

考虑风光储调频贡献度的新型电力系统频率特性

马覃峰¹, 安甦¹, 刘明顺¹, 贺先强¹, 肖柱², 宋东阔², 曾兴嘉²

(1. 贵州电网公司电力调度控制中心, 贵阳 550000; 2. 国电南瑞科技股份有限公司, 南京 210000)

摘要: 风电、光伏等新能源设备大量并网, 系统逐渐呈现出低惯量的特性, 将带来一系列的频率安全问题, 传统的频率特性分析方法难以准确把握新能源参与惯量支撑与一次调频后的系统频率特性变化。为考虑风光储多资源参与下的系统频率特性与态势变化, 首先基于传统频率响应模型构建了考虑风光储的新型频率响应模型并定义风光储调频贡献度指标, 利用频率特性传递函数对系统调频单元进行参数整定; 然后定量分析了电力系统的频率稳定指标, 且从频域角度分析惯性时间常数、各调频单元的控制系数对频率稳定性的影响; 最后通过 MATLAB/Simulink 平台对理论分析进行时域仿真验证。从时域与频域角度对新型电力系统频率特性进行分析的方法可准确预测考虑风光储调频贡献度下的系统频率态势, 为考虑风光储参与惯量支撑与一次调频下的新型电力系统频率安全运行提供了指导依据。

关键词: 新型电力系统; 风光储调频; 调频贡献度; 频率特性分析

Frequency Characteristics of New Power System Considering the Frequency Modulation Contribution of Wind Power-Photovoltaic-Energy Storage

MA Qinfeng¹, AN Su¹, LIU Mingshun¹, HE Xianqiang¹, XIAO Zhu², SONG Dongkuo², ZENG Xingjia²

(1. Power Dispatching and Control Center of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550000, China; 2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 210000, China)

Abstract: A large number of wind power, photovoltaic and other new energy equipment are connected to the power grid, and the system gradually presents the characteristics of low inertia, which will bring a series of frequency safety problems. Traditional frequency characteristic analysis methods are difficult to accurately grasp the changes in system frequency characteristics after the participation of new energy in inertia support and primary frequency modulation. In order to explore the frequency characteristics and situation changes of the system considering the contribution of wind power-photovoltaic-energy storage to frequency modulation, a new frequency response model is constructed based on the traditional frequency response model and the contribution of wind power-photovoltaic-energy storage to frequency modulation is defined. The frequency characteristic transfer function is used to set the parameters of the system frequency modulation unit. Then the frequency stability index of the power system is quantitatively analyzed, and the influence of the inertia time constant and the control coefficient of each frequency modulation unit on the frequency stability is analyzed from the angle of frequency domain. Finally, the theoretical analysis is verified by MATLAB/Simulink platform. The method of analyzing the frequency characteristics of the new power system from the perspective of time domain and frequency domain can accurately predict the frequency situation of the system considering the contribution degree of wind power-photovoltaic-energy storage frequency modulation, and provide guidance for the safe operation of the new power system frequency considering the inertia support of wind power-photovoltaic-energy storage and primary frequency modulation.

Key words: new power system; wind power-photovoltaic-energy storage combined frequency modulation; frequency modulation contribution; frequency characteristic analysis

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61933005); 中国南方电网有限责任公司科技项目(066500JJ52210039)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (61933005); the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (066500JJ52210039).

0 引言

2020年9月我国提出“双碳”战略目标,近年来我国多次部署“构建新型电力系统”等重点工作任务,在“双碳”目标的大力推进下新能源机组将规模化发展,构建以新能源为主体的新型电力系统在新战略要求下处于核心地位。未来新型电力系统的惯量水平不断降低,预计在2060年左右实际的系统等效惯性时间常数会低于3 s,部分新能源高比例区域惯量水平可能会更低,趋于低碳化的能源结构会使我国的电网呈现较低惯量的特性,系统的频率稳定性将面临较大的挑战^[1-8]。

目前由于源侧有功功率与系统频率解耦,电网的频率支撑能力大大降低,为解决此类问题,当下大部分的新能源场站具备一定的惯量支撑与一次调频能力,针对新能源参与下的调频方法已有大量的研究。文献[9-16]研究了以风电、光伏为主的新能源机组参与虚拟惯量支撑与调频的方法,基于新能源参与调频的机理提出了多种虚拟惯量支撑策略以及多资源参与与一次调频的控制策略。

当下以传统电力系统为对象的频率特性分析已趋于成熟,在常规电源“空心化”的态势下,具有低惯量特性的新型电力系统在功率扰动冲击下频率动态稳定性将进一步恶化。因此综合考虑多种调频资源参与调频与频率稳定约束的系统频率态势分析能够为新型电力系统的频率安全提供良好指导,在紧急工况下系统能快速、准确地做出响应与安全措施部署。

目前采用频率响应模型分析系统频率特性的研究较多,文献[17-19]利用频率响应模型对风电、直流输电参与调频进行分析,并总结了新型电力系统频率响应模型的发展现状。文献[20-22]对风电、光伏与储能等新型调频资源的发展进行综述并介绍了新能源参与下系统频率特性分析方法。文献[23]基于三阶同步机模型对储能电站的频率支撑能力进行分析,并对储能机组调频出力贡献力进行了定义与分析。文献[24]以低惯量下的系统为对象,对不同惯性时间常数下的频率曲线进行对比分析。文献[25]分析了计及储能的低惯量系统特征,并从时域角度从不同指标入手对系统频率变化特性进行分析。文献[26-27]分别考虑了风-储与风-储-直参与调频,并从时域与频域角度对电力系统的频率特征

进行了定量分析。上述文献研究只考虑单一化新能源参与系统调频以及新能源渗透率等调频单元内部参数影响,未全面考虑内外部频率响应参数的影响。目前考虑调频资源多元化的新型电力系统频率态势分析的相关研究较为匮乏,且未考虑各调频资源贡献度差异性的需求,难以全面与准确地预测多资源参与惯量支撑与一次调频下的系统频率态势。

针对上述分析,本文从时域与频域的角度对考虑风光储调频贡献度的新型电力系统频率稳定性进行了定量分析,采用模型分析法建立了风光储接入下的改进型电力系统频率响应模型,然后基于改进后的SFR模型进行各调频单元的参数整定,量化分析得出频率动态特性的传递函数,对系统频率稳定性进行分析,计算系统初始频率变化率、最大频率偏差、稳态频率偏差。最后通过MATLAB/Simulink仿真平台构建改进后的频率响应(system frequency response, SFR)模型,对本文所提的考虑风光储调频资源联合参与下新型电力系统频率特性进行分析验证。

1 考虑风光储调频贡献度的频率响应模型

1.1 风光储频率响应模型构建

美国著名的学者安德森于1990年提出经典系统频率响应模型^[28],其原理在于采用了简化再热式汽轮机-调速器环节作为系统等值的原动机与调速器环节,得出了更加简化的模型结构,可作为大电网频率响应的分析模型。对于不同控制方式下频率特性的差异性,本文采用简化模型探究系统的频率特性,重点考虑不同、调频资源之间的频率支撑能力以及对频率特性的变化影响,因此选择了工程应用较为广泛的风电、光伏、储能的控制方式来进行分析,从而重点考虑不同资源及内部控制参数在不同贡献度的条件下对总体频率态势的影响。

