可得其频率特性传递函数为

$$G_{s\_WEDC}(s) = \frac{\Delta f(s)}{\Delta P_L(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)[KG_R(s) - G_{WEDC}(s)]} = \frac{R(1 + T_R s)}{\left\{ \begin{aligned} &R(KMs + D)(1 + T_R s) + k_m K(1 + F_H T_R s) - \\ &R(1 + T_R s)(\eta_W G_W(s) + \eta_E G_E(s) + \eta_{DC} G_{DC}(s)) \end{aligned} \right\}} \quad (6)$$

式中： $G_{WEDC}(s)$  为非常规机组频率模型传递函数； $G_R(s)$  为传统火电频率响应传递函数； $M = 2H$ ，其中  $H$  为系统惯性常数； $\Delta P_L$  为系统所受扰动大小； $D$  为系统等效阻尼系数； $K$ 、 $\eta_W$ 、 $\eta_E$ 、 $\eta_{DC}$  分别是常规机组、风电、储能、柔性直流输电的调频系数(非负)，且满足  $K + \eta_W + \eta_E + \eta_{DC} = 1$ 。调频系数定义为：为弥补负荷功率扰动下的源-荷有功不平衡量，调频单元各自所提供的有功调频出力占不平衡量  $\Delta P_L$  的比例。

根据式(6)可知，频率特性传递函数定义为单位有功扰动下的频率变化大小。火电调频系数与频率特性传递函数呈反相关，且风电、储能、柔直调频系数与频率特性传递函数呈正相关。因此，针对已并网的机组组合，电力电子型电源调频系数的增加可提升系统频率稳定性。

#### 3.2 电力系统频率初始变化率定量分析

以负荷扰动为例定量分析电力系统频率初始变

化率，采用初值定理(式(7))计算风-储-直参与调频下电力系统在受到扰动  $\Delta P_L$  时频率初始变化率  $S_0$ 。

$$S_0 = \lim_{t=0^+} \frac{d\Delta f(t)}{dt} = \lim_{s \rightarrow +\infty} s^2 \Delta f(s) = \lim_{s \rightarrow +\infty} s^2 G_s(s) \frac{\Delta P_L}{s} \quad (7)$$

$$S_0 = \frac{50\Delta P_L}{KM} = \frac{25\Delta P_L}{KH} \quad (8)$$

式中， $G_s(s)$  为任意系统的频率特性传递函数。

由于不同机组组合方式和运行工况决定着电力系统等效惯性时间常数，因此基于机组组合方式和运行工况设定惯性时间常数  $H$ 。与传统风电并网系统调频方式不同，风机、储能及柔直皆参与电力系统调频。由于运行工况的变化，当机组额定容量不变时，电力电子型电源调频所提供的虚拟转子动能发生变化，提供了一定的虚拟惯量  $H_{vir,s}$ ，因而直接影响电力系统的等效惯性时间常数。根据式(8)定量计算结果可知，在受到同一有功扰动下 ( $\Delta P_L < 0$ )，各机组调频系数为定值，即调频单元机组组合方式相同时，电力系统初始频率变化率与系统等效惯性时间常数有关。随着电力系统等效惯量的不断增加，系统初始频率变化率绝对值减小。因此，相较于单一火电调频而言，多资源参与调频的控制策略可减小初始频率变化率。

#### 3.3 电力系统最大频率偏差定量分析

针对电力系统频率安全问题，最大频率偏差作为安全临界值指标，决定着电力系统的架构及运行方式。风电机组取代部分同步发电机后，由于常规机组惯量的等值减少使得电力系统等效惯量发生变化。当电力系统等效惯量减小时，系统制约频率变化的能力减弱，此时最大频率偏差绝对值增加。本节阐释了基于风-储-直参与调频下的最大频率偏差分析模型，并提供多机模型下的双高电力系统最大频率偏差特征分析方法。

根据图 1(b)可知，各调频单元的调频功率叠加得到电力系统调频功率频域表达式  $\Delta P(s)$ ，即

$$\Delta P(s) = \Delta f(s) \cdot [-\eta_R \cdot G_R(s) + G_{WEDC}(s)] + \Delta P_L(s) = \Delta f(s) \cdot \left[ \begin{aligned} &-\eta_R \cdot G_R(s) + \eta_W \cdot G_W(s) + \\ &\eta_E \cdot G_E(s) + \eta_{DC} \cdot G_{DC}(s) \end{aligned} \right] + \frac{\Delta P_L}{s} \quad (9)$$

利用拉普拉斯逆变换可得调制有功时域表达式  $\Delta P(t)$  为

$$\Delta P(t) = L^{-1} \left\{ \Delta f(s) \cdot \left[ \begin{aligned} &-\eta_R \cdot G_R(s) + \eta_W \cdot G_W(s) + \\ &\eta_E \cdot G_E(s) + \eta_{DC} \cdot G_{DC}(s) \end{aligned} \right] + \frac{\Delta P_L}{s} \right\} = L^{-1} \left\{ \Delta f(s) \cdot \left[ \begin{aligned} &-\eta_R \cdot G_R(s) + \eta_W \cdot G_W(s) + \\ &\eta_E \cdot G_E(s) + \eta_{DC} \cdot G_{DC}(s) \end{aligned} \right] \right\} + \int_0^t \Delta P_L dt \quad (10)$$

由式(6)可知电力系统频率变化频域表达式  $\Delta f(s)$  为

$$\Delta f(s) = G_{s\_WEDC}(s) \cdot \Delta P_L(s) = \frac{R(1+T_R s) \cdot \Delta P_L}{\left\{ \begin{array}{l} R(KMs + D)(1+T_R s) + k_m K(1+F_H T_R s) - \\ R(1+T_R s)(\eta_w G_w(s) + \eta_E G_E(s) + \eta_{DC} G_{DC}(s)) \end{array} \right\} \cdot s} \quad (11)$$

利用拉普拉斯逆变换可得频率变化时域表达式  $\Delta f(t)$  为

$$\Delta f(t) = L^{-1} \left\{ \frac{R(1+T_R s) \cdot \Delta P_L}{\left\{ \begin{array}{l} R(KMs + D)(1+T_R s) + k_m K(1+F_H T_R s) - \\ R(1+T_R s) \left( \begin{array}{l} \eta_w G_w(s) + \eta_E G_E(s) \\ + \eta_{DC} G_{DC}(s) \end{array} \right) \end{array} \right\} \cdot s} \right\} \quad (12)$$

当电力系统频率达到最大偏差时, 此时系统频率变化率为零, 即

$$\left. \frac{d\Delta f(t)}{dt} \right|_{t=t_{\max}} = 0 \quad (13)$$

则电力系统最大频率偏差  $\Delta f_{\max}$  为

$$\Delta f_{\max} = \left\{ \begin{array}{l} \Delta f(t) \Big|_{t=t_{\max}}, \Delta f(t) = \\ L^{-1} \left\{ \frac{R(1+T_R s) \cdot \Delta P_L}{\left\{ \begin{array}{l} R(2Khs + D)(1+T_R s) + \\ k_m K(1+F_H T_R s) - \\ R(1+T_R s) \left( \begin{array}{l} \eta_w G_w(s) + \eta_E G_E(s) \\ + \eta_{DC} G_{DC}(s) \end{array} \right) \end{array} \right\} \cdot s} \right\} \end{array} \right\} \quad (14)$$

