第 50 卷 第 1 期：148-159 高电压技术 Vol.50, No.1: 148-159
2024 年 1 月 31 日 High Voltage Engineering January 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230189

考虑时空特性与多指标约束的电力系统惯量需求评估

郭小龙[1]，杨桂兴[1]，张江飞[2]，袁铁江[2]
（1. 国网新疆电力有限公司，乌鲁木齐 830002；2. 大连理工大学电气工程学院，大连 116024）

摘　要：针对传统惯量需求评估方法难以准确刻画高随机性新能源接入下电力系统运行方式多变导致惯量需求时空动态变化特点的问题，提出一种考虑时空特性与多指标约束的电力系统惯量需求评估方法。首先通过分析系统惯量需求影响因素，建立考虑新能源渗透率以及虚拟惯量的电力系统频率响应模型；其次，在传统频率响应指标的基础上，引入一次调频恢复频差约束，建立惯量需求评估模型；然后，在时间和空间两方面分别考虑系统参数和节点位置对惯量需求的影响，在不同场景下采用优化方法评估系统惯量需求；最后，分别针对传统电力系统和基于虚拟惯量的新能源发电系统开展算例分析，验证了所提方法的有效性和准确性。
关键词：虚拟惯量；频率响应；惯量需求；新能源渗透率；频率约束

Assessment of Inertia Demand in Power System Considering Spatio-temporal Characteristics and Multi-index Constraints

GUO Xiaolong[1], YANG Guixing[1], ZHANG Jiangfei[2], YUAN Tiejiang[2]
(1. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830002, China;
2. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Aiming at the problem that the traditional inertia demand assessment method is difficult to accurately describe the space-time dynamic change characteristics of the system inertia demand caused by the variable operation mode of the power system with high randomness, we propose a new power system inertia demand assessment method in which the space-time characteristics and multi index constraints are taken into consideration. Firstly, by analyzing the influencing factors of system inertia demand, a frequency response model of power system considering new energy penetration and virtual inertia is established.Secondly, based on the traditional frequency response index, the recovery frequency constraint is introduced to establish the inertia demand evaluation model. Then, the influence of system parameters and node location on the inertia demand in time and space is taken into consideration, and the optimization method is used to dynamically evaluate the inertia demand of the system in different scenarios. Finally, the effectiveness and accuracy of the proposed method are verified by the example analysis of the traditional power system and the renewable energy generation system based on virtual inertia.
Key words: virtual inertia; frequency response; inertia demand; renewable energy penetration; frequency constraints

0　引言

为响应“双碳”目标要求，2021 年召开的中央财经委员会第九次会议提出，实施可再生能源替代行动，持续推进深化电力体制改革，构建以新能源为主体的新型电力系统，这为推动能源电力转型发展指明了方向。因此，大力发展新能源是我国电力脱碳的必经之路，新能源发电是未来电力系统发展的必然趋势[1]。

不同于传统同步系统，新型电力系统呈现出高比例新能源、高电力电子化以及低转动惯量的特点。随着大规模新能源以及电力电子装置不断接入电网，由系统惯量水平下降引起的一系列频率稳定问题也愈发突出。2016 年南澳发生全州大停电事故，“9.28”南澳系统惯量呈现历史最低，极端天气下线路故障导致系统频率变化率(rate of change of frequency，RoCoF)达到 6.1 Hz/s，频率降至 47 Hz 以下，系统随即崩溃并造成全州大停电[2-3]。2019 年英国发生“8.9”大停电事故，事故前同步机开机占比约 50%，雷击导致分布式电源脱网，系统累计损失功率约 3.9%时，频率变化率达到 0.135 Hz/s，超出保护启动阈值，导致分布式电源二次脱网，最终

基金资助项目：新疆电网公司科技项目(SGXJ0000TKJS2200266)。
Project supported by the Science and Technology Project of Xinjiang Power Grid Corporation(SGXJ0000TKJS2200266).

造成频率下降至 48.8 Hz，触发低频减载动作[4]。以上事件的发生均与电力系统惯量支撑以及调频能力不足相关，因此，保持一定的惯量水平，对于电力系统频率安全稳定具有重要作用。

为探究电力系统惯量安全边界，保障系统在不同场景下稳定运行，对系统惯量需求进行准确评估具有重要意义。文献[5]引入了惯量中心惯量，研究了新能源接入对系统暂态响应的影响。文献[6]考虑到频率分布特性对惯量评估的影响，提出了惯量图心的概念，并对新能源电力系统的等效惯量进行评估。为表征节点惯量大小以及系统惯量分布情况，文献[7-8]提出惯量分布指数的概念，并基于该指标研究了系统惯量的分布情况。以上相关文献在电力系统惯量水平方面开展了不同程度的研究，但针对惯量需求评估的研究目前仍相对较少，相关工作大多基于频率变化率以及频率最低点(frequency nadir，FN)指标对系统惯量需求进行估算。文献[9-10]考虑频率变化率指标约束，基于优化问题对系统所需最低惯量进行求解。文献[11-12]基于频率变化率不超过分布式电源防孤岛保护设定值的惯量约束，提出系统经济调度模型。文献[13-14]在建立系统动态频率响应模型的基础上，综合考虑频率变化率约束和频率最低点约束对系统最小惯量进行评估。文献[15]通过分析频率安全下的惯量需求对风电虚拟惯量进行约束，提出频率变化极值时间内变速风机的虚拟惯量控制策略，提升了电网主动支撑性能。文献[16]提出惯量安全域的概念，用于揭示满足系统频率安全稳定的惯量安全区域，建立了满足频率稳定约束的惯量安全域评估模型，并根据不同指标对惯量安全裕度进行分析。文献[17]针对于不同时段下的微电网系统，提出考虑风电与储能的微电网最低惯量需求评估方法。

目前系统惯量需求评估主要基于频率变化率与频率最低点约束获得，分析问题不够深入，场景设置不够灵活，考虑因素不够全面。在新型电力系统背景下，新能源渗透率随时间的不断上升必将引起系统惯量及调频参数的变化，惯量组成结构的变化也使得系统频率响应过程愈发复杂，此外，系统惯量需求在不同空间维度上也存在差异，因此需要针对不同场景对系统惯量需求进行评估。

针对上述问题，本文针对高比例新能源、高电力电子化的电力系统，首先提出虚拟惯量渗透率的概念，建立考虑新能源渗透率以及虚拟惯量的电力系统频率响应模型；然后，深入探究惯量需求与系统参数的影响关系，在传统频率指标约束的基础上，引入一次调频恢复频差指标约束，建立系统惯量需求评估模型；最后，考虑惯量的时空分布特性，采用优化方法在不同场景下评估系统惯量需求，并通过算例分析验证所提方法的有效性与准确性。

1 电力系统惯量需求影响因素分析

惯性在电力系统中表现为对频率变化的抵抗作用，对系统频率稳定具有重要作用[18-19]，惯量水平过低将导致系统频率失稳风险增大，因此，惯量需求评估对与电力系统安全稳定运行至关重要。电力系统发生扰动后，有功频率调节过程包括惯性响应和一次调频(primary frequency control, PFC)等过程，可由转子运动方程[20]表示：

$$\frac{2H_{\mathrm{sys}}S_{\mathrm{sys}}}{f_0}\frac{\mathrm{d}\Delta f}{\mathrm{d}t}=\Delta P_{\mathrm{m}}-\Delta P_{\mathrm{d}}-D_{\mathrm{sys}}\Delta f \tag{1}$$

式中：H_{sys} 为系统等效惯性常数，s；S_{sys} 为系统容量；f_0 为额定频率；Δf 为系统频率偏差；ΔP_{m} 和 ΔP_{d} 分别为一次调频功率调整量和扰动功率；D_{sys} 为系统阻尼系数。

扰动发生后，系统频率最低点和最大频率变化率分别表示为[21-22]：

$$f_{\mathrm{extre}}=f_0-f_{\mathrm{db}}-\frac{\Delta P_{\mathrm{d}}^2\cdot f_0}{4H_{\mathrm{sys}}S_{\mathrm{sys}}R_{\mathrm{G}}} \tag{2}$$

$$R_{\max}=-\frac{\Delta P_{\mathrm{d}}\cdot f_0}{2H_{\mathrm{sys}}S_{\mathrm{sys}}} \tag{3}$$