本节基于传统火电机组参与调频的频率响应模型,考虑加入风电、光伏和储能机组参与惯量支撑与一次调频,构建了考虑风光储调频贡献度的新型电力系统频率响应模型,如图1所示。

图1中, H 为电力系统等效惯性时间常数; D 为阻尼系数; ΔP_L 为系统有功功率扰动输入; ΔP 为系统功率变化量; R 为一次调频下垂系数; F_H 为原动机高压缸做功系数; T_R 为再热时间常数; k_m 为机械功率因数; T_ω 为惯性响应时间常数; k_{df} 为惯性响

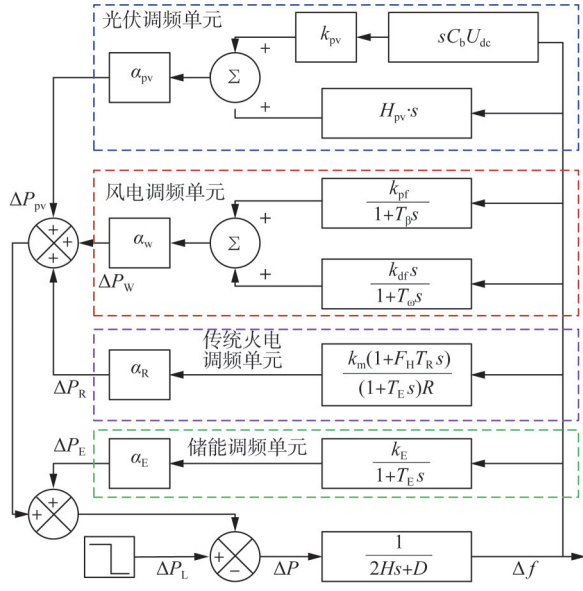


图 1 风光储参与调频下的频率响应模型

Fig. 1 Frequency response model considering the frequency modulation of wind power-photovoltaic-energy storage

应系数; ΔP_w 为惯性控制功率变化量; T_β 为变桨距响应时间常数; k_{pf} 为一次调频系数; ΔP_β 为变桨距控制提供功率变化量; ΔP_w 为风电发电功率增量; H_{pv} 为光伏虚拟惯性时间常数; k_{pv} 为光伏内部控制比例系数, k_E 为储能频率控制比例系数, T_E 为储能响应时间常数; ΔP_E 为储能功率变化量。

风电调频机组综合采用桨距角控制与虚拟惯性控制两种控制模式来构建风机频率响应模型, 通过等效的频率动态响应传递函数来表征风电调频单元有功功率与频率变化量的数量关系, 从而模拟出对整个系统的惯量支撑与一次调频效果。光伏调频机组主要模拟双极式光伏发电的动态特性来实现类似同步机的惯量响应, 保留光伏惯性与外环的 $f \cdot U_{dc}$ 频率弥补关键环节, 对电力系统有一定的惯量响应支撑与调频作用。储能调频单元用于配合风电、光伏机组参与辅助调频, 从而一定程度上缓解风电、光伏机组的调频压力。本文采用的储能调频机组加入频率附加比例系数用于响应系统的有功功率不平衡量, 当系统频率跌落时储能机组输出有功功率增加, 从而改善系统抗扰动能力, 减少系统频率波动。

1.2 风光储调频贡献度指标建立

本文考虑多资源参与新型电力系统调频的情况, 不同调频机组的有功出力在不同工况下各不相同, 本文考虑风电、光伏与储能机组调频在不同的

实际环境中风光储新能源的调频出力贡献程度存在一定差异性。因此, 本节基于 1.1 节构建的新型频率响应模型, 在考虑调频机组内部相关控制参数的同时, 在频率动态响应环节外部加入风光储调频贡献度指标, 用 α 表示。定义调频贡献度 α 为调频机组占整体系统有功出力的比例, 即:

$$\alpha_{w, pv, E, R} = \frac{\Delta P_{w, pv, E, R}}{\Delta P_{system}} \quad (1)$$

式中: $\alpha_{w, pv, E, R}$ 为新能源机组风光储调频贡献度; $\Delta P_{w, pv, E, R}$ 为新能源机组调频出力变化量; ΔP_{system} 为系统全部机组总调频出力变化量。将各机组调频贡献度与调频出力比值标么化, 则各新能源机组调频贡献度之和为 1。

传统频率响应模型考虑新能源接入后, 通常调整原动机环节的相关参数, 以达到考虑新能源渗透率比重的效果, 不同于重点探究新能源渗透率的模型构建, 本文侧重于通过改变各机组的调频贡献度调整风光储调频有功出力, 从而体现在不同工况下的新能源调频贡献度差异性。考虑太阳能资源丰富而风力资源稀缺的工况, 可提升光伏机组调频贡献度并降低风电机组调频贡献度; 考虑风光调频能力不足, 加入储能机组辅助调频的工况下, 则提升储能机组的调频贡献度。

综上, 引入风光储调频贡献度指标能较好地模拟不同工况下各新能源机组的调频出力程度, 结合各机组内部控制参数能够更好地分析风光储参与调频下的新型电力系统频率特性。

2 基于改进频率响应模型的新型电力系统参数整定

2.1 火电机组调频参数整定

作为传统频率响应模型的主要环节, 火电单元保留了惯量支撑的模块, 利用增益系数来进行频率响应修正, 参考图 5 的改进型 SFR 模型可知系统功率与频率的相互关系为:

$$\Delta f = \frac{1}{2Hs + D} \cdot \Delta P \quad (2)$$

当有功功率扰动输入为 ΔP_L 时, 电力系统的功率变化量为:

$$\begin{aligned} \Delta P &= -\Delta P_L - \Delta P_{pv} - \Delta P_w - \Delta P_R - \Delta P_E \\ &= -\Delta P_L - (G_{pv}(s) + G_w(s) + G_R(s) + G_E(s)) \cdot \Delta f \end{aligned} \quad (3)$$

式中： ΔP 为系统功率变化量； ΔP_{pv} 为光伏单元功率变化量； ΔP_w 为风电单元功率变化量； ΔP_R 为传统火电单元功率变化量； ΔP_E 为储能单元功率变化量； Δf 为频率变化量； $G_{pv}(s)$ 、 $G_w(s)$ 、 $G_R(s)$ 、 $G_E(s)$ 分别为光伏、风电、火电、储能的单元频率响应传递函数表达式。

根据 SFR 模型中对传递函数的定义可知，系统频率响应的传递函数为有功变化量和频率变化量的比值，则火电机组的频率响应传递函数的表达式为：

$$G_R(s) = \frac{\Delta P_R(s)}{\Delta f(s)} = \frac{k_m(1 + F_H T_R s)}{(1 + T_R s) \cdot R} \quad (4)$$

2.2 风电机组调频参数整定

由 1.1 节所述可知，风电机组单元分为两个部分，分别为转子惯性控制环节和风机桨距角控制环节，通过惯性控制的有功变化量 ΔP_ω 及变桨距控制的有功变化量 ΔP_β 来实现风电调频单元的惯量支撑以及调频功能。其中转子惯性控制动作速度迅速且响应时间区间小，利用传统的源侧响应模块等效风电机组的惯性响应部分，对于惯性响应模块，其有功支撑变化量的表达式为：

$$\Delta P_\omega(s) = \frac{k_{df}s}{1 + T_\omega s} \cdot \Delta f(s) \quad (5)$$