由于多资源联合调频下的电力系统频率响应模型阶数较高, 计算频率响应模型时域表达式难度较大。因此, 对于最大频率偏差的量化分析可解析调频控制参数与频率特征解析式的关系, 通过对频率特征变化趋势的分析, 预测电网最大频率偏差的变化, 从而实现广义上的量化分析。

定义电网最大频率偏差安全裕度  $\delta_{\max}$  为安全临界值  $\psi_{\max}$  与最大频率偏差绝对值的差值占安全临界值  $\psi_{\max}$  的比重, 即

$$\delta_{\max} = \frac{\psi_{\max} - |\Delta f_{\max}|}{\psi_{\max}} \quad (15)$$

根据电网导则可知, 为防止触发第三道防线动作, 一般电网要求频率最大偏差不得超过 1 Hz<sup>[27]</sup>, 则此时电网最大频率偏差安全裕度为

$$\delta_{\max} = 1 - \left\{ \Delta f(t) \Big|_{t=t_{\max}}, \Delta f(t) = L^{-1} \left\{ \frac{R(1+T_R s) \cdot \Delta P_L}{\left\{ \begin{array}{l} R(KMs + D)(1+T_R s) + k_m K(1+F_H T_R s) - \\ R(1+T_R s) \left[ \begin{array}{l} \eta_w G_w(s) + \eta_E G_E(s) \\ + \eta_{DC} G_{DC}(s) \end{array} \right] \end{array} \right\} \cdot s} \right\} \right\} \quad (16)$$

由式(14)和式(16)可知, 电力系统最大频率偏差与系统等效惯量成反比关系, 即在一定的电网运行控制参数下, 电力系统等效惯量越大, 系统最大频率偏差绝对值越小, 电网安全裕度越大。因此, 相较于单一火电调频的传统电力系统(风电、储能、柔直调频控制参数都为 0), 风-储-直参与调频下的双高电力系统最大频率偏差绝对值较小, 且最大频率偏差安全裕度更大。

### 3.4 电力系统频率稳态特性分析

3.1 节对电力系统频率特性传递函数进行量化建模, 为进一步定量分析电力系统稳态频率的变化情况, 本节根据不同调频策略对稳态频率偏差及稳态频率偏差安全裕度进行定量计算。

#### 3.4.1 电力系统稳态频率偏差分析

以负荷扰动为例分析电力系统频率特性, 采用终值定理(式(17))计算电力系统在受到负荷扰动  $\Delta P_L$  时, 稳态频率偏差为  $\Delta f_{ss}$ , 风-储-直参与调频时稳态频率偏差为  $\Delta f_{ss\_WEDCf}$ , 如式(18)所示。

$$\Delta f_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot G_s(s) \cdot \frac{\Delta P_L}{s} \quad (17)$$

$$\Delta f_{ss\_WEDCf} = \frac{R \cdot \Delta P_L}{DR + k_m K + R(\eta_w k_{pf} + \alpha \eta_{DC} + k_E \eta_E)} \quad (18)$$

由式(18)可知, 设定有功扰动  $\Delta P_L < 0$ , 常规机组调频系数与稳态频率偏差成反比关系。因此, 由于多资源参与调频下常规机组调频系数减小, 则稳态频率偏差增加, 即稳态频率偏差绝对值减小。

定义稳态频率偏差安全裕度  $\delta_{ss}$  为安全临界值  $\psi_{ss}$  与稳态频率偏差绝对值的差值占安全临界值  $\psi_{ss}$  的比重, 即

$$\delta_{ss} = \frac{\psi_{ss} - |\Delta f_{ss}|}{\psi_{ss}} \quad (19)$$

通常设置电网稳态频率偏差绝对值不得超过 0.2 Hz<sup>[27]</sup>, 因此根据式(18)和式(19)可知风-储-直参与调频下的稳态频率偏差安全裕度  $\delta_{ss\_WEDCf}$  为

$$\delta_{ss\_WEDCf} = \frac{0.2 - \left| \frac{R \cdot \Delta P_L}{DR + k_m K + R(\eta_w k_{pf} + \alpha \eta_{DC} + k_E \eta_E)} \right|}{0.2} = \frac{1 - \left| \frac{R \cdot \Delta P_L}{DR + k_m K + R(\eta_w k_{pf} + \alpha \eta_{DC} + k_E \eta_E)} \right|}{0.2} \quad (20)$$

将式(18)改写成只与非常规机组调频系数有关, 如式(21)所示。

$$\Delta f_{ss\_WEDCF} = \frac{R \cdot \Delta P_L}{\left\{ \begin{array}{l} DR + k_m(1 - \eta_w - \eta_E - \eta_{DC}) + \\ R(\eta_w k_{pf} + \alpha \eta_{DC} + k_E \eta_E) \end{array} \right\}} \quad (21)$$

式(17)、式(18)、式(21)所求稳态频率偏差为标么值，且考虑负荷扰动为负的情况，即  $\Delta P_L < 0$ ，因此稳态频率偏差小于零。

以下从两方面对稳态频率偏差进行定量分析。

(a) 考察非辅助调频单元调频系数对电力系统频率稳定性的影响：设置式(21)中储能调频系数为定值 0.2，柔性直流输电调频系数为定值 0.1。

利用偏导公式对常规机组调频系数求偏导：

$$\frac{\partial \Delta f_{ss\_WEDCF}}{\partial K} = \frac{-(k_m - Rk_{pf})R \cdot \Delta P_L}{\left\{ \begin{array}{l} DR + K(k_m - Rk_{pf}) + \\ R(0.7k_{pf} + 0.1\alpha + 0.2k_E) \end{array} \right\}^2} \quad (22)$$

同理，式(21)中  $\Delta f_{ss\_WEDCF}$  关于风电机组调频系数  $\eta_w$  的偏导，如式(23)所示。

$$\frac{\partial \Delta f_{ss\_WEDCF}}{\partial \eta_w} = \frac{-(Rk_{pf} - k_m)R \cdot \Delta P_L}{\left\{ \begin{array}{l} DR + \eta_w(Rk_{pf} - k_m) + \\ 0.7k_m + R(0.1\alpha + 0.2k_E) \end{array} \right\}^2} \quad (23)$$

由式(19)、式(22)、式(23)可知，当  $k_m - Rk_{pf} < 0$  时， $\partial \Delta f_{ss\_WEDCF} / \partial K < 0$  且  $\partial \Delta f_{ss\_WEDCF} / \partial \eta_w > 0$ ，即随着常规机组调频系数的增加或者风电调频系数的减小，稳态频率偏差绝对值增加，稳态频率偏差安全裕度减小，电力系统频率稳定性变差；当  $k_m - Rk_{pf} > 0$  时，与上述结论相反。对于传统火电调频系数及风电调频系数的设置，其本质为对调速器的控制，当传统火电调频系数设置为 0 时，表示电力系统关闭调速器，此时传统火电不参与调频，则系统调频能力全来自于其他机组。

根据灵敏度定义可得式(24)。

$$S_x^y = \frac{\Delta y / y}{\Delta x / x} = \frac{\partial y}{\partial x} \cdot \frac{x}{y} \quad (24)$$

