

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231135

# 计及调速系统详细模型和调频备用的大扰动下 频率最低值预测方法

莫维科<sup>1</sup>, 严焕斌<sup>1</sup>, 赵天阳<sup>2</sup>, 陈皓勇<sup>3</sup>

(1. 暨南大学能源电力研究中心/国际能源学院, 广东 珠海 519070; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 3. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 随着新能源占比的提升, 系统惯性降低、调频资源减少, 系统频率稳定问题严峻。因此在新型电力系统运行方式多变的背景下, 如何快速精准评估大功率扰动下系统频率安全指标显得尤为重要。其中频率最低值指标由于与多种参数存在高度非线性且无法显式表达的量化关系而难以实现快速准确预测, 是频率稳定安全指标评估的研究重点。然而, 目前频率最低值快速预测方法难以考虑调频备用的影响。为此, 基于系统频差曲线抛物线近似的假设, 对平均系统频率(average system frequency, ASF)模型进行开环解耦, 进一步得出系统频率最低值时间与调速器输出功率之间的量化关系, 最终实现考虑调频备用容量的频率最低值快速预测方法。该方法在小系统和ACTIVSg2000算例上的预测精度分别为99.28%和97.71%, 算例结果证明了算法的有效性。该方法对频率安全约束下机组组合、频率稳定控制措施的有效性评估以及频率稳定约束下系统新能源运行承载能力评估等问题具有重要意义。

**关键词:** 频率最低值; 调频备用; 一次调频响应; ASF模型开环解耦

## Frequency nadir prediction for large disturbances in power systems considering detailed governor system models and frequency regulation reserves

MO Weike<sup>1</sup>, YAN Huanbin<sup>1</sup>, ZHAO Tianyang<sup>2</sup>, CHEN Haoyong<sup>3</sup>

(1. Energy and Power Research Center/School of International Energy, Jinan University, Zhuhai 519070, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** With the increasing proportion of renewable energy in the power system, system inertia decreases, and frequency control resources become scarcer, posing a severe challenge to system frequency stability. Therefore, in this context of ever-changing operation scenarios, it is particularly important to rapidly and accurately assess the power system frequency security indices when there are large power disturbances. Specifically, the frequency nadir, which has a highly nonlinear and unexpressed quantitative relationship with multiple parameters, making it difficult to predict accurately and quickly, is a research focus in the power system frequency security assessment. However, current methods for rapidly predicting the frequency nadir do not adequately consider the impact of frequency regulation reserves. This paper, based on a parabolic approximation of system frequency deviation for the average system frequency (ASF) model, presents an open-loop decoupling approach. This approach allows for the quantification of the relationship between the system frequency nadir and governor output power while accounting for frequency regulation reserves. Ultimately, it facilitates the rapid prediction and evaluation of the frequency nadir, considering the impact of frequency regulation reserves. The accuracy of this method is validated through case studies on a small system and the ACTIVSg2000 system, with prediction accuracies of 99.28% and 97.71%, respectively. This method is important for addressing issues related to unit commitments with frequency safety constraints, evaluating the effectiveness of frequency stability control measures, and assessing the operational capacity of new energy sources within systems subject to such constraints.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China: Key Technologies on Intelligent Dispatch of Power Grid under 20% New Energy Integration Scenario (No. 2022YFB2403503).

**Key words:** frequency nadir; frequency regulation reserve; primary frequency response; open-loop decoupling of ASF model

基金项目: 国家重点研发计划项目“支撑20%新能源电量占比场景下的电网智能调度关键技术”(2022YFB2403503)资助

## 0 引言

随着新能源的大规模接入,电力系统频率稳定受到广泛的关注<sup>[1-3]</sup>。由于新能源变换器本身固有的特性与出力随机波动性、不可控性<sup>[4]</sup>,使得系统的惯量和参与频率调节的资源减少。因此,低惯量特性与多变的可再生能源发电特性可能导致系统在扰动下出现高频率变化率和大频率偏移。当频率变化率和频率偏移超过特定阈值,保护装置会断开发电机与电网的连接<sup>[5]</sup>,进一步恶化系统频率、最终可能导致电网频率失稳。而频率最低值作为系统调频控制的重要指标之一,能够对其实现快速预测,对电力系统频率安全稳定运行具有重要意义。

目前,针对频率最低值的快速预测主要分为两类——解析方法和非解析方法。解析方法是在频率分析简化模型的基础上,结合一些假设推演出频率最低值的量化关系,该方法一般无法直接应用于全系统详细模型中。非解析方法是指利用数理统计或数值分析等算法得到频率最低值的量化关系,其中的神经网络方法可以考虑调速系统的调频备用。