则风电机组用于虚拟惯量支撑的控制模块频率响应传递函数为：

$$G_\omega(s) = \frac{\Delta P_\omega(s)}{\Delta f(s)} = \frac{k_{df}s}{1 + T_\omega s} \quad (6)$$

式中 Δf 为电力系统频率变化量。

桨距角控制环节采用传统同步机组一次调频控制方式模拟替代风机一次响应能力，其控制模块有功功率支撑变化量的表达式为：

$$\Delta P_\beta(s) = \frac{k_{pf}}{1 + T_\beta s} \cdot \Delta f(s) \quad (7)$$

则风电机组的桨距角控制模块频率响应传递函数为：

$$G_\beta(s) = \frac{\Delta P_\beta(s)}{\Delta f(s)} = \frac{k_{pf}}{1 + T_\beta s} \quad (8)$$

风电机组参与系统惯量支撑与调频时，风电模块的总功率变化量 $\Delta P_w(s)$ 为惯性控制环节功率变化量与桨距角控制环节的功率变化量之和，即：

$$\Delta P_w(s) = \Delta P_\omega(s) + \Delta P_\beta(s) \quad (9)$$

结合式(5)、(7)和式(8)可得：

$$\begin{aligned} \Delta P_w(s) &= [G_\omega(s) + G_\beta(s)] \cdot \Delta f(s) \\ &= -\frac{(k_{df}T_\beta)s^2 + (k_{df} + k_{pf}T_\omega)s + k_{pf}}{T_\omega T_\beta s^2 + (T_\omega + T_\beta)s + 1} \cdot \Delta f(s) \end{aligned} \quad (10)$$

则风电机组的总体频率响应传递函数为：

$$\begin{aligned} G_w(s) &= \frac{\Delta P_w(s)}{\Delta f(s)} \\ &= -\frac{(k_{df}T_\beta)s^2 + (k_{df} + k_{pf}T_\omega)s + k_{pf}}{T_\omega T_\beta s^2 + (T_\omega + T_\beta)s + 1} \end{aligned} \quad (11)$$

2.3 光伏机组调频参数整定

本文基于光伏机组的虚拟惯量控制策略提出一种双极式发电的高压直流电容电压方程，其表达式为：

$$C_b U_{dczero} \frac{dU_{dc}}{dt} = P_{dc} - P_g \quad (12)$$

式中： C_b 为高压直流电容； U_{dc} 、 U_{dczero} 分别为高压直流电压和高压直流电压初始值； P_{dc} 为直流输出功率； P_g 为光伏发电输出功率。

对式(11)进行线性化处理得：

$$\begin{cases} C_b U_{dczero} \frac{dU_{dc}}{dt} = \Delta P_{pv} \\ \Delta U_{dc} = \frac{1}{C_b U_{dczero} \cdot s} \cdot \Delta P_{pv} \end{cases} \quad (13)$$

式中 ΔP_{pv} 、 ΔU_{dc} 分别为光伏单元功率变化量、高压直列电压变化量。

根据式(12)–(13)可得光伏发电机组的频率响应传递函数为：

$$\begin{aligned} G_{pv}(s) &= \frac{\Delta P_{pv}}{\Delta f} = k_{pv} C_b U_{dczero} \cdot s + H_{pv} \cdot s \\ &= (k_{pv} C_b U_{dczero} + H_{pv}) \cdot s \end{aligned} \quad (14)$$

在频率扰动前后光伏阵列输出功率的稳态值不变，该动态过程可以看做是虚拟惯量控制的效果。

2.4 储能机组调频参数整定

本文采用的电化学储能装置以直流形式进行充放电，可利用换流器实现有功功率的调节，系统的频率变化量通过比例系数调制后在内环控制下得到功率变化量，其表达式为：

$$\Delta P_E = \frac{k_E}{T_E s + 1} \cdot \Delta f \quad (15)$$

由式(15)可得到储能机组参与调频的频率响应传递函数表达式为：

$$G_E(s) = \frac{\Delta P_E(s)}{\Delta f(s)} = \frac{k_E}{T_E s + 1} \quad (16)$$

2.5 考虑风光储调频贡献度的新型电力系统参数整定

对于高比例新能源接入下的电力系统, 由于其常规火电一次调频能力有限且常规同步机组被大量新能源机组取代, 新型电力系统往往会呈现低惯量水平, 系统抗扰动的能力较弱, 因此需要考虑新能源机组如风电、光伏、储能机组主动参与惯量支撑与调频, 本节综合考虑风光储调频贡献度下的频率特性传递函数, 基于改进型 SFR 模型进行参数整定。

根据式(2)~(3)可知含风光储调频资源的新颖电力系统的传递函数表达式为:

$$G_{\text{sys}}(s) = \frac{\Delta f(s)}{\Delta P_L(s)} = \frac{-1}{(G_{\text{pv}}(s) \cdot \alpha_{\text{pv}} + G_{\text{w}}(s) \cdot \alpha_{\text{w}} + G_{\text{R}}(s) \cdot \alpha_{\text{R}} + G_{\text{E}}(s) \cdot \alpha_{\text{E}} + 2Hs + D)} = \frac{-1}{\left\{ \begin{aligned} &(k_{\text{pv}}C_{\text{b}}U_{\text{dc}} + H_{\text{pv}})s \cdot \alpha_{\text{pv}} + \frac{(k_{\text{df}}T_{\beta})s^2 + (k_{\text{df}} + k_{\text{pf}}T_{\omega})s + k_{\text{df}}}{T_{\omega}T_{\beta}s^2 + (T_{\omega} + T_{\beta})s + 1} \cdot \alpha_{\text{w}} + \\ &\frac{k_{\text{m}}(1 + F_{\text{H}}T_{\text{R}}s)}{(1 + T_{\text{R}}s) \cdot R} \cdot \alpha_{\text{R}} + \frac{k_{\text{E}}}{1 + T_{\text{E}}s} \cdot \alpha_{\text{E}} + 2Hs + D \end{aligned} \right\}}$$

由公式(17)可得系统频率变化的频域表达式:

$$\Delta f(s) = G_{\text{sys}}(s) \cdot \Delta P_L(s) = \frac{-BQF \cdot \Delta P_L(s)}{\{ABQF \cdot s + CQF + EBF + k_{\text{E}}BQ + (2Hs + D)BQF\}}$$

式中 A 、 B 、 Q 、 E 、 F 为频域微分算子 s 的多项式, 且满足:

$$\begin{cases} A = (k_{\text{pv}}C_{\text{b}}U_{\text{dc}}\alpha_{\text{pv}} + H_{\text{pv}}) \\ B = T_{\omega}T_{\beta}\alpha_{\text{w}}s^2 + (T_{\omega} + T_{\beta})s + 1 \\ C = (k_{\text{df}}T_{\beta}\alpha_{\text{w}})s^2 + (k_{\text{df}} + k_{\text{pf}}T_{\omega})\alpha_{\text{w}}s + k_{\text{df}} \\ Q = \alpha_{\text{R}}(1 + T_{\text{R}}s)R \\ E = k_{\text{m}}\alpha_{\text{R}}(1 + F_{\text{H}}T_{\text{R}}s) \\ F = (1 + T_{\text{E}}s)\alpha_{\text{E}} \end{cases} \quad (19)$$