构建常规机组调频系数  $K$  和风电调频系数  $\eta_w$  的灵敏度模型分别为

$$S_K^{A_{f_{ss}}} = \frac{d\Delta f_{ss} / \Delta f_{ss}}{dK / K} = \frac{\partial \Delta f_{ss}}{\partial K} \cdot \frac{K}{\Delta f_{ss}} \quad (25)$$

$$S_{\eta_w}^{A_{f_{ss}}} = \frac{d\Delta f_{ss} / \Delta f_{ss}}{d\eta_w / \eta_w} = \frac{\partial \Delta f_{ss}}{\partial \eta_w} \cdot \frac{\eta_w}{\Delta f_{ss}} \quad (26)$$

根据式(25)和式(26)可得灵敏度绝对值变化图，如图 5 所示，参数取值于见附录 A 中表 A1。

根据图 5 可知，在辅助调频单元调频系数确定的情况下 ( $K + \eta_w = 0.7$ )：当  $K = \eta_w = 0.35$  时， $|S_{\eta_w}^{A_{f_{ss}}}| = |S_K^{A_{f_{ss}}}|$ ；调频系数在(0,0.35)时， $|S_{\eta_w}^{A_{f_{ss}}}| < |S_K^{A_{f_{ss}}}|$ ，

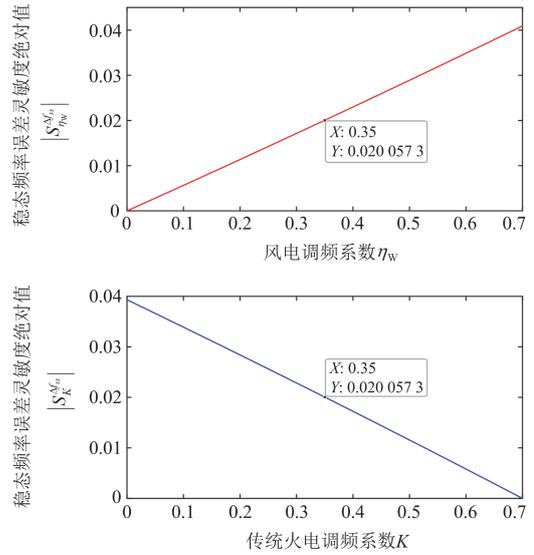


图 5 灵敏度变化图

Fig. 5 Sensitivity change graph

即传统火电调频系数的变化对于稳态频率偏差的影响更明显；调频系数在(0.35,0.65)时， $|S_{\eta_w}^{A_{f_{ss}}}| > |S_K^{A_{f_{ss}}}|$ ，即风电调频系数的变化对于稳态频率偏差的影响更明显。

(b) 分析辅助调频单元附加控制比例系数对电力系统频率稳定性的影响：首先对式(18)中储能频率附加控制比例系数  $k_E$  和柔性直流输电下垂系数  $\alpha$  分别求偏导：

$$\frac{\partial \Delta f_{ss\_WEDCF}}{\partial k_E} = \frac{-R^2 \cdot \eta_E \cdot \Delta P_L}{\left\{ DR + k_m K + R(k_{pf} \eta_w + \alpha \eta_{DC} + k_E \eta_E) \right\}^2} \quad (27)$$

$$\frac{\partial \Delta f_{ss\_WEDCF}}{\partial \alpha} = \frac{-R^2 \cdot \eta_{DC} \cdot \Delta P_L}{\left\{ DR + k_m K + R(k_{pf} \eta_w + \alpha \eta_{DC} + k_E \eta_E) \right\}^2} \quad (28)$$

根据式(19)、式(27)、式(28)可知，稳态频率偏差对  $k_E$ 、 $\alpha$  的偏导数都大于零，即稳态频率偏差与  $k_E$  和  $\alpha$  呈正相关。当辅助调频单元控制比例系数增加时，电力系统的稳态频率偏差绝对值减小，稳态频率偏差安全稳定裕度增加，因此，储能、柔直参与调频时可提高电力系统频率稳定性。

为定量分析辅助调频单元附加控制比例系数对稳态频率偏差的影响，根据式(18)的推导结果，以火电、风电、储能、柔性直流输电调频系数均为定值 0.25 为例，得到稳态频率偏差与辅助调频单元附加控制比例系数关系的三维图，如图 6 所示。根据图 6 可得，当各调频单元调频系数确认时，稳态频

率偏差绝对值随储能频率附加控制比例系数或柔性直流输电下垂系数的增加而减小, 结果与式(27)、式(28)推导结论相同。

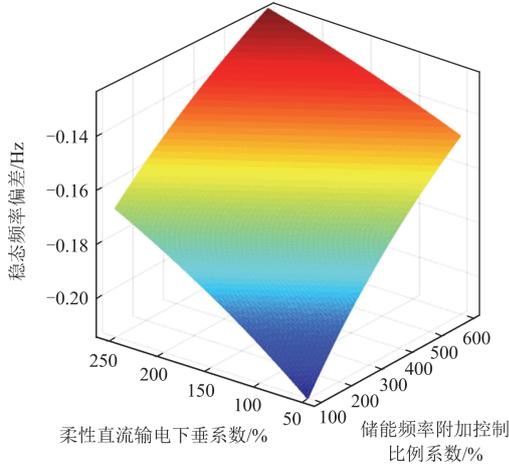


图6 稳态频率偏差相关系数影响图

Fig. 6 Correlation coefficient influence diagram of steady-state frequency deviation

### 3.4.2 电力系统稳态频率偏差-功率扰动关系分析

本节定量分析在不同调频方式下常规机组调频系数对系统功率-频率特性的影响, 重点研究风-储-直调频方式下稳态频率偏差与功率扰动的关系, 设置非常规机组中辅助调频单元调频系数:  $\eta_E = 0.2$ ,  $\eta_{DC} = 0.1$ 。

风-储-直参与调频电力系统稳态频率响应系数  $\beta_{WEDCF}$  如式(29)所示。

$$\beta_{WEDCF} = \frac{\Delta P_L}{\Delta f_{ss\_WEDCF}} = D + k_{pf}\eta_W + \alpha\eta_{DC} + k_E\eta_E + \frac{Kk_m}{R} = D + k_{pf}(0.7 - K) + \alpha\eta_{DC} + k_E\eta_E + \frac{Kk_m}{R} \quad (29)$$

$\beta_{WEDCF}$  表示系统引起单位频率变化所需的功率扰动值(%). 其频率变化采用的是稳态误差, 所以是稳态频率特性指标。

下面定量分析电力系统功率扰动与频率变化的关系。参考文献[23]的分析场景, 以电力系统要求负荷功率变化 10%、其系统频率变化不得超过 1 Hz 的运行标准为例, 即: 负荷功率扰动 0.1 p.u. 的阶跃响应, 频率变化不超过 0.02 p.u. (工频 50 Hz), 则稳态频率需满足:

$$\Delta f(\infty) < \frac{0.02 \text{ p.u.}}{0.1 \text{ p.u.}} \quad (30)$$

首先考察新能源高渗透率但不参与调频情况, 功率阶跃响应稳态频率偏差  $\Delta f_w(\infty)$  需满足:

$$\Delta f_w(\infty) = \frac{R}{DR + k_m K} < \frac{0.02 \text{ p.u.}}{0.1 \text{ p.u.}} \quad (31)$$