式中：f_{extre}、f_{db} 分别为系统频率最低点和一次调频死区(取 0.033 Hz)；R_{G} 为等值同步机组一次调频响应速率，MW/s；$R_{\max}$ 为最大频率变化率，通常为扰动发生时刻的系统频率变化率，单位为 Hz/s。

结合上述分析，为保证电力系统运行的稳定，扰动发生后系统频率偏差以及频率变化率需要保持在允许范围内[23]，故系统惯量应满足条件：

$$H_{\mathrm{sys}}\geq H_{\mathrm{c1}}=\frac{\Delta P_{\mathrm{d}}^2\cdot f_0}{4R_{\mathrm{G}}S_{\mathrm{sys}}(f_0-f_{\mathrm{db}}-f_{\mathrm{lim,min}})} \tag{4}$$

$$H_{\mathrm{sys}}\geq H_{\mathrm{c2}}=\frac{-\Delta P_{\mathrm{d}}\cdot f_0}{2S_{\mathrm{sys}}R_{\mathrm{lim,max}}} \tag{5}$$

式中：H_{c1} 和 H_{c2} 分别为基于频率最低点和频率变化率约束的临界惯量；$f_{\mathrm{lim,min}}$ 为频率最低点限值；$R_{\mathrm{lim,max}}$ 为频率变化率限值。

在不同场景下，由于系统等效惯量大小以及扰

动大小等因素的影响，系统惯量需求表现为动态变化特点，其可描述为：

$$H_{\mathrm{d}} = H_{\mathrm{c}} - H_{\mathrm{sys}} \tag{6}$$

式中：H_{d}为系统惯量需求；H_{c}为临界惯量，其为满足条件的系统最低惯量。

综上所述，电力系统惯量需求与惯量水平、故障大小、发电机组调频速率、频率指标等有关。当系统发生的扰动越大，频率指标约束越苛刻时，惯量需求也相对越大；当系统惯量水平下降，系统惯量需求相应的随之增加。此外，由于惯量与调频参数相互配合的作用，系统频率最低点由惯量和调频速率共同决定，调频速率越小，系统惯量需求越大。

2 系统惯量需求分析

系统惯量需求受多种因素影响，本节针对不同时空场景与多频率指标约束对系统惯量需求进行具体分析。

2.1 考虑新能源渗透率以及虚拟惯量的频率响应模型

为在一定程度上缓解新能源接入导致系统惯量水平下降的问题，近年来，虚拟惯量控制技术的应用，使得风电、储能等系统能够响应系统频率变化，模拟传统同步发电机的惯量响应与一次调频响应特性[24-25]，传统电压源型虚拟惯量控制策略见附录 A 图 A1。

当系统扰动发生后，具有虚拟惯量特性的新能源系统有功功率响应可描述为：

$$\Delta P_{\mathrm{W}} = -2H_{\mathrm{VI}}\frac{\mathrm{d}\Delta f}{\mathrm{d}t} - K_{\mathrm{W}}\Delta f \tag{7}$$

式中：ΔP_{W}为调频附加有功功率增量；H_{VI}与K_{W}分别为新能源虚拟惯量与下垂系数。

为简化系统惯量描述，本文提出虚拟惯量渗透率的概念，其定义为新能源虚拟惯量大小与相同容量传统同步发电机组惯量大小的比值，由式(8)表示。

$$K_{\mathrm{VI}} = \frac{\sum_j H_{\mathrm{VI},j}S_{\mathrm{VI},j}}{H_{\mathrm{G}}\sum_j S_{\mathrm{VI},j}} \tag{8}$$

式中：K_{VI}为虚拟惯量渗透率，其以同步惯量为参考描述了新能源虚拟惯量的大小，它反映了新能源系统中虚拟惯量对于同步惯量的替代程度；$H_{\mathrm{VI},j}$和$S_{\mathrm{VI},j}$分别为运行中的虚拟惯量机组惯性常数和容量；H_{G}为同步发电机组等效惯性常数，可由下式得到：

$$H_{\mathrm{G}} = \frac{\sum_k H_{\mathrm{G},k}S_{\mathrm{G},k}}{\sum_k S_{\mathrm{G},k}} \tag{9}$$

式中：$H_{\mathrm{G},k}$和$S_{\mathrm{G},k}$为运行中的同步发电机组惯性常数和容量。

结合式(8)和式(9)，系统等效惯性常数可表示为：

$$H_{\mathrm{sys}} = \frac{\sum_k H_{\mathrm{G},k}S_{\mathrm{G},k} + \sum_j H_{\mathrm{VI},j}S_{\mathrm{VI},j}}{\sum_k S_{\mathrm{G},k} + \sum_j S_{\mathrm{VI},j}} = H_{\mathrm{G}}(K_{\mathrm{RE}}(K_{\mathrm{VI}}-1)+1) \tag{10}$$

式中：K_{RE}为新能源渗透率，可由下式表示：

$$K_{\mathrm{RE}} = \frac{\sum_j S_{\mathrm{VI},j}}{\sum_k S_{\mathrm{G},k} + \sum_j S_{\mathrm{VI},j}} \tag{11}$$

采用虚拟惯量控制的新能源发电系统惯性常数可根据需要任意调整，其取决于储能容量和控制参数。随着新能源渗透率不断上升，虚拟惯量的支撑效果将会十分显著。

结合式(1)和式(10)，为简化计算，将负荷频率调节系数合并到系统阻尼系数中，引入新能源渗透率、虚拟惯量渗透率等参数，并将一次调频响应等效为一阶惯性环节[26]，建立如图 1 所示的频率响应模型。为简化分析，结合式(10)，计及新能源一次调频的系统一次调频调差系数K_{sys}表示为：

$$K_{\mathrm{sys}} = \frac{K_{\mathrm{f,G}}}{K_{\mathrm{RE}}(K_{\mathrm{VI}}-1)+1} \tag{12}$$

式中：K_{sys}为系统一次调频调差系数；$K_{\mathrm{f,G}}$为等效同步机一次调频调差系数；T_{sys}为系统一次调频响应时间常数。

2.2 基于多频率指标约束的惯量需求

由式(4)与式(5)可知，扰动发生后，系统惯量需求与最大频率变化率以及频率最低点约束有关。取f_0为 50 Hz，频率变化率约束区间为−1 Hz/s 至−0.2 Hz/s，在不同扰动功率下(0~0.2 标幺值)，频率变化率指标约束对系统惯量需求的影响见附录 A 图 A2。

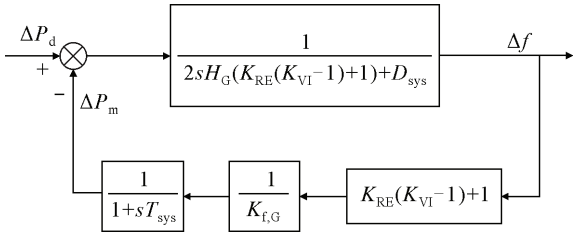


图 1 简化频率动态响应模型

Fig.1 Simplified frequency dynamic response model

分别在频率变化率指标约束为−1 Hz/s 以及 ΔP_{d}=0.2 时，惯量需求与扰动功率以及频率变化率指标约束的关系见附录 A 图 A3。

由式(2)可知，扰动发生后，系统频率最低点由扰动大小、惯量水平和一次调频能力共同决定，因此，频率最低点约束越严格，系统的惯量需求就相对越大。在不同扰动功率下，频率最低点指标约束对惯量需求的影响见附录 A 图 A4。取最大频率偏差为−1 Hz，ΔP_{d}=0.2，惯量需求与扰动功率以及频率最低点约束的关系见附录 A 图 A5。