3 考虑风光储调频贡献度的新型电力系统频率稳定指标与参数分析

电力系统的频率稳定性是指系统在受到有功功率扰动后, 频率能够保持或及时恢复至规定内安全的范围内而不发生频率跌落或崩溃的能力。在对系统频率稳定进行研究时, 通常考虑以频率变化率 (RoCoF)、最大频率偏差 (Δf_{max}) 和稳态频率偏差 ($\Delta f_{\text{steady-state}}$) 作为边界指标来考察频率稳定性, 本节

结合公式法分析系统频率稳定指标, 从频域角度对调频相关参数进行理论分析。

3.1 系统频率稳定指标分析

当电力系统出现一定量的扰动时, 根据初值定理可计算在风光储协调下的系统频率初始变化率。初值定理的计算公式为:

$$S_0 = \lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{d\Delta f(t)}{dt} = \lim_{s \rightarrow +\infty} s^2 \Delta f(s) = \lim_{s \rightarrow +\infty} s^2 G_{\text{sys}}(s) \frac{\Delta P_L}{s} \quad (20)$$

根据式(20)可求得系统初始频率变化率为:

$$|S_0| = \left| \lim_{s \rightarrow +\infty} s^2 G_{\text{sys}}(s) \frac{\Delta P_L}{s} \right| = \frac{\Delta P_L}{2(k_{\text{pv}}C_{\text{b}}U_{\text{dc}}\alpha_{\text{pv}} + H_{\text{pv}}) \cdot H} \quad (21)$$

根据上述公式可知, 当发生一定量的有功功率扰动时, 系统的初始频率变化率与光伏机组内部各项参数与系统惯性时间常数有关, 由此可知光伏机组调频贡献度确定的情况下通过改变光伏调频单元的相关参数以及系统等效惯性时间常数即可影响系统初始频率变化率, 光伏调频提供的惯量支撑越大或系统固有惯量水平越高则其初始频率变化率的绝对值越小, 系统在受到扰动的初期频率跌落更慢, 频率特性更加安全与稳定。

系统在发生扰动后频率会快速跌落, 在频率峰值的时刻也是系统的最大频率偏差时刻, 根据式(18)可得频率变化的频域表达式, 利用拉氏变换可将频域表达式改为时域表达式。

$$\Delta f(t) = L^{-1} \left\{ \frac{-\Delta P_L}{\left\{ (G_{\text{pv}}(s) \cdot \alpha_{\text{pv}} + G_{\text{w}}(s) \cdot \alpha_{\text{w}} + G_{\text{R}}(s) \cdot \alpha_{\text{R}} + \frac{k_{\text{E}}}{1 + T_{\text{E}}s} \cdot \alpha_{\text{E}} + 2Hs + D) \right\} s} \right\} \quad (22)$$

对式(22)求导, 在系统频率变化率为0的时刻则为系统频率达到峰值的时刻, 则系统最大频率偏差可表示为:

$$\begin{cases} \Delta f_{\text{max}} = \Delta f(t) |_{t = t_{\text{nadir}}} \\ \left. \frac{d\Delta f(t)}{dt} \right|_{t = t_{\text{nadir}}} = 0 \end{cases} \quad (23)$$

由式(23)可知, 系统的最大频率偏差和系统惯性时间常数、调频控制参数和系统有功扰动量大小有关。因此在系统有功扰动与机组调频参数一定的

情况下系统的惯性时间常数越大,系统的最大频率偏差值越小。

系统的稳态频率偏差直接反映了电力系统的稳态频率特性,利用终值定理定量计算在受到有功扰动后的电力系统稳态频率偏差。终值定理的计算公式为:

$$\Delta f_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot G_{sys}(s) \cdot \frac{\Delta P_L}{s} \quad (24)$$

根据式(23)可求出系统稳态频率偏差表达式为:

$$\begin{aligned} \Delta f_{ss} &= \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot G_{sys}(s) \cdot \frac{\Delta P_L}{s} \\ &= \frac{-R\Delta P_L}{\alpha_R k_m + R(\alpha_w k_{pf} + \alpha_E k_E + D)} \end{aligned} \quad (25)$$

由式(25)可知,稳态频率偏差与火电机组调频贡献度以及一次调频下垂系数、储能机组调频贡献度以及内部控制系数、风电机组调频贡献度和控制系数有关,与光伏机组的相关参数以及系统惯性时间常数无关。

在各机组调频贡献度确定的情况下,若考虑储能控制比例系数对电力系统频率特性的影响,对式(24)中的系数求偏导得:

$$\frac{\partial \Delta f_{ss}}{\partial k_E} = \frac{R^2 \Delta P_L}{\{k_m + R(k_{pf} + k_E + D)\}^2} \quad (26)$$

由式(26)推导结果可知,当有功扰动量大于0时,稳态频率误差对储能控制比例系数的偏导大于0,即随着储能控制比例系数的增加电力系统的稳态频率偏差值减小,可知随着储能控制比例系数的增加电力系统频率稳态特性相应提升。

3.2 系统调频内部参数频域分析

本节基于频率响应传递函数进行定量分析,通过研究各调频频率相应环节结合的闭环传递函数来分析系统调频内部关键控制参数对频率特性的影响,本节利用伯德图对储能控制比例系数进行量化分析。

根据3.1节可知,风光储调频单元内部参数对系统频率稳定指标均有一定影响,风电调频内部参数影响系统最大频率偏差及稳态偏差,而光伏机组则对系统初始频率变化率及最大频率偏差具有明显影响作用。在风电、光伏机组联合参与的工况下储能机组可辅助参与频率支撑从而缓解其余新能源机组调频压力。由3.2节可知,储能机组内部控制比

例系数的上升能减少频率最大频率偏差与稳态频率偏差从而提升系统频率稳定性,下面通过Bode图分析不同控制比例系数下的频率幅-相曲线,其中设置储能单元内部控制系数分别为15、10、5。

通过上述分析可知随着储能控制系数的增大,系统的频率特性得到改善,更有利于系统频率稳定。根据图2可知,当相位为正的情况下储能比例系数的增大使得频率幅值变小,说明在其余机组参数与扰动不变的情况下系统的频率偏差变小,当相位为负时幅值的变化与正相位时相反;当频率趋向于高频段时不同控制参数下的系统频率特性相同。

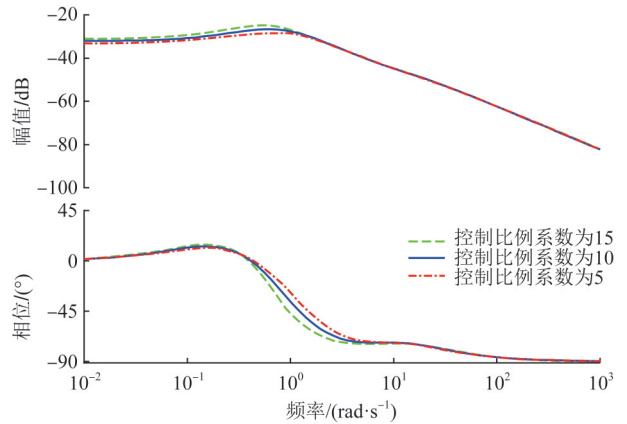


图2 不同储能控制比例系数下的频率特性伯德图

Fig. 2 Bode diagram of frequency characteristics under different proportional coefficients of energy storage control