将附表 A1 数据代入, 得到结果:

$$K > \frac{R(5-D)}{k_m} \approx 0.16 \quad (32)$$

当风电参与调频时, 功率阶跃响应稳态频率偏差  $\Delta f_{Wf}(\infty)$  需满足:

$$\Delta f_{Wf}(\infty) = \frac{R}{DR + Kk_m + Rk_{pf}\eta_W} = \frac{R}{DR + Kk_m + Rk_{pf}(0.7 - K)} < \frac{0.02 \text{ p.u.}}{0.1 \text{ p.u.}} \quad (33)$$

将附录 A 中表 A1 参数代入, 得到结果:

$$K < \frac{(D + 0.7k_{pf} - 5)R}{Rk_{pf} - k_m} = 11 \quad (34)$$

当风-储-直参与调频时, 功率阶跃响应稳态频率偏差  $\Delta f_{WEDCF}(\infty)$  需满足:

$$\Delta f_{WEDCF}(\infty) = \frac{R}{DR + k_m K + R(k_{pf}\eta_W + \alpha\eta_{DC} + k_E\eta_E)} = \frac{R}{DR + k_m K + R(k_{pf}(0.7 - K) + 0.1\alpha + 0.2k_E)} < \frac{0.02 \text{ p.u.}}{0.1 \text{ p.u.}} \quad (35)$$

将附录 A 中表 A1 数据代入, 得到结果:

$$K < \frac{R(D + 0.7k_{pf} + 0.1\alpha + 0.2k_E - 5)}{Rk_{pf} - k_m} = 12.8 \quad (36)$$

根据本节得到结论: 风机参与不同调频运行方式下, 电力系统安全稳定约束有所差异, 即频率特性不同。由式(32)可知, 为缓解源-荷两端的有功不平衡, 当风电不参与调频时, 常规机组调频系数最小为 0.16, 即调频有功出力下限为  $0.16\Delta P_L$ ; 由式(34)和式(36)可知, 风电单独参与调频和风-储-直共同参与调频时, 无论常规机组调频系数怎么变化, 10%的阶跃扰动都无法使电力系统稳态频率偏差大于 1 Hz, 所以风电高渗透率调频使得电力系统具有有效的调频能力。

## 4 算例分析

为验证所提频率特征定量分析方法的有效性, 本文在 Matlab/Simulink 中搭建 IEEE39 节点系统模型并进行仿真分析, 系统接线图如图 7 所示。该模型的频率设置为 50 Hz, 且所有的负荷均设置为恒功率负荷模型。分别在 6 号、16 号、18 号节点加入风电、储能和柔性直流输电, 储能采用集中的方式

通过电力电子变流器接入系统；储能类型选用功率型储能，如超级电容器，其特点是响应时间较短、功率比大，满足风电调频的要求；考虑到下垂特性，柔性直流输电模型加入了频率附加控制。下文分析不同工况下电力系统的频率特性变化，负荷为 1000 MW，风电额定功率为 200 MW，负荷扰动为 60 MW(0.06 p.u)。

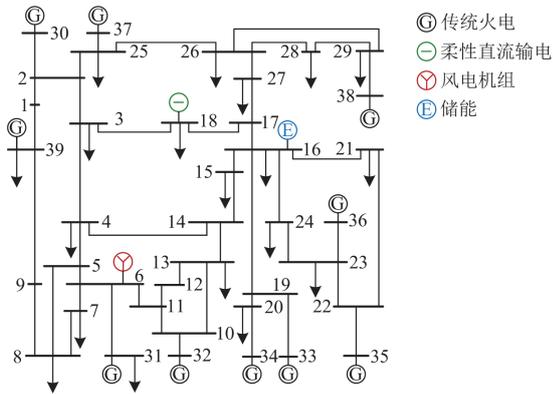


图 7 IEEE39 节点系统结构  
Fig. 7 IEEE39 node system structure

#### 4.1 风-储-直参与调频下电力系统频率响应模型准确性验证

为验证本文所提风-储-直参与调频下的电力系统频率响应模型的准确性，基于 PSD-BPA 软件对该策略模型进行对比仿真。设定电力电子型电源高比例并网场景： $K = 0.7$ ， $\eta_w = 0.2$ ， $\eta_E = 0.05$ ， $\eta_{DC} = 0.05$ 。当系统发生 0.06 p.u.的有功功率扰动时，系统频率曲线如图 8 所示。

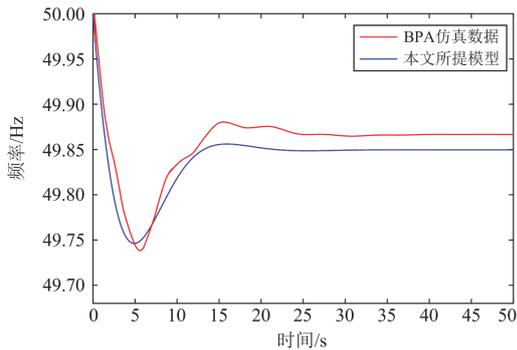


图 8 高渗透率电力电子型电源参与调频的频率特性曲线  
Fig. 8 Frequency characteristic curve of high-permeability power electronic power supply participating in frequency modulation

表 1 为图 8 仿真所对应的频率特征数值。根据表 1 可知，基于 PSD-BPA 仿真所得初始频率变化率、频率最低点、稳态频率分别为  $-0.1067 \text{ Hz} \cdot \text{s}^{-1}$ 、

49.7384 Hz、49.8666 Hz。本文所提模型仿真出的始频率变化率、频率最低点、稳态频率分别为  $-0.1183 \text{ Hz} \cdot \text{s}^{-1}$ 、49.7462 Hz、49.8496 Hz，误差分别为 10.87%、0.016%、0.034%。

表 1 不同仿真平台下频率特性对比

Table 1 Comparison of frequency characteristics under different simulation platforms

仿真方式	初始频率变化率/(Hz·s <sup>-1</sup> )	频率最低点/Hz	稳态频率/Hz
BPA 仿真	-0.1067	49.7384	49.8666
本文所提模型	-0.1183	49.7462	49.8496

综上所述，本文所提多资源参与调频下的电力系统频率响应模型精确性在可接受范围内，因此下文基于该模型进行仿真分析。

#### 4.2 风-储-直参与调频下电力系统频率特性定量分析对比

结合 3.1 节理论推导，4.2 节对两种情况下频率特性进行定量对比，考察其频率偏差和功率输出情况，准确突出了共同调频的优越性。

设定参数组合 1：基于 IEEE39 节点系统仿真模型，设置风电额定风速时，10 机传统火电总有出力与风电、储能、柔直有功出力比例相同，即风电机组调频系数、储能调频系数、柔性直流输电调频系数、传统火电机组调频系数都设置为 0.25。

仿真分析风电单独参与调频、风-储-直调频两种运行模式，系统频率特性变化、频率质量指标如图 9、表 2 所示。

根据图 9 和表 2 可知，新能源机组参与调频提高了惯性响应能力和调频能力：频率最低点升高了 0.18 Hz，根据式(15)可得电网最大频率安全裕度增加了 18%；稳态频率偏差升高了 0.055 Hz，由式(19)可得电网稳态频率偏差安全裕度增加了 27.5%；频