非解析方法包括基于仿真结果的数据驱动方法、分段线性化(piecewise linearization, PWL)方法等。其中,数据驱动方法通过统计方法对仿真结果进行分析,能够有效处理物理模型中的非线性和复杂性的问题,拟合得到运行方式与动态频率峰值的量化关系。该方法可应用于全系统模型或简化模型,适用于处理特征不明显、关联性强的多维数据。目前常用的求解方法包括基于 $v$ -支持向量回归方法<sup>[6]</sup>、基于深度信念学习的预测方法<sup>[7]</sup>、考虑电网拓扑结构变化的基于随机森林的预测方法<sup>[8]</sup>和考虑风速特征基于梯度提升机和生成对抗矩阵的预测方法<sup>[9]</sup>,但以上方法对数据样本要求高且可解释性较差,尽管数据驱动方法可以与解析模型相结合<sup>[10-12]</sup>,但其物理机理解释性仍有待增强。PWL方法则是基于数值积分算法对表征频率动态过程的微分方程进行差分得到所对应的代数方程,进而得到频率最低值的量化关系。由于该量化关系的规模取决于频率分析模型的规模,因此该方法一般应用于如多机系统频率响应(system frequency response, SFR)等简化模型<sup>[13-14]</sup>。总而言之,非解析方法在动态频率峰值的量化预测方面具有较高的精度,有着较大的应用空间,但是随着调频资源类型和数目的增多,该方法存在训练数据难以获取以及模型泛化能力较差等问题。

解析方法主要分为两种:一种是通过调速系统的聚合降阶从而得到SFR模型,进一步地对该模

型进行反拉普拉斯变换得到频率最低值的量化关系;另一种是对保留系统各调速器机组动态模型的ASF进行开环解耦,计算某种频差曲线下的调速系统响应,最终实现频率最低值的快速预测。前一种方法通过对低阶SFR模型进行解析,可得到动态频率峰值的量化关系,该方法结构简洁,但存在局限性。虽然通过不同方面进行改进,可以实现考虑飞轮储能和输电网络响应<sup>[15]</sup>或考虑热发电机和可再生能源发电的频率支撑<sup>[16-18]</sup>的频率最低值的快速预测,并提高预测方法的适用范围,但仍然存在要求所有同类型发电机调速系统的结构相同和参数相近,否则将出现准确率下降的问题。后一种方法采用保留各机组调速系统动态模型的ASF模型,并对ASF模型进行反馈解耦处理,实现频率最低值的求解。因此文献[19-21]考虑大扰动后的几秒内,调速器的调节作用延迟使得频率的变化近似为无一次调频作用的线性化变化,分别采用频率衰减初始斜率、截线斜率线性化近似实现模型的反馈解耦。但实际上,由于一次调频和负荷阻尼的作用,频率变化量是非线性的,输入线性频率偏差会导致严重的计算误差。因此,文献[22-25]进一步考虑系统发生扰动后,系统的总有功调节曲线呈线性增长,提出利用抛物线频差输入实现对ASF模型开环处理,对比线性频差输入,利用抛物线频差输入求解调速系统调频响应表达式更合理、更精确。但上述研究大多缺乏对调频备用容量的考虑。实际上,调频备用容量对系统频率动态过程影响显著,对于没有考虑备用容量饱和特性的调速器模型,原动机能够提供更高的机械功率,使频率下降幅度减小,频率最低值的预测值将过于乐观。目前考虑调频备用的预测方法包括:从经济性考虑,要求到达频率最低值时系统的各机组处于满载状态<sup>[26]</sup>,假设过于理想;或将带有非线性限幅环节的调速器等值作为一个饱和特性环节的一阶简化模型,通过求解一个方程数目与发电机数目呈正比的超越方程得到频率最低值<sup>[20]</sup>,以及对于调速器非线性环节提出多方向并行补充优化切割的两阶迭代方法求解频率最低值<sup>[27]</sup>,但都不适用于频率最低值的快速预测。

综上所述,利用数理统计或数值分析等算法的数据驱动方法所需训练数据庞大、物理机理解释性较弱、泛化能力不强;通过SFR模型对频率最低值预测的方法要求所有同类型发电机调速系统的结构相同和参数相近,否则其准确性将下降;而基于ASF模型开环解耦的频率最低值快速预测方法,可考虑异构调速系统对频率最低值的影响,但目前该方法无法考虑调频备用对频率最低值的影响。

本文的主要贡献是计及调频备用容量的饱和特性, 对调速系统的时域解析表达式引入调频备用约束。基于上述调速系统时域解析表达式, 提出计及调速系统详细模型和调频备用的大扰动下频率最低值预测方法, 提高了频率最低值的预测精度和准确性。