3.3 惯性时间常数对系统频率稳定性影响分析

根据3.1节稳定指标分析可知系统惯性时间常数对系统频率的动态特性具有关键影响,系统频率稳定性将随着惯性时间常数的增加而增加,结合上述基于数学分析法推导的理论结果,本文从频域角度出发,以闭环传递函数根轨迹图作为研究工具对惯性时间常数进行定量分析,从而利用特征根轨迹图法量化分析内部参数对频率稳定性的影响态势:由图3可知频率特性传递函数均处在左半平面,因此考虑风光储机组参与调频下的系统频率特性是较为稳定的;根据仿真测量可得,最左侧极点值随着 H 的增大分别为-16、-17.2、-18.9,靠近虚轴的零点值分别为-0.474、-0.512、-0.558,因此在惯性时间常数增大的情况下,根轨迹图上的零极点与虚轴间的距离也随着增加,因此从频域角度定量分析可知增加系统惯性时间常数 H 能提升系统的频率稳定性。

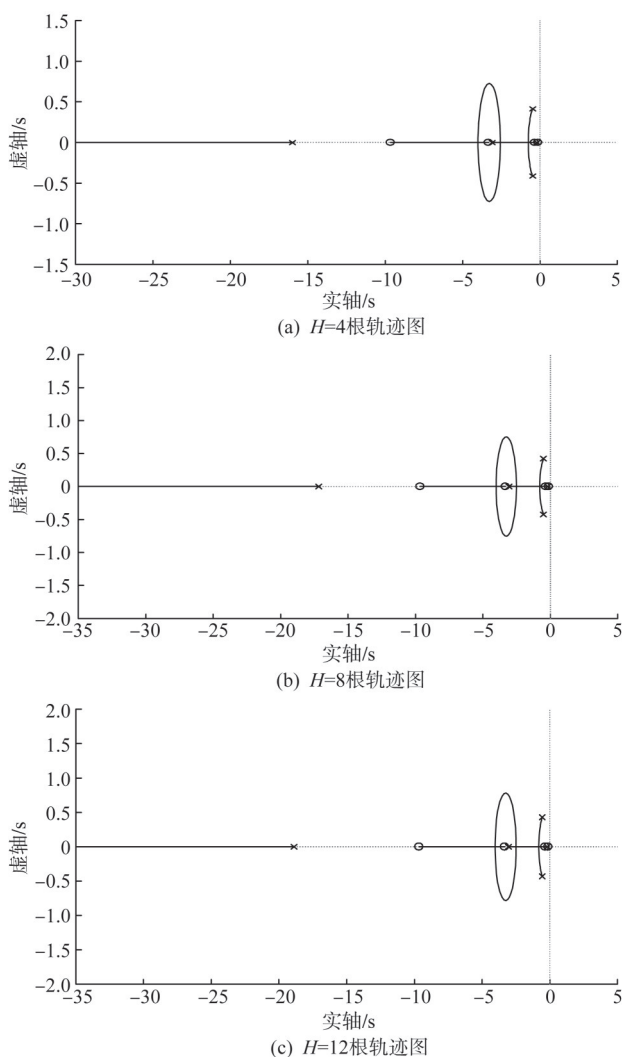


图3 不同惯性时间常数对系统稳定影响根轨迹图

Fig. 3 Root locus of influence of different inertial time constants on system stability

4 算例仿真分析

基于 MATLAB/Simulink 搭建考虑风光储参与虚拟惯量支撑与一次调频贡献度的新能源电力系统频率响应模型。在传统火电调频参与的 SFR 模型基础上加入风光储调频单元,风电调频单元采用惯性响应与变桨一次调频控制来呈现惯性支撑与调频效果。光伏调频机组则利用高压侧直流电容的动态特性来模拟同步发电机的惯量响应与频率支撑作用。用于辅助参与调频的储能机组则聚合为一个低阶模型,其本质与传统的火电调速器效果类似。下文分析在不同工况下新型电力系统的频率特性变化,负荷为 1 000 MW,风电额定功率为 200 MW,最大有

功扰动量的变化范围为 100~200 MW (0.1 ~0.2 p. u.)。

4.1 考虑风光储贡献度差异性的系统频率特性分析

为了验证风光储共同参与系统惯量支撑与一次调频的优越性,本节对 3 种不同新能源贡献度 4 情况下的频率特性进行定量分析,对多资源参与调频下的电力系统频率响应情况进行对比与分析。

其中,各机组的初始参数设置见表 1。分别对火电单独调频、风-光机组参与调频以及风光储联合参与调频 3 种方式进行仿真,火电单独调频时设置风光储调频贡献度 α 均为 0。风光参与调频时风电调频贡献度为 0.3,光伏调频贡献度为 0.2,火电调频贡献度为 0.5。风光储参与调频时风电调频贡献度为 0.2,光伏调频贡献度为 0.2,储能调频贡献度为 0.1。通过仿真探究不同调频资源参与下的频率特性曲线,如图 4 所示。

表 1 系统参数设定值

Tab. 1 System parameter settings

参数	数值
R	0.05
D	2
k_m	0.95
F_H	0.3
C_b	1
U_{dc}	0.8
k_{pv}	4
H_{pv}/s	2
T_R/s	8
H/s	4
k_{df}	8
k_{pf}	20
T_{β}/s	3
T_E/s	0.3
k_E	5

表 2 为 3 种调频方式下的电力系统频率特征仿真量化结果。

根据图 4 及表 2 可知,本节考虑不同调频资源贡献度的情况,在传统调频单元贡献度不变的情况下,风光机组参与后新能源调频贡献度提升,相较于单一火电机组参与调频的传统电力系统,系统频率特性更稳定,在加入储能机组辅助调频后系统频

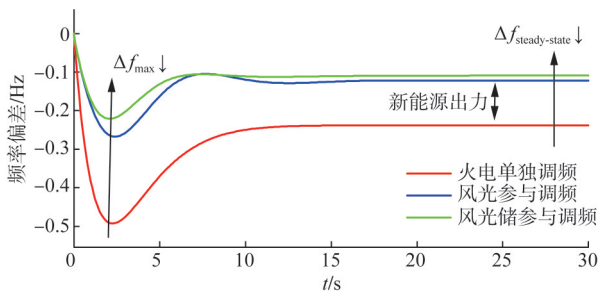


图4 不同调频资源参与下的电力系统频率曲线
Fig. 4 Frequency curves of power system with different frequency modulation resources

表2 电力系统频率特征仿真值
Tab. 2 Frequency characteristic simulation values of power system

调频控制模式	最大频率偏差 /Hz	稳态频率偏差 /Hz	初始频率变化率 /(Hz·s ⁻¹)
单一火电	-0.494 6	-0.283 2	-0.244 7
风光	-0.278 4	-0.142 3	-0.197 5
风光储	-0.219 4	-0.128 9	-0.184 2