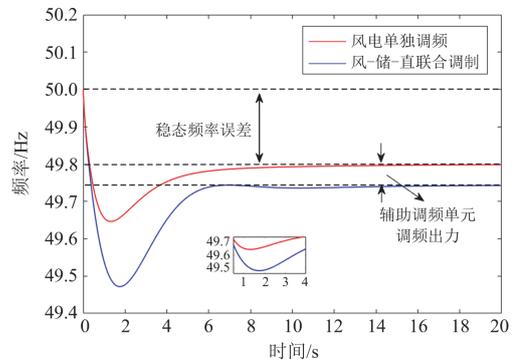


图 9 不同调频方式下系统频率曲线  
Fig. 9 Power system frequency curve with different frequency regulation methods

表 2 不同调频方式下频率特性对比

Table 2 Frequency characteristics comparison of different frequency regulation methods

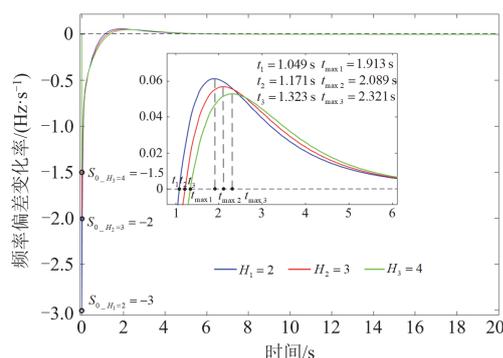
调频模式	频率最低点/Hz	稳态频率偏差/Hz	频率变化率/(Hz·s <sup>-1</sup> )
风电调频	49.47	-0.257	-0.3033
风-储-直调频	49.65	-0.202	-0.2656

率变化率绝对大小减小了 0.0377。数据定量分析表明依据调频系数调控储能、柔性直流输电辅助风电参与调频具有可行性, 改善了风电机组参与调频下电力系统频率特性, 降低了频率变化率和稳态频率偏差的绝对值大小。

### 4.3 调频关键参数对电力系统频率的影响分析

#### 4.3.1 惯性常数对电力系统频率的影响分析

本节以风-储-直调频为调频策略, 分析不同惯性常数  $H$  对电力系统频率的影响。额定风速下, 设置 10 机传统火电各机容量、惯性时间常数相同, 执行 4.2 节参数组合 1, 并设置惯性时间常数  $H$  分别为 2、3、4, 其余参数参照附录 A 中表 A1, 结果如图 10 所示。

图 10 不同惯量常数  $H$  下电力系统频率偏差变化率图Fig. 10 Diagram of power system frequency deviation change rate under different inertia  $H$ 

由图 10 可知, 在风-储-直调频策略下, 当各调频单元调频系数均设置为 0.25 时, 电力系统频率偏差变化率与惯性常数  $H$  有关。  $t=0$  时, 初始频率变化率  $S_{0\_H_1=2} = -3$ ,  $S_{0\_H_2=3} = -2$ ,  $S_{0\_H_3=4} = -1.5$ , 可见系统总惯性时间常数越大, 虚拟惯量的加入使得频率初始变化率绝对值越小, 与 3.2 节结论一致; 当  $d\Delta f_{ss}/dt = 0$  时, 系统频率达到峰值, 即频率偏差绝对值最大, 图中:  $t_1 = 1.049$  s,  $t_2 = 1.171$  s,  $t_3 = 1.323$  s, 可见随着总惯性常数  $H$  的增加, 系统频率达到峰值的时间延迟; 当  $d\Delta f_{ss}/dt$  最大时, 系统频率偏差变化率最大, 即此时系统频率变化率最大, 由图 10 可得  $t_{max1} = 1.913$  s,  $t_{max2} = 2.089$  s,

$t_{max3} = 2.321$  s, 即随着总惯性常数  $H$  的增加, 系统频率恢复阶段达到频率偏差变化率最大时间延迟。

#### 4.3.2 非辅助调频单元调频系数对电力系统频率稳定性的影响分析

本节讨论在辅助调频单元调频系数确定后, 风-储-直调频下电力系统频率稳定性受火电、风电调频系数的影响。

设置调频单元有功出力: 10 机传统火电总有功出力占系统总有功出力的 70%, 储能有功出力占 20%, 柔性直流输电占 10%, 即设置辅助调频单元调频系数  $\eta_E = 0.2$ ,  $\eta_{DC} = 0.1$ , 则非辅助调频单元中  $K + \eta_W = 0.7$ , 其余参数见附录 A 中表 A1, 仿真结果如图 11 和表 3 所示。

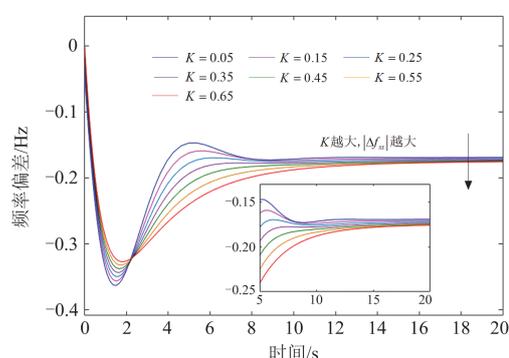


图 11 不同调频系数下电力系统频率变化图

Fig. 11 Diagram of power system frequency change under different frequency modulation coefficients

表 3 不同调频系数下电力系统频率特征值

Table 3 Power system frequency eigenvalues under different frequency modulation coefficients

火电调频系数	风电调频系数	稳态频率偏差/Hz	稳态频率偏差变化值/Hz
0.05	0.65	-0.1693	—
0.15	0.55	-0.1707	0.0014
0.25	0.45	-0.1720	0.0013
0.35	0.35	-0.1732	0.0012
0.45	0.25	-0.1743	0.0011
0.55	0.15	-0.1752	0.0009
0.65	0.05	-0.1759	0.0007

由图 11 和表 3 可知, 风-储-直调频下, 当辅助调频单元调频系数确定时, 传统火电调频系数从 0.05 以 10% 的梯度增加到 0.65, 系统稳态频率偏差从 -0.1693 减小到 -0.1759, 系统频率稳定性变差; 随着火电调频系数的等值增加, 稳态频率偏差变化值越来越小, 即稳态频率偏差变化受火电调频系数的影响越来越小; 随着风电调频系数的等值增加, 稳态频率偏差变化值越来越大, 即稳态频率偏差变化受风电

调频系数的影响越来越大;在(0.05, 0.35)数值范围内,分别以 10%等值调频比例增加,调节火电调频系数的稳态频率偏差变化值从 0.0014 减小到 0.0012,而调节风电调频系数的稳态频率偏差变化值从 0.0007 增加到 0.0012,即在(0.05, 0.35)范围内,稳态频率偏差变化受火电调频系数的影响大于稳态频率偏差变化受风电调频系数的影响,即  $|S_{\eta_w}^{A_{ss}}| < |S_K^{A_{ss}}|$ ;在(0.35, 0.65)数值范围内,分别以 10%等值调频比例增加,调节火电调频系数的稳态频率偏差变化值从 0.0012 减小到 0.0007,而调节风电调频系数的稳态频率偏差变化值从 0.0012 增加到 0.0014,即在(0.35, 0.65)范围内,稳态频率偏差变化受火电调频系数的影响小于稳态频率偏差变化受风电调频系数的影响,即  $|S_{\eta_w}^{A_{ss}}| > |S_K^{A_{ss}}|$ 。以上结果与 3.4.1(a)结论一致。