在以上频率指标约束基础上，本文引入一次调频恢复频差约束指标对系统惯量需求进行评估。扰动发生后，系统在惯量响应和一次调频响应的作用下最终达到新的平衡状态，此时有：

$$\Delta P_{\mathrm{m}} = -\frac{\Delta f + f_{\mathrm{db}}}{K_{\mathrm{sys}}} = \Delta P_{\mathrm{d}} + D_{\mathrm{sys}}\Delta f \tag{13}$$

$$\Delta f_{\mathrm{std}} = -\frac{K_{\mathrm{sys}}\Delta P_{\mathrm{d}} + f_{\mathrm{db}}}{1+K_{\mathrm{sys}}D_{\mathrm{sys}}} \tag{14}$$

式中：Δf_{std} 为一次调频恢复频差。

系统恢复频率大小与扰动大小、一次调频调差系数以及阻尼系数等参数有关。通过虚拟惯量控制技术，基于电力电子装置的新能源系统具有可调节的惯量和一次调频参数，为探究系统一次调频调差系数 K_{sys} 及其响应时间常数 T_{sys} 对系统惯量需求的影响，取 ΔP_{d}=0.2，不同一次调频参数下的频率响应情况见附录 A 图 A6。可以看出，减小调差系数能够使得系统频率最低点上升，恢复频率升高；而缩短响应时间常数使得系统频率最低点上升，恢复频率不变。在此过程中，最大频率变化率不变。

由于扰动后系统频率最低点由惯量和一次调频参数共同决定，一次调频调差系数过大或过小将会导致惯量需求虚高或虚低。因此，在满足系统安全稳定运行的条件下，为避免一次调频参数的不合理设置对系统惯量需求评估的影响，保证系统一定的安全稳定运行裕度，本文通过引入恢复频差约束限制调差系数大小，进而对系统惯量需求进行评估。恢复频差指标约束可描述为：

$$\left|\Delta f_{\mathrm{std}}\right| = \left|-\frac{K_{\mathrm{sys}}\Delta P_{\mathrm{d}} + f_{\mathrm{db}}}{1+K_{\mathrm{sys}}D_{\mathrm{sys}}}\right| \geq \Delta f_{\mathrm{lim,std}} \tag{15}$$

式中：$\Delta f_{\mathrm{lim,std}}$ 为恢复频差约束限值。

取 ΔP_{d}=0.2，D_{sys}=0，T_{sys}=1 s，分别在 $\Delta f_{\mathrm{lim,std}}$ 为 0.6 Hz 和 0.3 Hz 时，得到扰动后系统频率响应曲线，具体见附录 A 图 A7。图中两条曲线分别为 $\Delta f_{\mathrm{lim,std}}$ 为 0.6 Hz 和 0.3 Hz 时的频率响应曲线。可以看出，恢复频差指标约束越严格，系统频率最低点越高，惯量需求越小。

2.3 考虑时空特性的惯量需求

2.3.1 时间特性

随着时间的变化，新能源渗透率不断上升，系统惯量水平在不同时期存在差异，在不同时段发电机组启停状态也不尽不同，因此系统惯量水平具有时变特性。此外，结合系统简化频率响应模型，当新能源渗透率一定时，随着虚拟惯量技术的应用，虚拟惯量渗透率越大，则系统惯量需求相对越小。

为更加直观的分析新能源渗透率和虚拟惯量渗透率对系统惯量需求的影响，取最大频率偏差为−1 Hz，ΔP_{d}=0.2，$R_{\mathrm{lim,max}}$= −1 Hz/s，D_{sys}=0，H_{G}=6 s，分别在 K_{VI}=0.3 和 K_{RE}=0.6 时，分析 RoCoF 和 FN 约束下系统惯量需求与新能源渗透率 K_{RE} 和虚拟惯量渗透率 K_{VI} 的关系，具体见附录 A 图 A8。在 T_{sys}=1 s，D_{sys}=0，$K_{\mathrm{f,G}}$=0.05，ΔP_{d}=0.2 时，分别取 K_{RE1} 为 0.3、0.6 以及 K_{VI1} 为 0.3、0.6、0.9，扰动发生后系统频率情况见附录 A 图 A9。

可以看出，随着新能源渗透率的不断增加，新能源机组对同步机组的替代导致系统惯量水平不断下降，因此，当发生扰动时，系统最大频率变化率增大，频率最低点降低，进而使得惯量需求增加。新能源渗透率的增加使得系统最大频率变化率增大以及频率最低点下降，而虚拟惯量渗透率的增加能够在一定程度上缓解上述问题。

本文面向高比例新能源电力系统，在时间尺度上考虑 K_{RE}、K_{VI} 等参数进行惯量需求评估。结合式(6)和式(10)，系统惯量需求可表示为：

$$H_{\mathrm{d}} = H_{\mathrm{c}} - H_{\mathrm{G}}(K_{\mathrm{RE}}(K_{\mathrm{VI}}-1)+1) \tag{16}$$

2.3.2 空间特性

在上述分析过程中，系统频率及其变化率采用惯量中心频率表征，并未考虑系统频率的空间分布特性。在实际电力系统中，由于电网结构影响，扰动发生后不同位置的频率响应特性存在差异。因此，在频率指标约束下，系统惯量需求与节点位置有关，引入频率分布指数[27]：

$$a = \frac{R_{\max,k}}{R_{\max,\mathrm{coi}}} \tag{17}$$

式中：a 为频率分布指数；$R_{\max,k}$ 为位置 k 处的最大

频率变化率，也即扰动瞬间位置 k 处的频率变化率；$R_{\max,\mathrm{coi}}$ 为惯量中心的最大频率变化率，可根据式(3)由系统等效惯量水平于扰动大小计算得出。

因此，考虑惯量以及频率的空间分布差异，位置 k 处惯量大小应满足条件：

$$H_k \geq a \cdot \frac{-\Delta P_{\mathrm{d}} \cdot f_0}{2 S_{\mathrm{sys}} R_{\mathrm{lim,max}}} \tag{18}$$

3 惯量需求评估方法

3.1 惯量需求评估过程

基于上述分析，考虑到新型电力系统背景下大规模新能源以及电力电子装置不断接入电网导致系统惯量水平、运行方式以及各类参数不断变化的特点，本文以惯量需求最小为优化目标建立系统惯量需求模型，考虑到系统惯量的时空分布特点，在不同场景下评估系统惯量需求，为电力系统惯量需求把握以及虚拟惯量参数设置提供参考，具体思路见附录 A 图 A10。

3.2 惯量需求评估模型

3.2.1 目标函数

本模型以单一场景下系统惯量需求最小为优化目标：

$$\begin{cases} \min \quad (H_{\mathrm{minc},i} - H_{\mathrm{sys},i}) \\ H_{\mathrm{sys},i} = H_{\mathrm{G},i}(K_{\mathrm{RE},i}(K_{\mathrm{VI},i} - 1) + 1) \end{cases} \tag{19}$$

式中：$H_{\mathrm{minc},i}$ 为场景 i 下的系统临界惯量，其表示系统在场景 i 时满足安全稳定运行条件的最低惯量大小；$H_{\mathrm{sys},i}$ 为场景 i 下的系统惯量大小。

3.2.2 约束条件

惯量需求评估模型包括以下约束条件：

1）最大频率变化率约束

结合式(3)和式(16)，系统最大频率变化率及其约束为：

$$R_{i,\max} = -\frac{\Delta P_{\mathrm{d},i} f_0}{2 H_{\mathrm{minc},i}} \tag{20}$$

$$\left| R_{i,\max} \right| \leq \left| \frac{R_{\mathrm{lim,max}}}{a} \right| \tag{21}$$