率特性进一步改善。在扰动量与惯性时间常数不变的情况下光伏机组的虚拟惯量控制策略使得系统的频率变化率减缓,频率特性得到了提升。相较于单一的火电调频,新能源机组参与下的最大频率偏差绝对值大大减小。在加入储能机组调频后,系统的稳态频率偏差的绝对值也进一步减小,进而证明了考虑风光储调频贡献度对提升频率特性的有效性。因此,考虑风光储新能源调频贡献度的新型电力系统频率特性分析具有可行性。

4.2 考虑光伏机组调频贡献度的系统频率特性分析

对于部分地区存在风力资源稀缺且太阳能资源丰富情况,本节考虑提升光伏机组调频贡献度,分析在多资源参与下的控制模式下电网频率稳定性受到光伏控制比例系数的影响,通过增大内部参数增加光伏机组的有功出力,进一步论证光伏机组参与频率调节的有效性。其中系统各机组参数保持初始设置不变,参见表1,光伏调频贡献度为0.4,风电调频贡献度为0.1且不考虑储能机组参与辅助调频。光伏内部控制比例系数从初始值2递增到6,仿真波形图如图5所示。

根据图5和表3可知,在光伏比例系数递增的情况下频率响应曲线的最大频率偏差的绝对值减小,分别从0.224 9 Hz减小到了0.214 5 Hz;初始

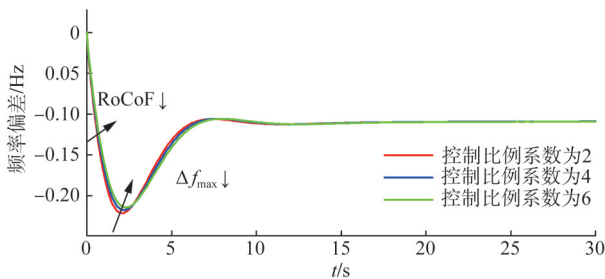


图5 不同光伏比例系数下的电力系统频率曲线
Fig. 5 Frequency curves of power system under different photovoltaic proportional coefficients

频率变化率绝对值由最初的0.724 5 Hz/s减小到了0.578 4 Hz/s。由此可知,在其余新能源机组调频参数确定的情况下,考虑光伏调频贡献度增大的情况,随着光伏单元的控制参数增加系统频率达到调频峰值的时间提前,初始频率变化率降低,更有利于新型电力系统的频率稳定性,系统在功率扰动下的频率变化更小,此外,光伏控制比例系数与系统稳态频率偏差无关,与3.2节的频率指标分析结论相符。

表3 电力系统频率特征仿真值(光伏)
Tab. 3 Frequency characteristic simulation values of power system (photovoltaic)

光伏比例系数设置	初始频率变化率 Hz/s	最大频率偏差/Hz
2	-0.724 5	-0.224 9
4	-0.654 1	-0.221 0
6	-0.578 4	-0.214 5

4.3 考虑储能机组调频贡献度的系统频率特性分析

储能机组可辅助参与系统调频,在风、光机组出力不足的情况下提供必要的惯量支撑与一次调频能力,本节考虑提升储能调频贡献度,探究在风光调频贡献度不足的情况下考虑储能辅助调频的优越性。考虑储能调频贡献度为0.3,风光调频贡献度均为0.1。通过增加储能比例系数来增加储能机组的有功出力,储能比例系数从初始值5递增到15,其余各机组参数保持初始设置不变,参见表1,仿真波形图如图6-7所示。

根据图6可知,随着储能比例系数的增加,储能机组的有功出力增加,考虑储能调频贡献度较大的情况下储能机组对系统的调频贡献提升,在风光调频贡献度较小的情况下给予系统必要的惯量支撑

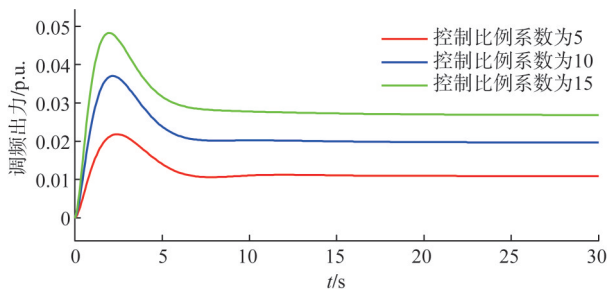


图 6 不同储能比例系数下的储能机组有功出力曲线

Fig. 6 Active power output curves of energy storage units under different proportional coefficients of energy storage

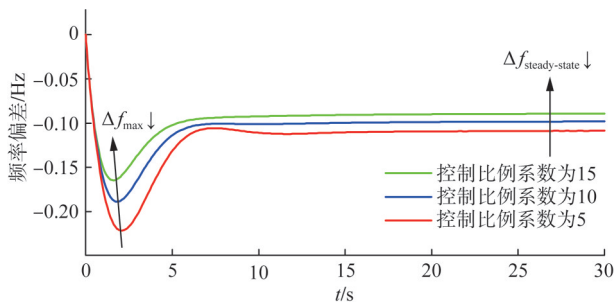


图 7 不同储能比例系数下的电力系统频率曲线

Fig. 7 Frequency curves of power system under different proportional coefficients of energy storage

与调频能力; 根据图 7 和表 4 可知, 在储能比例系数递增的情况下, 频率响应曲线的最大频率偏差的绝对值减小, 分别从 0.223 4 Hz 减小到了 0.167 4 Hz; 稳态频率偏差绝对值由最初的 0.127 5 Hz 减小到了 0.094 8 Hz。由此可知, 在其余新能源机组调频参数确定的情况下, 随着储能单元的内部控制比例系数增加, 系统频率达到调频峰值的时间提前, 稳态的情况下储能机组可提供的有功出力增加, 系统稳态频率偏差减小更有利于新型电力系统的频率稳定性, 系统在功率扰动下的频率变化更小, 与 3.1 节的公式推导结论相符, 论证了 3.2 节频域理论分析的结论。

4.4 惯性时间常数对系统频率的影响分析

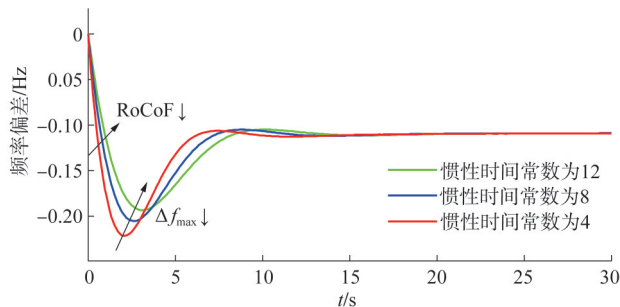
本节分析不同的系统惯性时间常数对频率特性

表 4 电力系统频率特征仿真值(储能)

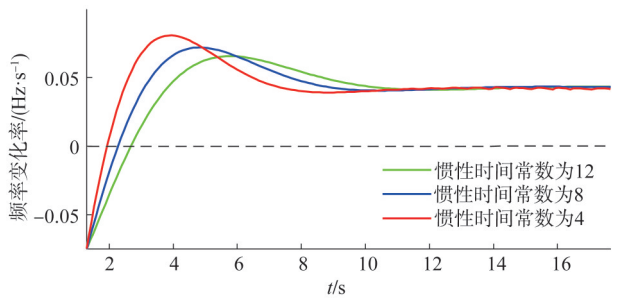
Tab. 4 Frequency characteristic simulation values of power system(energy storage)