### 4.3.3 储能频率附加控制比例系数对电力系统的影响

同样,利用风-储-直调频策略模型,执行 4.2 节参数组合 1,设置柔性直流输电频率附加控制单元内比例控制器系数一定,即下垂系数一定,通过改变储能外环控制中的储能频率附加控制比例系数  $k_E$  的大小,分析系统在同一扰动下电力系统频率的变化情况。为考察对比系统频率随储能频率附加控制比例系数等比例增加的变化情况,以附录 A 中表 A1 中  $k_E$  的大小为基准值,调整控制比例系数,分别设置为基准值的 100%、200%、300%、400%、500%,不同储能频率附加控制比例系数条件下系统频率偏差仿真结果如图 12 所示。

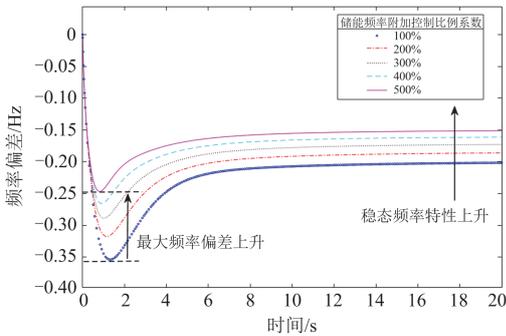


图 12 不同储能频率附加控制比例系数对电力系统的影响  
Fig. 12 Influence of additional control proportional coefficients of different energy storage frequencies on power systems

对仿真结果进行统计分析,结果如表 4 所示。

根据表 4 统计结果可知:在风-储-直调频策略模型下,同一系统受到相同扰动,随着储能频率附加控制比例系数  $k_E$  的增加,最大频率偏差以及稳态频率偏差绝对值都相应减小。当  $\psi_{\max} = 1 \text{ Hz}$  且  $\psi_{ss} = 0.2 \text{ Hz}$  时,根据式(15)、式(19)可计算 5 种情

表 4 不同储能频率附加控制比例系数下的频率情况  
Table 4 Frequency conditions under different energy storage frequencies with additional control proportional coefficients

储能频率附加控制比例系数/%	最大频率偏差/Hz	稳态频率偏差/Hz
100	-0.177	-0.101
200	-0.159	-0.093
300	-0.144	-0.086
400	-0.133	-0.080
500	-0.123	-0.076

况下电力系统最大频率偏差安全裕度及稳态频率偏差安全裕度分别为

$$\begin{cases} \delta_{\max}(k_E) = 82.3\%, & \delta_{ss}(k_E) = 49.5\% \\ \delta_{\max}(2k_E) = 84.1\%, & \delta_{ss}(2k_E) = 53.5\% \\ \delta_{\max}(3k_E) = 85.6\%, & \delta_{ss}(3k_E) = 57.0\% \\ \delta_{\max}(4k_E) = 86.7\%, & \delta_{ss}(4k_E) = 60.0\% \\ \delta_{\max}(5k_E) = 87.7\%, & \delta_{ss}(5k_E) = 62.0\% \end{cases} \quad (37)$$

由式(37)可知,随着储能频率附加控制比例系数的增加,电力系统最大频率偏差安全裕度由 82.3%增加到 87.7%,增幅为 5.4%;稳态频率偏差安全裕度由 49.5%增加到 62.0%,增幅为 12.5%,电力系统频率安全裕度提升。

综上可知,储能系统参与调频可以提高电力系统频率稳定性,与 3.4.1(b)分析结论一致。

### 4.3.4 柔性直流输电下垂系数对电力系统的影响

本节考察柔性直流输电下垂系数大小对电力系统的影响。同样,执行 4.2 节参数组合 1,设置储能外环控制中的储能频率附加控制比例系数一定,改变柔性直流输电频率附加控制器下垂系数大小,分析电力系统在风-储-直调频下的稳态频率偏差。为方便对比系统频率随下垂系数按一定比例增加的变化情况,以附录 A 中表 A1 的  $\alpha$  大小为基准值,调整柔性直流输电控制下垂系数,分别设置为基准值的 50%、100%、150%、200%、250%,且  $\psi_{\max} = 1 \text{ Hz}$ 、 $\psi_{ss} = 0.2 \text{ Hz}$  时,仿真结果如图 13 所示。

不同柔性直流输电下垂系数下的频率情况如表 5 所示。从表 5 的数据可以看出,风-储-直参与调频策略下,当风电机组、储能系统调频系数一定时,随着柔性直流输电下垂系数  $\alpha$  由 50%增大至 250%,电力系统稳态频率偏差由 49.892 Hz 增加到 49.916 Hz,稳态频率偏差安全稳定裕度由 46.0%提升至 58.0%,增幅为 12%,因此电力系统频率稳定性提高,与 3.4.1(b)分析结论一致。

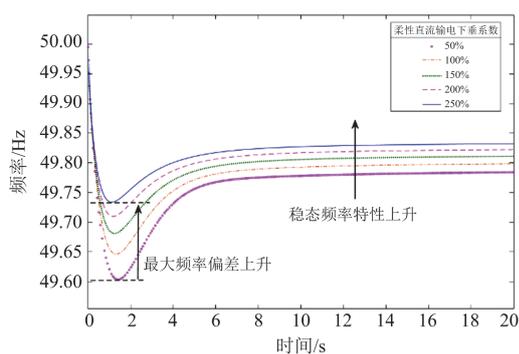


图 13 不同柔性直流输电下垂系数对电力系统的影响

Fig. 13 Influence of different flexible HVDC droop coefficients on power system

表 5 不同柔性直流输电下垂系数下的频率情况

Table 5 Frequency situation under different sag coefficients of flexible HVDC transmission

柔性直流输电 下垂系数 $\alpha$ /%	稳态频率偏差/Hz	稳态频率偏差 安全裕度/%
50	49.892	46.0
100	49.899	49.5
150	49.906	53.0
200	49.911	55.5
250	49.916	58.0

#### 4.4 不同调频方式下常规机组调频系数对电力系统稳态频率偏差的影响

稳态频率偏差作为电力系统的稳态性能指标, 清晰反映了电力系统调频单元对电力系统频率稳定的调控能力, 因此本节分析在辅助调频单元调频系数确定的情况下, 当电力系统发生 1 Hz 变化时负荷功率扰动大小。设置 10 机 39 节点系统各调频单元有功调频比例与 4.3.2 节相同:  $\eta_E = 20\%$ ,  $\eta_{DC} = 10\%$ ,  $K + \eta_W = 0.7$ 。仿真结果如图 14 所示。

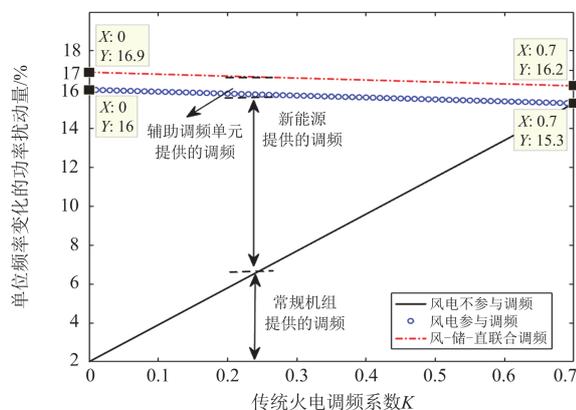


图 14 不同常规机组调频系数下电力系统的稳态频率特性

Fig. 14 Steady-state frequency characteristics of power system under the penetration of different conventional units