考虑到分布式能源防孤岛阈值以及常规机组的耐受能力，本文取频率变化率限值为−1 Hz/s。

2）频率最低点约束

考虑到式(2)中的频率最低点计算方法中采用调频速率 R_{G} 对一次调频能力进行等效，其计算精度相对有限。本文在优化模型中对系统频率响应进行离散化处理，根据扰动后不同时刻的频率变化率计算系统频率大小，通过对不同时刻的频率大小进行约束，进而限制频率最低点大小，其计算方法和约束分别为：

$$R_{i,j} = \frac{(\Delta P_{\mathrm{m},i,j\text{-}1} - \Delta P_{\mathrm{d},i} - D_{\mathrm{sys},i} \Delta f_{i,j\text{-}1}) f_0}{2 H_{\mathrm{minc},i}} \tag{22}$$

$$\Delta f_{i,j} = \Delta f_{i,j\text{-}1} + R_{i,j} \Delta \mathrm{t} \tag{23}$$

$$\Delta f_{\mathrm{lim,min}} \leq \Delta f_{i,j} \leq \Delta f_{\mathrm{lim,max}} \tag{24}$$

式中：$R_{i,j}$ 和 $\Delta f_{i,j}$ 分别为场景 i 下 j 时刻系统的频率变化率与频率偏差值；Δt 为离散时间间隔大小；$\Delta f_{\mathrm{lim,max}}$ 和 $\Delta f_{\mathrm{lim,min}}$ 分别为最大频率偏差上下限值，为避免触发低频减载动作，并考虑到系统频率振荡，取 $\Delta f_{\mathrm{lim,max}}$ 和 $\Delta f_{\mathrm{lim,min}}$ 分别为 0.8 Hz 和−1 Hz。

3）一次调频恢复频差约束

结合式(14)，引入恢复频差约束：

$$\Delta f_{\mathrm{std},i} = -\frac{K_{\mathrm{sys},i} \Delta P_{\mathrm{d},i} + f_{\mathrm{db}}}{1 + K_{\mathrm{sys},i} D_{\mathrm{sys},i}} \tag{25}$$

$$\left| \Delta f_{\mathrm{std},i} \right| \geq \Delta f_{\mathrm{lim,std}} \tag{26}$$

式中：$K_{\mathrm{sys},i}$ 为场景 i 下的系统一次调频调差系数；$\Delta f_{\mathrm{std},i}$ 为场景 i 下的系统恢复频差；$\Delta f_{\mathrm{lim,std}}$ 为恢复频差约束限值，最大取值为 0.5 Hz。

4）一次调频约束

在一次调频容量充足的情况下，扰动发生后系统一次调频功率响应可描述为[25]：

$$\Delta P_{\mathrm{m},i,j} = \Delta P_{\mathrm{m},i,j-1} - \frac{\Delta t}{\Delta t + T_{\mathrm{sys},i}} \left(\frac{\Delta f_{i,j}}{K_{\mathrm{sys},i}} + \Delta P_{\mathrm{m},i,j-1} \right) \tag{27}$$

式中：$\Delta P_{\mathrm{m},i,j}$ 和 $T_{\mathrm{sys},i}$ 分别为系统的一次调频功率调整量和响应时间常数，其中一次调频限幅为 6%额定负荷。

4 算例分析

本文分别以传统电力系统和基于虚拟惯量的新能源发电系统进行算例分析，对不同场景下的惯量需求进行评估，算例仿真平台为 Matlab/Simulink，优化模型采用 Yalmip/CPLEX 进行求解。

4.1 传统电力系统算例分析

搭建 IEEE10 机 39 节点电力系统模型，系统结构和参数如图 2 和表 1 所示。

取额定频率为 60 Hz，频率变化率限值和最大频率偏差下限值分别为−1 Hz/s 和−1 Hz，分别以发电机切机、负荷功率突增以及新能源渗透率变化等场景为例，评估系统惯量需求。

表 1　系统参数

Table 1　System parameter

发电机	母线	发电机功率/MW	惯性常数/s
G01	39	1000	5
G02	31	277	5
G03	32	650	5
G04	33	632	5
G05	34	508	5
G06	35	650	5
G07	36	560	5
G08	37	540	5
G09	38	830	5
G10	30	250	5

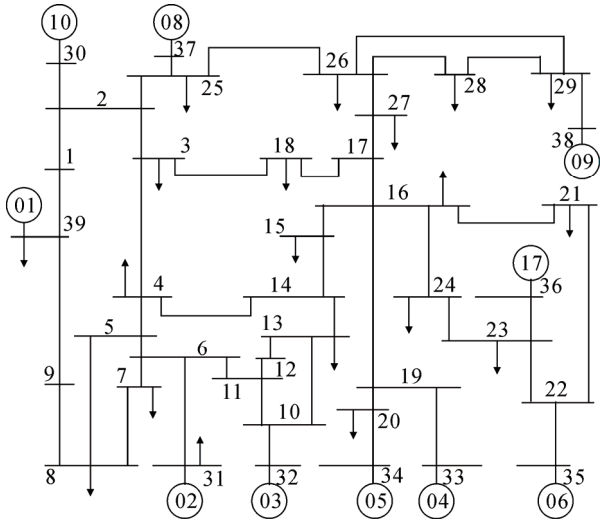


图 2　新英格兰 10 机 39 节点系统

Fig.2　New England 10-machine 39-bus system

在负荷波动场景下，取 K_{RE}=0.6，此时系统惯性常数为 2 s，设置 23 节点处在 5 s 时负荷突增 800 MW，根据式(17)计算得 a=1.37，选取扰动点附近 35 节点为参考，系统惯量需求为 3.59 s。增大扰动功率为 900 MW，计算出系统惯量需求 4.25 s，可见，扰动功率越大，系统惯量需求越大。为简化虚拟惯量渗透率对惯量需求的影响，同比例增大系统惯量水平，相同场景下得到 35 节点最大频率变化率以及系统惯量需求如图 3 所示。可以看出，随着虚拟惯量渗透率的不断上升，系统惯量需求逐渐减小。

在发电机功率波动场景下，取 K_{RE}=0.4，K_{VI}=0，此时系统惯性常数为 3 s。设置发电机 G10 在 5 s 时退出运行，得到各台发电机附近频率响应曲线如图 4(a)所示。由图可知，扰动发生后，不同节点位置的频率响应存在差异，其中 39 节点处最大频率变化率最大，为−0.66 Hz/s。因此，针对于不同的空间节点位置，系统的惯量需求往往不同。选取扰动点附近 39 节点为参考，结合式(17)计算得 a=1.56，在保持现有惯量分布特性不变的情况下，得到系统临界惯量和惯量需求分别为 1.99 s 和−1.01 s。提高新能源渗透率，取 K_{RE}=08，同比例减小系统惯量水平，相同场景下系统惯量需求为 0.99 s。

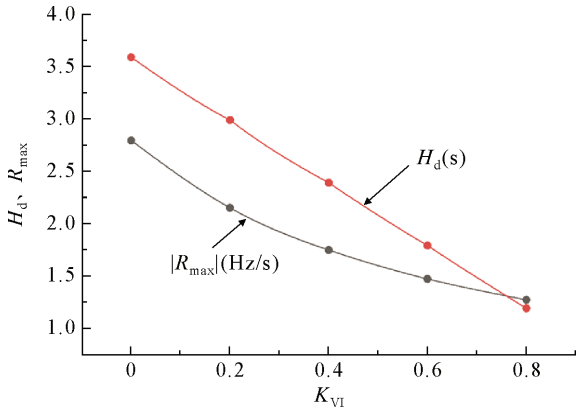


图 3　不同虚拟惯量渗透率下的惯量需求

Fig.3　Inertia demand under different virtual inertia permeability

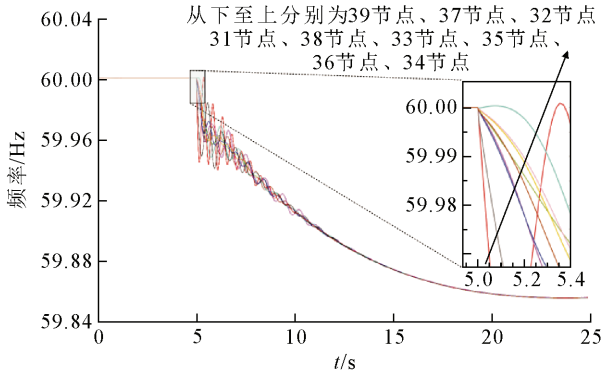
为验证惯量需求评估的有效性和准确性，以发电机 G10 切机为例，根据上述计算结果设置系统惯量大小为临界惯量 1.99 s，得到各发电机附近频率响应曲线如图 4(c)所示，系统最大频率变化率为−1.003 Hz/s，与频率指标约束限值基本一致。