储能比例系数设置	最大频率偏差/Hz	稳态频率偏差/Hz
5	-0.223 4	-0.127 5
10	-0.185 3	-0.112 7
15	-0.167 4	-0.094 8

的影响, 从频率变化率、最大频率偏差以及稳态频率偏差对影响进行分析对比。其中各新能源参数保持初始值不变, 见表 1, 火电机组调频贡献度为 0.5, 风电调频贡献度为 0.2, 光伏调频贡献度为 0.2, 储能调频贡献度为 0.1。惯性时间常数分别设置为 4、8、12, 如图 8 为不同参数下的频率曲线和频率变化率曲线。



(a) 不同惯性时间常数下的频率偏差曲线



(b) 不同惯性时间常数下的频率变化率曲线

图 8 不同惯性时间常数对系统频率变化的影响

Fig. 8 Influence of different inertia time constants on system frequency variation

根据图 8 与表 5 可知, 当系统惯性时间常数分别为 $H=4$ 、 $H=8$ 、 $H=12$ 时: 随着惯性时间常数的增加, 系统的初始频率变化率从 -0.7458 Hz/s 减小到 -0.1587 Hz/s ; 最大频率偏差随着惯性时间常数的增加从 -0.2212 Hz 减小到 -0.1932 Hz , 相应的到达最大频率偏差的时间延后, 分别为 2.119 s、2.689 s、3.122 s; 随着惯性时间常数的增加, 频率的稳态频率偏差不变。

综上所述, 在风光储联合参与调频的情况下, 各调频机组参数保持不变的情况下, 系统惯性时间常数越大系统初始频率变化率的绝对值越小, 系统频率跌落的越慢, 同时系统的频率偏差最大值变小, 达到频率峰值的时间延后, 系统的频率稳定性越强。系统频率的稳态值不变, 与系统的惯性时间常数大小无关, 与 3.1 节的结论一致, 同时论证了

表 5 电力系统频率特征仿真数值

Tab. 5 Frequency characteristic simulation values of power system

H/s	初始频率变化 率 Hz/s	最大频率偏 差/Hz	最大频率偏 差时间/s	稳态频率偏 差/Hz
4	-0.745 8	-0.221 2	2.119	-0.128 9
8	-0.318 5	-0.205 0	2.689	-0.128 9
12	-0.158 7	-0.193 2	3.122	-0.128 9

3.3 节的频域理论分析结果。

4.5 调频贡献度对系统频率影响分析

本节分析不同的调频贡献度对系统频率指标,即最大频率偏差、稳态频率偏差的量化关系。以风电调频贡献度为例,分别设置贡献度指标范围是 0.1~0.5,刻度为 0.05。考虑风电调频单元内部的控制参数不变,分别仿真得出不同调频贡献度下的频率偏差绝对值,如图 9 所示。

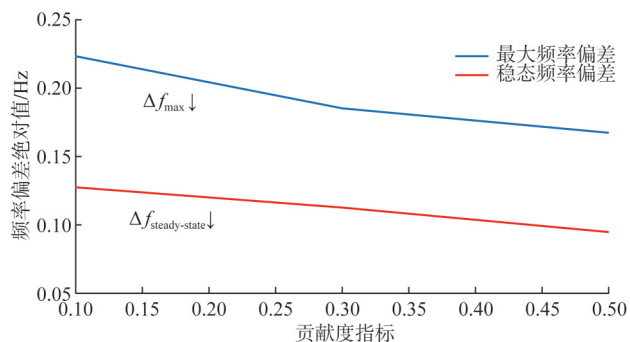


图 9 贡献度与频率指标的量化关系

Fig. 9 Quantitative relationship between contribution degrees and frequency indexes

由图 9 可知,随着调频单元的外部频率贡献度指标的增加,最大频率偏差与稳态频率偏差绝对值均减小,因此可知在各调频单元内部控制参数恒定的情况下,调整调频出力贡献度的大小能够改变各单元的有功出力程度,对系统的频率支撑效果也有一定影响,通过增加调频出力贡献度能较好地改善系统的稳态频率稳定性,减少系统频率跌落深度,从而更好地调用风光储调频单元对受扰动后的系统频率进行支撑与恢复,这与 3.1 节的部分结论一致。

5 结论

针对风光储新能源参与系统惯量支撑与一次调频的新型电力系统频率稳定问题,本文从时域仿

真、频域仿真多角度分析考虑风光储调频贡献度的新型电力系统频率特性,探究了考虑多资源参与调频后的系统频率态势,并利用仿真模型法验证了考虑风光储调频贡献度的可行性以及多角度定量分析频率特性的有效性,并得出以下结论。

1) 基于经典的频率响应模型,构建计及多种新能源调频贡献度的简化模型,能够在保证结果精确性的同时大大降低计算量并定量分析不同工况下的新型电力系统频率特性。考虑风光储调频贡献度的同时,通过对频率特性传递函数、频率变化率、最大频率偏差及稳态频率偏差等频率特性指标的定量分析,能较好地把握风光储参与下的系统频率态势。

2) 在传统的新型电力系统频率响应模型基础上考虑加入风光储调频出力贡献度指标,能更好地量化不同调频资源的参与度,能考虑实际工况下调频资源不同的参与场景。在各调频单元内部控制参数一定的情况下,增加风光储调频出力贡献度指标能改善系统的最大频率跌落以及稳态频率偏差情况,更好地从多角度对新型电力系统的频率态势做出判断与分析。

3) 考虑风光储参与惯量支撑与一次调频的情况下,相较于单一火电调频模式下系统的动态与稳态频率特性均得到了较大改善,提升了系统的频率稳定性;当系统有功扰动与惯性时间常数一定时风光储机组内部控制参数变化能调整机组有功出力,并直接影响系统频率特性指标,风光储调频内部控制系数的增加能改善系统的动态与稳态特性。当系统有功扰动输入和调频资源确定的情况下系统惯性时间常数的增加使系统初始频率变化率绝对值变小,峰值频率升高,使系统频率稳定性得到改善,但惯性时间常数的变化与系统稳态频率特性无关。

4) 对于新能源参与调频的改进系统频率响应模型由于等效简化仍存在一定的误差问题,关于简化频率响应模型的精确性以及系统频率特性指标的量化分析的多元化还有待进一步研究。

参考文献

- [1] 文云峰,杨伟峰,汪荣华,等. 构建 100% 可再生能源电力系统述评与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1843 - 1855.
WEN Yunfeng, YANG Weifeng, WANG Ronghua, et al. Review and prospect of constructing 100% renewable energy