由图 14 可知: 1) 6 节点风电频率附加控制切断, 即新能源不参与调频时, 当常规机组调频系数下降, 系统频率特性下降, 并且当常规机组调频系数较小时, 系统常规机组调频能力很差, 不符合现代电力系统新能源并网参与调频的需求。2) 当新能源参与调频时, 电力系统稳态频率特性明显提升; 极端情况下(常规机组调频系数为 0), 负荷扰动约 16% 时, 电力系统开始发生 1 Hz 以上的频率波动, 电力系统失稳, 与 3.4.2 节式(32)的理论分析一致。3) 风-储-直调频方式下电力系统稳态频率特性较风电单独调频方式下稳态频率特性高; 随着传统火电调频系数的上升, 发生 1 Hz 失稳事故时的功率扰动比率下降, 稳态频率特性下降, 电力系统越来越依靠新能源发电所提供的调频能力; 当发生 1 Hz 频率变化失稳事故时, 随着系数  $K$  增加, 风-储-直调频下功率扰动量由 16.9% 减小到 16.2%, 风电单独调频下功率扰动量由 16% 减小到 15.3%, 可见辅助调频单元提供维持电力系统频率稳定 0.09% 的功率出力。

#### 4.5 不同运行区间下的新能源调频机组惯性响应定量分析

由于风电机组加入虚拟惯性响应及变桨距控制, 新能源机组提供了一部分的虚拟惯量。本节通过仿真定量分析不同运行工况下风机有功调制功率大小, 直接反映了风机在不同运行区间下的惯性响应特征。执行参数组合 1, 仿真结果如图 15 所示。

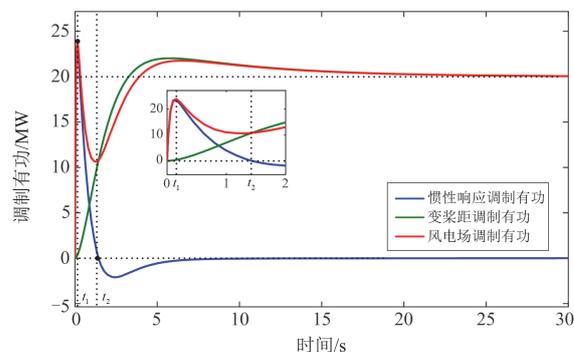


图 15 风电机组有功调制曲线图

Fig. 15 Active power modulation curve of wind turbine

由图 15 可知, 当电力系统受到有功扰动时, 虚拟惯性控制快速响应系统频率变化。0— $t_1$  区间处于中风速阶段, 风机转速基本无变化。由于最大功率跟踪曲线迅速提升, 惯性控制有功调制大小迅速增加, 此时桨距角控制调制有功基本无变化。当  $t_1 = 0.127$  s 时, 惯性响应有功调制大小达到峰值 23.92 MW, 此时风机总调频功率大小与惯性响应控制调频功率大小基本相同。 $t_1 - t_2$  阶段, 由于转子

角速度减小，惯性控制调频功率逐渐减小，此时风机释放动能参与虚拟惯性调频。当  $t_2 = 1.432$  s 时，惯性响应有功支援结束。随着风速达到高风速区间，转子角速度增加，变桨距控制起主导作用。风机调制有功稳定前，变桨距控制提供风机所有一次调频有功支援。 $t = 30$  s 时(近似稳定)，变桨距控制调频功率为 20.28 MW，且风电场调频控制功率与变桨距控制功率值重合。因此，不同的运行工况下，风电机组调频方式相异，即所呈现的惯性响应特征不同。

4.6 多资源调频策略仿真验证

在电网出现大功率有功缺额事故时，调频能力的不足将使电力系统频率出现骤降情况。为进一步验证风-储-直调频策略的可行性，考察大功率缺额下本文调频策略的有效性，利用 PSD-BPA 软件对 IEEE39 节点系统进行频率暂态稳定分析。系统中各类电源总装机 6196.29 MW，负荷 6150.10 MW，并设置 0.2 s 发生 BUS 38 火电机组切机事故。图 16 为 BUS 39 母线频率波形图，最大频率偏差、最大频率偏差时间、稳态频率偏差统计于表 6。

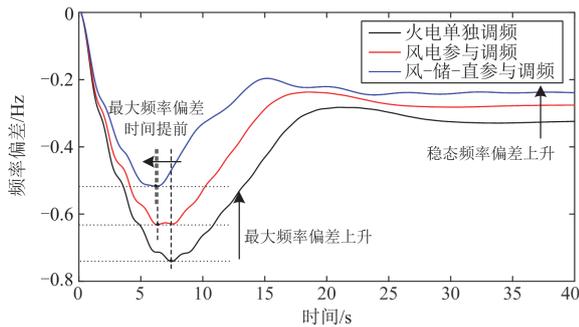


图 16 大功率缺额下的 BUS 39 频率波形图

Fig. 16 BUS 39 frequency waveform diagram under high power shortage

表 6 切机事故下的 BUS 39 频率特征情况

Table 6 Frequency characteristics of BUS 39 under machine cutting accident

电网频率特征	火电单独调频	风电参与调频	风-储-直参与调频
最大频率偏差/Hz	-0.7408	-0.6317	-0.5171
稳态频率偏差/Hz	-0.3242	-0.2757	-0.2388
最大频率偏差时间/s	7.46	6.32	6.22

根据表 6 可知，电力系统设置风-储-直参与调频情况较火电单独调频情况：最大频率偏差上升 0.2237 Hz，稳态频率偏差上升 0.0854 Hz，最大频率偏差时间提前 1.24 s。这是由于当发生切机大功率缺额扰动时，调频单元能够及时提供功率支援，防止系统频率的继续下降。因此，双高电力系统下多资源调频策略能够有效调制频率稳定，提高电力系

统频率稳定性。

5 结论

针对双高电力系统多资源参与调频的趋势，本文定量分析了风-储-直参与调频下的系统频率特征，并得出以下结论：

1) 采用线性简化模型构建系统频率响应模型，在确保精确性的前提下能够量化表示不同运行工况、不同控制方式下电网的频率特征及调制有功大小，该频率定量分析方法具有较强的可解释性。所提多资源调频下的电力系统频率特征包括频率特性传递函数、初始频率变化率、最大频率偏差、最大频率偏差安全裕度、稳态频率偏差、稳态频率偏差安全裕度、稳态频率偏差变化规律及稳态频率特性指标。

2) 通过频率特征定量分析可知，多资源调频较单一风电调频，辅助调频单元的参与使得系统频率稳定性提高，频率安全裕度提升；随着风电调频系数的提高，虚拟惯量的加入使得系统等效惯性时间常数增加，电力系统初始频率变化率绝对值减小，最大频率偏差时间延迟，且频率恢复阶段达到频率变化率最大的时间延迟；储能频率附加控制比例系数增加 4 倍，最大频率偏差安全裕度及稳态频率偏差安全裕度分别提升 5.4%、12.5%；柔直附加频率控制系数增加 1.5 倍，稳态频率偏差安全裕度提升 12%；通过对稳态频率特性指标的量化分析，可评估频率波动安全范围内各调频单元的功率出力情况及调频系数极限；风电场在中风速区间虚拟惯性响应控制主导风机调频，调频功率峰值达到 23.92 MW，1.432 s 后风机全由变桨距控制主导有功调制，且稳定时调制有功大小达 20.28 MW。