4.2　基于虚拟惯量的系统算例分析

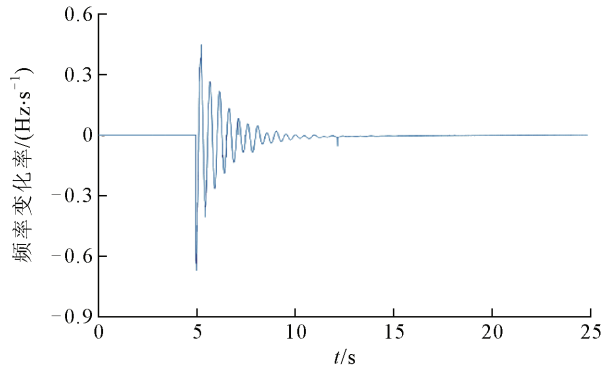
在新型电力系统背景下，大规模新能源以及电力电子装置接入电网，虚拟惯量控制技术的应用将更加广泛，把握系统惯量需求并为虚拟惯量控制参数的调整提供参考依据变得至关重要。因此，本文采用基于储能支撑的虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)技术，以基于电力电子装置的 VSG 系统进行算例分析，针对逆变器输出端节点位置(取 a=1)，在不同场景下评估系统惯量需求。

如图 5 所示，在系统虚拟惯量支撑能量以及一次调频支撑功率充足的情况下，VSG 系统额定容量为 10 MW，一次调频响应时间常数为 1.5 s，H_{sys}=3 s，D_{sys}=0.1，取恢复频差约束限值为 0.5 Hz，设置不同场景如表 2 所示，其中扰动类型以阶跃形式描述。

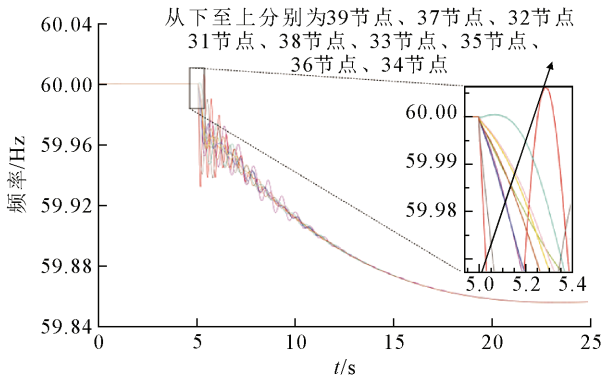
取频率变化率约束限值和最大频率偏差限值分别为−1 Hz/s 和−1 Hz，根据表 2 在不同场景下评估系统惯量需求，得到系统临界惯量以及惯量需求情况如图 6 所示。



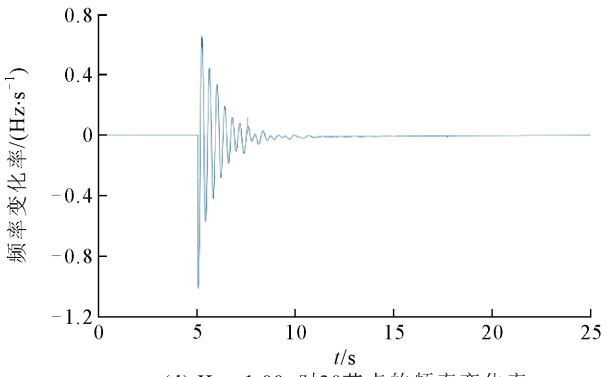
(a) H_{sys}=3 s时各节点的频率曲线



(b) H_{sys}=3 s时39节点的频率变化率



(c) H_{sys}=1.99 s时各节点的频率曲线



(d) H_{sys}=1.99 s时39节点的频率变化率

图 4 不同场景下的频率响应

Fig.4 Frequency response in different scenarios

可以看出，在不同场景下系统惯量需求呈现动态变化的特点。对比场景 5 和场景 6 可知，系统惯

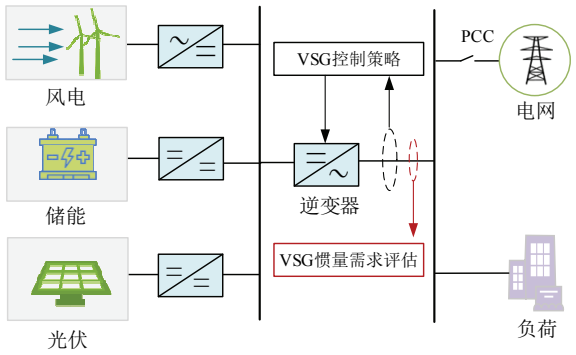


图 5 基于电力电子装置的 VSG 系统

Fig.5 VSG system based on power electronic device

表 2 场景设置

Table 2 Scene type settings

场景	场景类型	扰动类型	扰动大小
1	功率波动	风电波动	1.2 MW
2			0.5 MW
3		光伏波动	0.9 MW
4			0.7 MW
5		负荷波动	2 MW
6			1.6 MW
7	线路故障	电源断路	1.8 MW
8	T_{sys}=1.6 s	负荷波动	2 MW
9	H_{sys}=4 s	负荷波动	2 MW

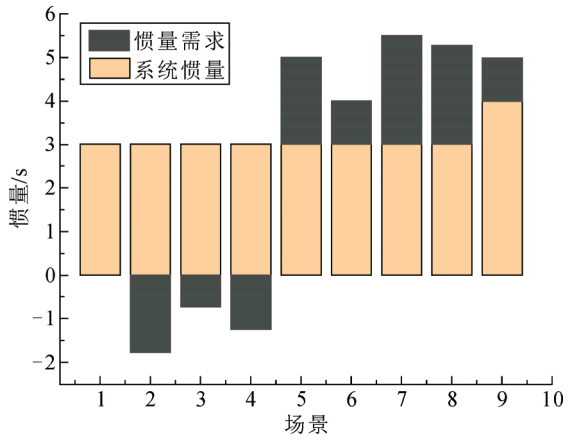


图 6 不同场景下的惯量需求水平

Fig.6 Inertia demand under different scenarios

量需求随扰动功率增大而增大；对比场景 5 和场景 8 可知，系统惯量需求随一次调频能力的下降而增加；对比场景 5 和场景 9 可知，系统惯量水平的下降使得惯量需求增加。因此，随着新能源渗透率的提高，电力系统惯量水平以及调频能力下降，系统惯量需求将随之增大。以扰动功率 2 MW 为参考，系统临界惯量以及惯量需求分别为 5 s 和 2 s。

为验证惯量需求评估的有效性与准确性，以 2 MW 负荷功率扰动场景为例，设置系统等效惯性常

数为临界惯量，得到系统频率响应曲线如图 7 所示，其中频率最低点、恢复频率和最大频率变化率分别为 49.02 Hz、49.48 Hz 和−0.94 Hz/s，与频率指标约束限值基本一致。

为探究不同频率指标约束对系统惯量需求的影响，以 2 MW 负荷功率扰动场景为例，分析不同频率指标约束下的系统临界惯量变化情况，如图 8 所示。可以看出，在频率变化率指标约束条件下，系统惯量需求随频率变化率约束限值的增大而增大；在频率最低点约束条件下，系统惯量需求随最大频率偏差限值的增大而增大。此外，由于恢复频差反映了系统的一次调频能力大小，恢复频差约束限值越小，系统一次调频能力要求越高，系统惯量需求越小。