- power System [J]. Proceedings of the CSEE, 20, 40(6): 1843 – 1855.
- [2] 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.
- [3] 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 – 3006.
- [4] 张武其,文云峰,迟方德,等. 电力系统惯量评估研究框架与展望[J]. 中国电机工程学报,2021,41(20):6842 – 6856.
- ZHANG Wuqi, WEN Yunfeng, CHI Fangde, et al. Research framework and prospect of power system inertia estimation [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(20):6842 – 6856.
- [5] 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. Safety domain of inertia: concept, characteristics and evaluation method [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(9): 3065 – 3079.
- [6] 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. Research and judgment on the development of Chinese electric power system towards the goal of carbon peak carbon neutrality [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18):6245 – 6259.
- [7] 孙华东,许涛,郭强,等. 英国“8·9”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 中国电机工程学报,2019,39(21):6183 – 6192.
- SUN Huadong, XU Tao, GUO Qiang, et al. Analysis of the “8·9” power outage in Britain and its implications for China’s Power Grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6183 – 6192.
- [8] 赵国涛,钱国明,王盛“双碳”目标下绿色电力低碳发展的路径分析[J]. 华电技术,2021,43(6):11 – 20.
- ZHAO Guotao, QIAN Guoming, WANG Sheng. The path analysis of low-carbon development of green electricity under the “dual carbon” goal [J]. Huadian Technology, 2021, 43(6): 11 – 20.
- [9] 张旭,陈云龙,岳帅,等. 风电参与电力系统调频技术研究的回顾与展望[J]. 电网技术,2018,42(6):1793 – 1803.
- ZHANG Xu, CHEN Yunlong, YUE Shuai, et al. Review and prospect of frequency modulation technology of wind power system [J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1793 – 1803.
- [10] 岳思恺,赵维兴,姚刚,等. 光伏/光储参与调频的参数设计方法及对比分析[J]. 南方电网技术, 2023,17(4):77 – 89.
- YUE Sikai, ZHAO Weixing, YAO Gang, et al. Parameter design method and comparative analysis of photovoltaic/optical storage participating in frequency modulation [J]. Southern Power System Technology, 2023,17(4):77 – 89.
- [11] 戴仲覆,陈刚,赵利刚,等. 一种适用于电网高频问题的风机虚拟惯量控制策略[J]. 南方电网技术,2018,12(5):56 – 61.
- DAI Zhongfu, CHEN Gang, ZHAO Ligang, et al. A fan virtual inertia control strategy for high frequency problem of power grid [J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(5):56 – 61.
- [12] 胡泽春,夏睿,吴林林,等. 考虑储能参与调频的风储联合运行优化策略[J]. 电网技术,2016,40(8):2251 – 2257.
- HU Zechun, XIA Rui, WU Linlin, et al. Optimization strategy of wind storage combined operation considering energy storage participating in frequency modulation [J]. Power System Technology, 2016, 40(8):2251 – 2257.
- [13] 严干贵,张善峰,贾祺,等. 光伏发电主动参与电网频率调节的机理分析[J]. 太阳能学报,2021,42(8):191 – 199.
- YAN Gangui, ZHANG Shanfeng, JIA Qi, et al. Mechanism analysis of PV generation actively participating in power grid frequency regulation [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(8):191 – 199.
- [14] 杨慧彪,贾祺,项丽,等. 双级式光伏发电虚拟惯量控制策略[J]. 电力系统自动化,2019,43(10):87 – 94.
- YANG Huibiao, JIA Qi, XIANG Li, et al. Virtual inertia control strategy for two-stage photovoltaic power generation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(10):87 – 94.
- [15] 李欣然,黄际元,陈远扬,等. 大规模储能电源参与电网调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016,44(7):145 – 153.
- LI Xinran, HUANG Jiyuan, CHEN Yuanyang, et al. Review of large-scale energy storage power supply participating in frequency modulation [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7):145 – 153.
- [16] 谢惠藩,王超,刘湃泓,等. 南方电网储能联合火电调频技术应用[J]. 电力系统自动化,2021,45(4):172 – 179.
- XIE Huifan, WANG Chao, LIU Baihong, et al. Application of energy storage combined with thermal power frequency modulation technology in China Southern Power Grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(4): 172 – 179.
- [17] DAI Jianfeng, TANG Yi, WANG Qi, et al. An extended SFR model with high penetration wind power considering operating regions and wind speed disturbance [J]. IEEE Access, 2019(7): 16 – 26.
- [18] YAN Kefei, LI Guoqing, ZHANG Rufeng, et al. Aggregated SFR model for VSC HVDC interconnected power systems with high penetration of wind power [J]. Electric Power Systems Research, 2023, 216(3): 1 – 5.
- [19] 刘翔宇,李晓明,朱介北,等. 新型电力系统的频率响应模型综述及展望[J]. 南方电网技术, 2022,16(10):38 – 47.
- LIU Xiangyu, LI Xiaoming, ZHU Jiebei, et al. Review and prospect on frequency response models of new power system [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(10): 38 – 47.
- [20] 李世春,曹润杰,雷小林,等. 基于改进SFR模型的含风电虚拟惯性/一次调频电力系统频率响应特性[J]. 可再生能源, 2019, 37(5):694 – 700.
- LI Shichun, CAO Runjie, LEI Xiaolin, et al. Frequency response characteristics of virtual inertia/primary frequency modulation power system with wind power based on improved SFR model [J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(5): 694 – 700.
- [21] 颜湘武,张世峥,贾焦心. 光伏机组虚拟惯量控制下电力系统频率特性分析[J]. 可再生能源,2023,41(1):81 – 89.

- YAN Xiangwu, ZHANG Shizheng, JIA Jiaoxin. Frequency characteristics analysis of power system under virtual inertia control of photovoltaic unit [J]. Renewable Energy Resources, 2023, 41(1):81 – 89.
- [22] 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.
- [23] 刘闯,孙同,蔡国伟,等. 基于同步机三阶模型的电池储能电站主动支撑控制及其一次调频贡献力分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15):4854 – 4866.
- LIU Chuang, SUN Tong, CAI Guowei, et al. Active support control and primary frequency modulation contribution of battery energy storage power station based on synchrotron third-order model [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4854 – 4866.
- [24] 叶林,王凯丰,赖业宁,等. 低惯量下电力系统频率特性分析及电池储能调频控制策略综述[J]. 电网技术, 2023, 47(2): 446 – 464.
- YE Lin, WANG Kaifeng, LAI Yening, et al. Analysis of power system frequency characteristics and review of battery energy storage frequency modulation control strategy under low inertia [J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 446 – 464.
- [25] 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]. 中国电机工程学报, 2023, 43(3):904 – 914.
- ZHAO Qiang, ZHANG Yuqiong, CHEN Ziwei, et al. Frequency characteristic analysis of low-inertia power system considering energy storage [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(3):904 – 914.
- [26] 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, et al. Analysis of frequency characteristics of power system based on wind farm-energy storage combined frequency regulation [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7):2209 – 2213.
- [27] 周霞,刘懿诗,戴剑丰,等. 考虑风-储-直参与调频的电力系统频率特征定量分析[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 30 – 44.
- ZHOU Xia, LIU Yishi, DAI Jianfeng, et al. Quantitative analysis of frequency characteristics of power system considering wind-storage-direct participation Frequency modulation [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 30 – 44.
- [28] ANDERSON P M, MIRHEYDAR M. A low-order system frequency response model [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(3):720 – 729.

收稿日期: 2023-05-15; 网络首发日期:2024-02-15

作者简介:

马覃峰(1982), 男, 通信作者, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电网运行与控制, 66105768@qq.com;

安颢(1988), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为大电网优化运行与安全稳定分析, 769853242@qq.com;

刘明顺(1986), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电网运行与控制, lms2800@qq.com。