3) 多资源参与调频下的双高电力系统模型误差解决方法及系统等效惯量定量分析有待进一步研究。

附录 A

表 A1 系统参数设定值

Table A1 System parameter setting value

参数	数值
$R$	0.05
$D$	2
$k_m$	0.95
$F_H$	0.3
$\alpha$	8
$k_E$	5
$T_{DC}$	0.05
$T_\omega$	0.1
$k_{df}$	8
$k_{pf}$	20
$T_p$	3

## 参考文献

- [1] 李晖, 刘栋, 姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6245-6259.  
LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6245-6259.
- [2] 马宁宁, 谢小荣, 贺静波, 等. 高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4720-4732.  
MA Ningning, XIE Xiaorong, HE Jingbo, et al. Review of wide-band oscillation in renewable and power electronics highly integrated power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4720-4732.
- [3] 于其宜, 王琦, 汤奕. 考虑泄流效应的风电场并网点电压系统侧增援调控方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(13): 30-39.  
YU Qiyi, WANG Qi, TANG Yi. System-side reinforcing dispatch and control method for grid-connected point voltage of wind farm considering drainage effect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(13): 30-39.
- [4] 陈磊, 庄俊, 王志远, 等. 柔性直流输电系统的变速抽水蓄能机组直流电压辅助控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(4): 154-162.  
CHEN Lei, ZHUANG Jun, WANG Zhiyuan, et al. Auxiliary control strategy of DC voltage for variable speed pumped storage units in an HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(4): 154-162.
- [5] 米阳, 伦雪莹, 孟凡斌, 等. 基于无模型算法和电动汽车辅助调节的新能源电力系统频率协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(24): 13-20.  
MI Yang, LUN Xueying, MENG Fanbin, et al. Frequency coordinated control of a new energy power system based on a model-free algorithm and EV auxiliary regulation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(24): 13-20.
- [6] 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): 60-70.  
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): 60-70.
- [7] 李东东, 孙雅茹, 徐波, 等. 考虑频率稳定的新能源高渗透率电力系统最小惯量与一次调频容量评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(23): 54-61.  
LI Dongdong, SUN Yaru, XU Bo, et al. Minimum inertia and primary frequency capacity assessment for a new energy high permeability power system considering frequency stability[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(23): 54-61.
- [8] WANG Xiongfei, BLAABJERG F. Harmonic stability in power electronic-based power system: concept, modeling, and analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 2858-2870.
- [9] SHU D, XIE X, JIANG Q, et al. A multirate EMT co-simulation of large AC and MMC-based MTDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 1252-1263.
- [10] 汤奕, 崔晗, 李峰, 等. 人工智能在电力系统暂态问题中的应用综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(1): 2-13, 315.  
TANG Yi, CUI Han, LI Feng, et al. Review on artificial intelligence in power system transient stability analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(1): 2-13, 315.
- [11] CHAN M L, DUNLOP R D, SCHWEPPE F. Dynamic equivalents for average system frequency behavior following major disturbances[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1972, 91(4): 1637-1642.
- [12] ANDERSON P M, MIRHEYDAR M. A low-order system frequency response model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(3): 720-729.
- [13] HUANG H, LI F. Sensitivity analysis of load-damping characteristic in power system frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1324-1335.
- [14] CAO Y, ZHANG H, ZHANG Y, et al. Extending SFR model to quantitatively assess the influence of thermal states on primary frequency response capability[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2020, 14(19): 689-711.
- [15] SHI Qingxin, LI Fangxing, CUI Hantao. Analytical method to aggregate multi-machine SFR model with applications in power system dynamic studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6355-6367.
- [16] DAI Jianfeng, LIU Yishi, YAN Cheng, et al. A coordinated control method of aggregate AC load for auxiliary frequency regulation service[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2023, 147.
- [17] 杨悦, 王丹, 胡博, 等. 基于改进多智能体 Q 学习的多

- 源最优联合调频控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 135-144.
- YANG Yue, WANG Dan, HU Bo, et al. Multi-source optimal joint frequency modulation control strategy based on improved multi-agent Q-learning[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 135-144.
- [18] 孙华东, 王宝财, 李文锋, 等. 高比例电力电子电力系统频率响应的惯量体系研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(16): 5179-5192.
- SUN Huadong, WANG Baocai, LI Wenfeng, et al. Research on inertia system of frequency response for power system with high penetration electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5179-5192.
- [19] 苗福丰, 唐西胜, 齐智平. 风储联合调频下的电力系统频率特性分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2209-2216.
- MIAO Fufeng, TANG Xisheng, QI Zhiping. Analysis of frequency characteristics of power system based on wind farm-energy storage combined frequency regulation[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2209-2216.
- [20] SHI Q, LIU H, LIU K, et al. Coordinated sending-end power system frequency regulation via UHVDC[J]. Electronics, 2021, 10(16): 1909.
- [21] 唐欣, 张武其, 陈胜, 等. 与 VSC-HVDC 连接的弱电网暂态频率偏移定量计算和调整方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2170-2176.
- TANG Xin, ZHANG Wuqi, CHEN Sheng, et al. Assessment and regulation of transient frequency deviation in weak grid connected to VSC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2170-2176.
- [22] 赵强, 张玉琼, 陈紫薇, 等. 计及储能的低惯量电力系统频率特性分析[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-12 [2022-08-29]. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.221448.
- ZHAO Qiang, ZHANG Yuqiong, CHEN Ziwei, et al. Frequency characteristic analysis of low-inertia power system considering energy storage[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-12[2022-08-29]. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.221448.
- [23] 张剑云, 李明节. 新能源高渗透的电力系统频率特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 3498-3507.
- ZHANG Jianyun, LI Mingjie. Analysis of the frequency characteristic of the power systems highly penetrated by new energy generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3498-3507.
- [24] 李军徽, 冯喜超, 严干贵, 等. 高风电渗透率下的电力系统调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 163-170.
- LI Junhui, FENG Xichao, YAN Gangui, et al. Power system frequency modulation under high wind power penetration[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 163-170.
- [25] 刘洪波, 彭晓宇, 张崇, 等. 风电参与电力系统调频控制策略综述[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(11): 81-92.
- LIU Hongbo, PENG Xiaoyu, ZHANG Chong, et al. Overview of wind power participating in frequency regulation control strategy for power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(11): 81-92.
- [26] 李兴源, 曾琦, 王渝红, 等. 柔性直流输电系统控制研究综述[J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3025-3037.
- LI Xingyuan, ZENG Qi, WANG Yuhong, et al. Control strategies of voltage source converter based direct current transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3025-3037.
- [27] 中国电力企业联合会. 电力系统安全稳定控制技术导则: GB/T 26399—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- China Electricity Council. Technical guide for electric power system security and stability control: GB/T 26399—2011[S]. Beijing: China Standard Press, 2011.

收稿日期: 2022-05-31; 修回日期: 2022-08-31

作者简介:

周霞(1978—), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力通信、电力系统分析与控制; E-mail: zhouxia@njupt.edu.cn

刘懿诗(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析、稳定和控制等; E-mail: 1220055817@njupt.edu.cn

戴剑丰(1989—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为新能源发电并网控制及其对电力系统的影响; E-mail: daijianfeng2012@126.com

张腾飞(1980—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统控制、智能信息处理、智能控制等。E-mail: tfzhang@126.com

(编辑 魏小丽)