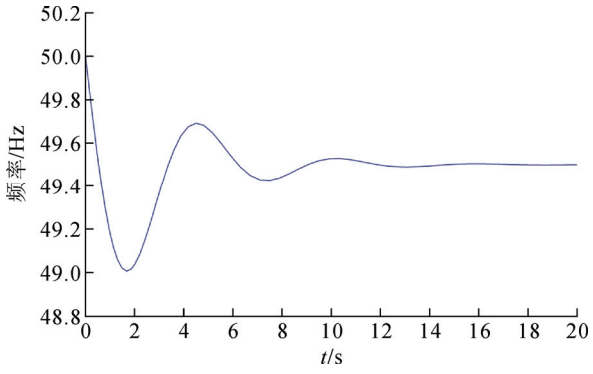


图 7　临界惯量下的频率响应曲线

Fig.7　Frequency response curve under critical inertia

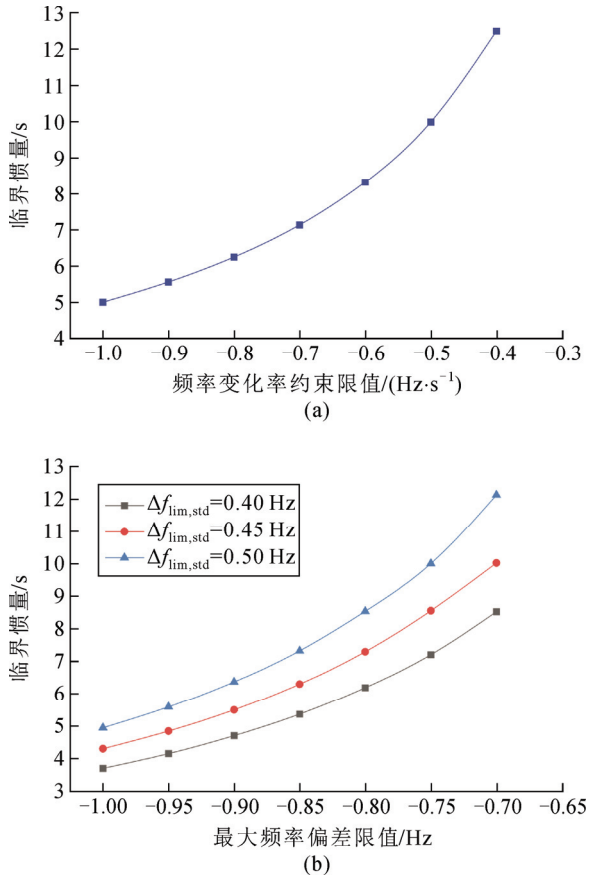


图 8　不同频率指标约束下的临界惯量

Fig.8　Critical inertia under different frequency index constraints

5　结论

本文考虑惯量需求的不同影响因素，提出不同场景下考虑时空特性与多频率指标约束的电力系统惯量需求评估方法，得到以下结论：

1）建立了考虑新能源渗透率以及虚拟惯量的电力系统频率响应模型，在此基础上分析了惯量需求与惯量水平、扰动大小、频率指标以及一次调频能力的关系，指出惯量需求具有动态变化的特点。

2）由于电力系统中不同节点位置频率响应特性不同，其惯量需求也不同。以扰动点附近频率变化为参考，实际系统惯量需求一般较大。此外，随着新能源渗透率的提高，系统惯量水平以及调频能力下降，系统惯量需求随之增加，虚拟惯量的加入能有效缓解上述问题。

3）基于虚拟惯量的新能源发电系统中，惯量需求在不同场景下存在差异，此外，随着频率指标约束限值的变化，系统惯量需求呈现规律变化特点。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献　References

[1] 习近平. 习近平主持召开中央财经委员会第九次会议[EB/OL]. 北京：新华社，2021[2023-03-12]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/15/content_5593154. htm.
XI Jinping. The ninth meeting of the central financial and Economic Commission[EB/OL]. Beijing, China: Xinhua News Agency, 2021 [2023-03-12]. http://www.Gov.cn/xinwen/2021-03/15/content_5593154.htm.

[2] AL MASOOD N, YAN R F, KUMAR SAHA T. Cascading contingencies in a renewable dominated power system: risk of blackouts and its mitigation[C]// Proceedings of 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Portland, USA: IEEE, 2018.

[3] 曾　辉，孙　峰，李　铁，等. 澳大利亚“9·28”大停电事故分析及对中国启示[J]. 电力系统自动化，2017，41(13)：1-6.
ZENG Hui, SUN Feng, LI Tie, et al. Analysis of “9·28” blackout in South Australia and its enlightenment to China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 1-6.

[4] 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)：6183-6191.
SUN Huadong, XU Tao, GUO Qiang, et at. Analysis on blackout in Great Britain Power Grid on August 9th, 2019 and its enlightenment to power grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6183-6191.

[5] LIU S W, LI G Y, ZHOU M. Power system transient stability analysis with integration of DFIGs based on center of inertia[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2016, 2(2): 20-29.
[6] 李东东，张佳乐，徐 波，等. 考虑频率分布特性的新能源电力系统等效惯量评估[J]. 电网技术，2020，44(8)：2913-2921.
LI Dongdong, ZHANG Jiangle, XU Bo, et al. Equivalent inertia assessment in renewable power system considering frequency distribution properties[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2913-2921.
[7] PULGAR-PAINEMAL H, WANG Y J, SILVA-SARAVIA H. On inertia distribution, inter-area oscillations and location of electronically-interfaced resources[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 995-1003.
[8] WANG Y J, SILVA-SARAVIA H, PULGAR-PAINEMAL H. Estimating inertia distribution to enhance power system dynamics[C] // Proceedings of 2017 North American Power Symposium. Morgantown, USA: IEEE, 2017.
[9] PEPICIELLO A, VACCARO A. An optimization-based method for estimating critical inertia in smart grids[C]//Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Bari, Italy: IEEE, 2019: 2237-2241.
[10] PEPICIELLO A, VACCARO A, VILLACCI D, et al. A method to evaluate the inertial response of frequency controlled converter-interfaced generation[C] // Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe. Madrid, Spain: IEEE, 2020: 1-6.
[11] DALY P, FLYNN D, CUNNIFFE N. Inertia considerations within unit commitment and economic dispatch for systems with high non-synchronous penetrations[C] // Proceedings of 2015 IEEE Eindhoven PowerTech. Eindhoven, Netherlands: IEEE, 2015.
[12] GU H J, YAN R F, SAHA T K. Minimum synchronous inertia requirement of renewable power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 1533-1543.
[13] 王宝财，孙华东，李文锋，等. 考虑动态频率约束的电力系统最小惯量评估[J]. 中国电机工程学报，2022，42(1)：114-126.
WANG Baocai, SUN Huadong, LI Wenfeng, et al. Minimum inertia estimation of power system considering dynamic frequency constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 114-126.
[14] 张祥宇，金召展，付 媛，等. 基于频率变化极值时间的风电虚拟惯量约束与支撑控制[J]. 高电压技术，2023，49(6)：2491-2504.
ZHANG Xiangyu, JIN Zhaozhan, FU Yuan, et al. Virtual inertia constrain and support control of wind turbines based on variable frequency limit time[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2491-2504.
[15] 李东东，刘 强，徐 波，等. 考虑频率稳定约束的新能源电力系统临界惯量计算方法[J]. 电力系统保护与控制，2021，49(22)：24-33.
LI Dongdong, LIU Qiang, XU Bo, et al. New energy power system critical inertia estimation method considering frequency stability constraints[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22): 24-33.
[16] 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)：3065-3078.
LIN Xiaohuang, WEN Yunfeng, YANG Weifeng. Inertia security region: concept, characteristics, and assessment method[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(9): 3065-3078.
[17] 文云峰，林晓煌. 孤岛与并网模式下微电网最低惯量需求评估[J]. 中国电机工程学报，2021，41(6)：2040-2052.
WEN Yunfeng, LIN Xiaohuang. Minimum inertia requirement assessment of microgrids in islanded and grid-connected modes[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2040-2052.
[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)：5179-5191.
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): 5179-5191.
[19] 刘 巨，赵红生，李梦颖，等. 基于功率谱密度分析的新能源电力系统等效惯量评估[J]. 高电压技术，2022，48(1)：178-188.
LIU Ju, ZHAO Hongsheng, LI Mengying, et al. An equivalent inertia evaluation method of power system based on power spectral density analysis[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 178-188.
[20] RATNAM K S, PALANISAMY K, YANG G Y. Future low-inertia power systems: requirements, issues, and solutions - A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 124: 109773.
[21] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York, USA: McGraw Hill, 1994: 169-183.
[22] SHI Q X, LI F X, CUI H T. 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.
[23] BIAN Y K, WYMAN-PAIN H, LI F R, et al. Demand side contributions for system inertia in the GB power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 3521-3530.
[24] LU L Y, CHU C C. Consensus-based secondary frequency and voltage droop control of virtual synchronous generators for isolated AC micro-grids[J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2015, 5(3): 443-455.
[25] 王东泽，孙海顺，黄碧月，等. 基于虚拟同步控制的电压源型直驱风电机组并网稳定性分析[J]. 高电压技术，2022，48(8)：3282-3294.
WANG Dongze, SUN Haishun, HUANG Biyue, et al. Analysis of grid-connected stability of voltage-source-type PMSG-based wind turbine based on virtual synchronous control[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3282-3294.
[26] EGIDO I, FERNANDEZ-BERNAL F, CENTENO P, et al. Maximum frequency deviation calculation in small isolated power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(4): 1731-1738.
[27] 张恒旭，刘玉田. 电力系统动态频率响应时空分布特征量化描述[J]. 中国电机工程学报，2009，29(7)：64-70.
ZHANG Hengxu, LIU Yutian. Quantitative description of space-time distribution features of dynamic frequency responses[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 64-70.



郭小龙
1983—，男，博士，研究员型高工
主要从事电力系统分析及运行控制等方面的研究工作
E-mail: ncepugxl@sina.com
GUO Xiaolong
Ph.D., Professor



张江飞(通信作者)
1998—，男，硕士生
主要从事电力系统惯量需求评估与新能源并网控制等方面的研究工作
E-mail: z_jiangfei@163.com
ZHANG Jiangfei
Corresponding author

收稿日期 2023-02-16 修回日期 2023-12-15 编辑 陈 蔓

附录 A

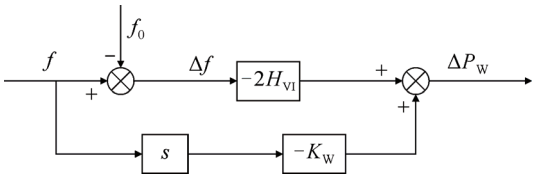


图 A1　电压源型虚拟惯量控制策略

Fig.A1　Voltage source-type virtual inertia control strategy

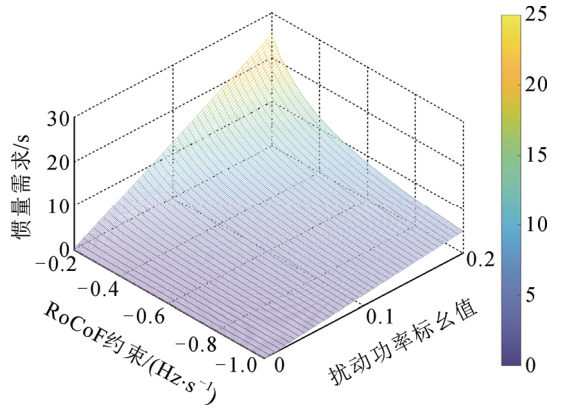


图 A2　频率变化率指标对惯量需求的影响

Fig.A2　Impact of the RoCoF indicator on inertia demand

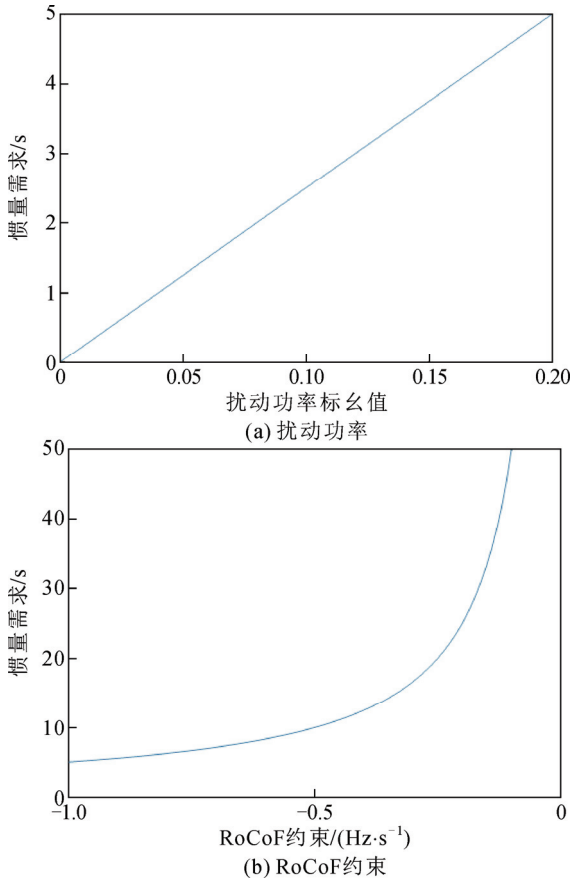


图 A3　惯量需求与 ΔP_d、频率变化率约束的关系

Fig.A3　Relationship between inertia demand and ΔP_d, RoCoF constraints

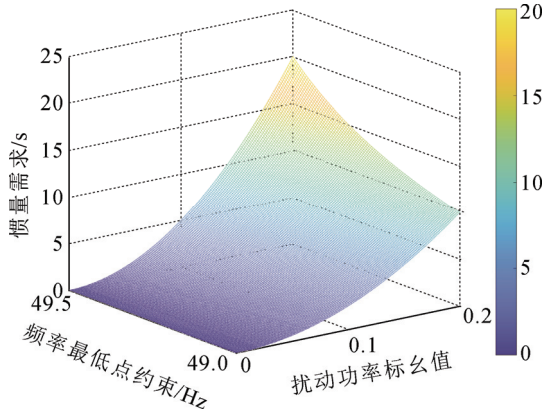


图 A4　频率最低点指标对惯量需求的影响

Fig.A4　Impact of the FN indicator on inertia demand

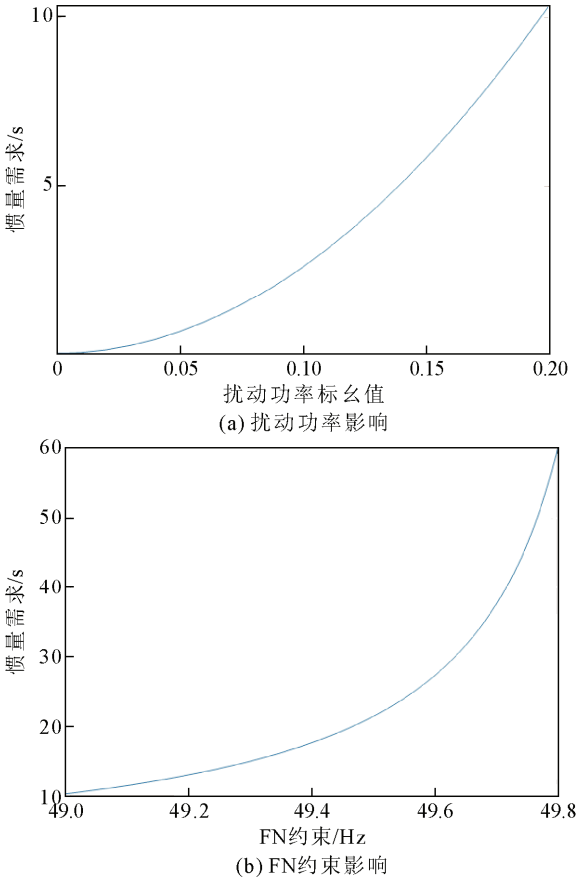
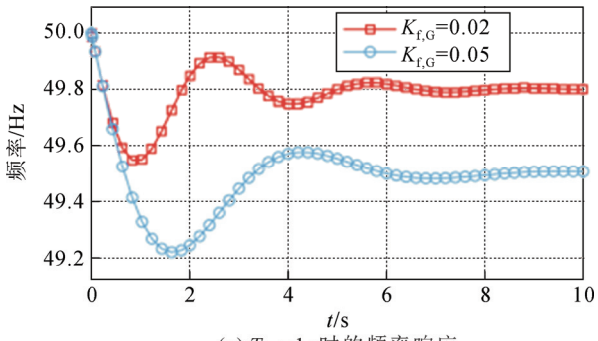
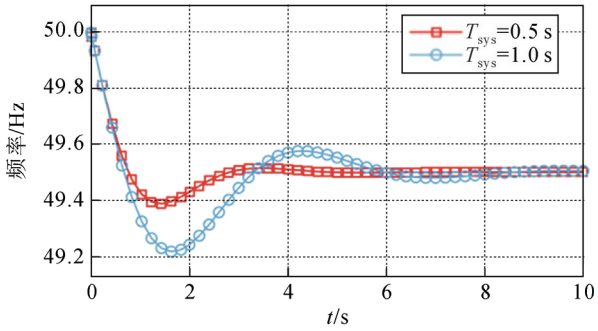


图 A5　惯量需求与 ΔP_d、频率最低点约束的关系

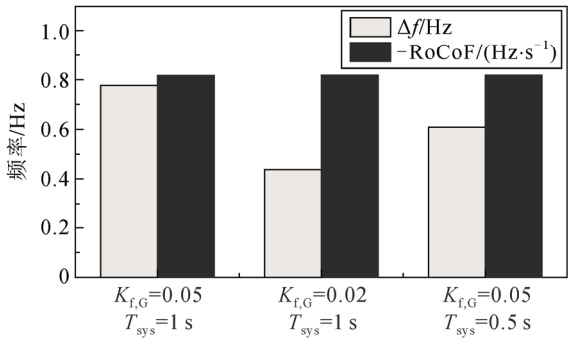
Fig.A5　Relationship between inertia demand and ΔP_d, FN constraints



(a) T_{sys}=1 s时的频率响应



(b) $K_{f,G}$=0.05时的频率响应



(c) 频率响应指标大小

图 A6　不同一次调频参数下的频率响应情况

Fig.A6　Frequency response under different PFC parameters

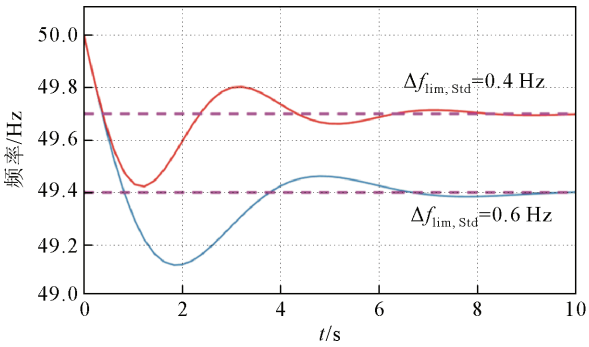
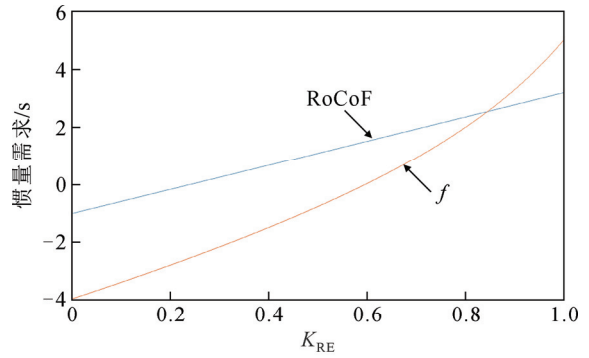
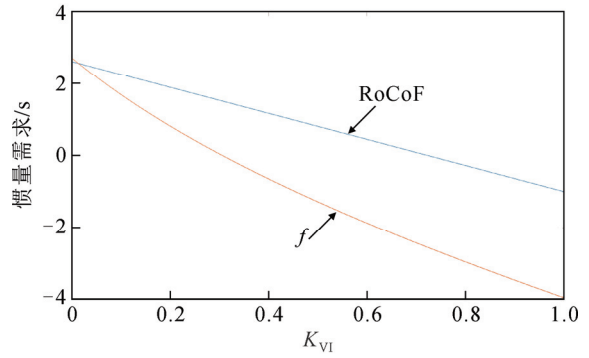


图 A7　不同恢复频差约束下的频率响应曲线

Fig.A7　Frequency response curves under different recovery frequency constraints



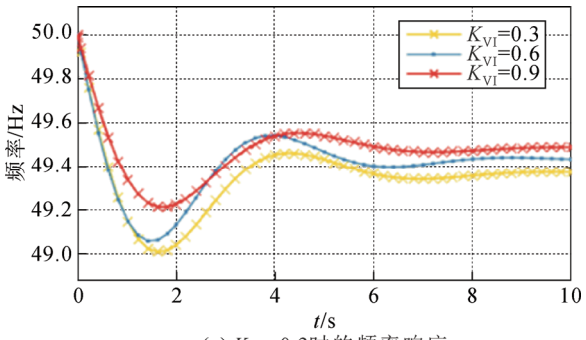
(a) K_{VI}=0.3时不同指标约束下的惯量需求



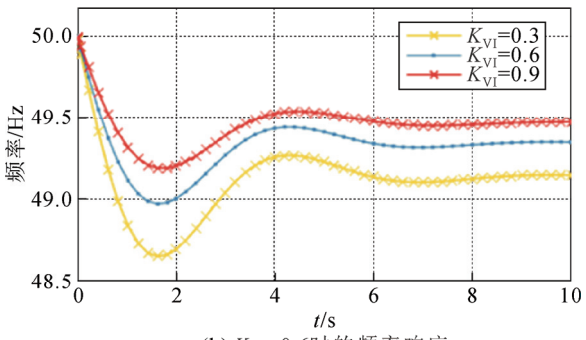
(b) K_{RE}=0.6时不同指标约束下的惯量需求

图 A8　不同新能源参数下的系统惯量需求

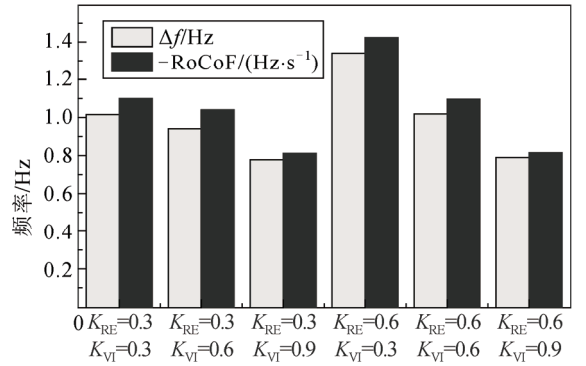
Fig.A8　System inertia demand under different renewable energy parameters



(a) K_{RE}=0.3时的频率响应



(b) K_{RE}=0.6时的频率响应



(c) 频率响应指标大小

图 A9　不同新能源参数下的频率响应情况

Fig.A9　Frequency response under different renewable energy parameters

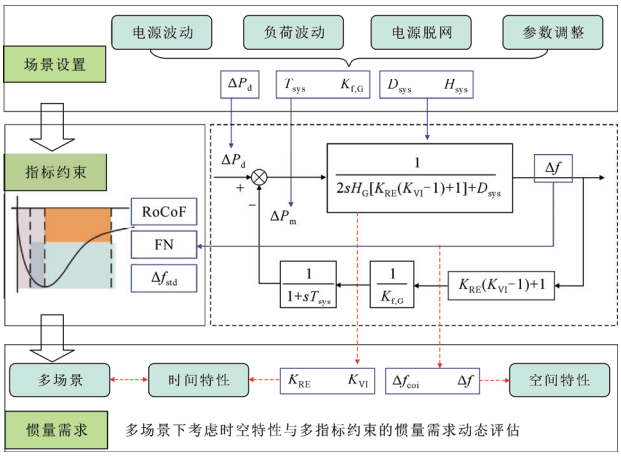


图 A10　惯量需求评估过程

Fig.A10　Process of inertia demand assessment