本文结构如下: 首先介绍了大扰动下频率动态过程及安全指标; 然后提出了考虑调频备用容量约束的快速频率最低值预测方法; 其次使用包含 4 台水电机组和 4 台火电机组的小系统和 ACTIVSg2000 大系统进行算例分析, 验证了本文所提方法的有效性; 最后, 讨论了本文所提预测方法的应用、其主要局限性和未来的研究方向。

## 1 大扰动下频率动态过程及安全指标

忽略频率空间分布特性的前提下, ASF 模型<sup>[28]</sup>将电力系统中所有发电机调速系统的机械输出功率施加于一个等值转子上, 其中该等值转子由系统中所有发电机聚合而成。本文将基于 ASF 模型讨论大扰动下频率动态过程以及其与频率安全指标之间的关系, 并提出频率最低值快速预测方法的研究难点。

### 1.1 ASF 模型

考虑等值机和机组调频系统, 忽略机间振荡, 建立 ASF 模型, 如图 1 所示。

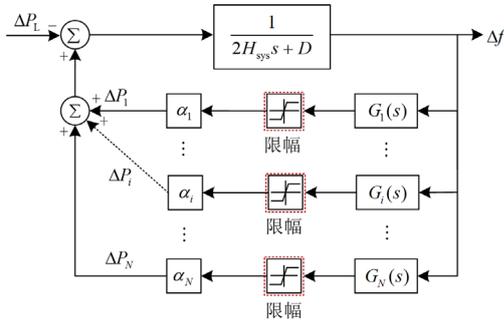


图 1 ASF 模型

Fig. 1 ASF model

图中:  $G_i(s)$  为第  $i$  台机组调速系统的传递函数;  $\alpha_i$  为第  $i$  台机组的装机容量占比;  $\Delta f$  为系统频率偏差;  $\Delta P_i$  为机组  $i$  的调频输出功率;  $H_{sys}$  为系统等效惯性时间常数;  $D$  为系统等效阻尼系数;  $\Delta P_L$  为系统有功功率缺额;  $N$  为电力系统机组总数目。水轮机和汽轮机调速系统结构参照文献[29], 具体模型参数见附录 A。

另外, 本文在附录 B 中讨论并校验了调速器死区对频率最低值的影响, 并提出了考虑调速器死区的情况下如何修正频率最低值的方法。因此, 正文中将不再考虑死区。

### 1.2 大功率扰动下频率动态过程

系统受到大功率扰动后, 由于存在发电功率和负荷不平衡的情况, 其通过等值机转子的加减速来发挥惯量的作用以减轻功率不平衡情况; 在惯量和一次调频的共同遏制作用下, 系统频率达到峰值, 此时系统功率平衡; 在不考虑二次调频的作用下, 系统通过机组一次调频进一步调整发电功率, 使系统频率逐步恢复至频率稳态值。综上, 大功率扰动下系统频率动态过程主要分为 3 个阶段, 分别为扰动发生瞬间、频率遏制阶段和频率恢复阶段, 如图 2 所示。由图 2 可知, 系统频率变化率最大值出现在扰动发生瞬间, 动态频率偏差最大值出现在频率遏制阶段, 频率稳态偏差出现在频率恢复阶段。

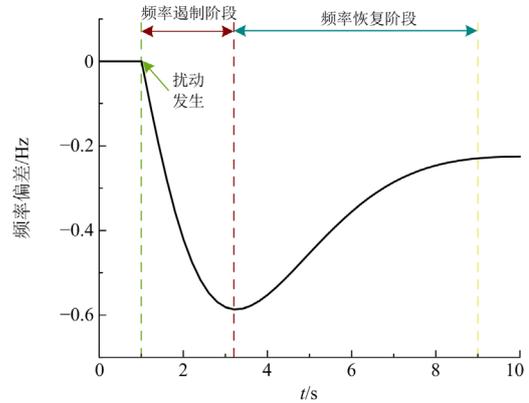


图 2 频率动态过程

Fig. 2 Frequency dynamic process

### 1.3 频率安全指标

电力系统频率稳定中的 3 个重要性能指标分别是频率变化率最大值  $f_{ROCOF, \max}$ 、频率最低值  $\Delta f_n$  和频率稳态偏差  $\Delta f_{ss}$ <sup>[30]</sup>。3 个性能指标除了由功率扰动大小决定外, 频率变化率最大值还与系统等效惯量相关; 频率稳态偏差与系统调差系数、负荷阻尼系数和一次调频容量相关; 频率最低值最为复杂, 其与系统惯性、机组调频特性和负荷阻尼系数等参数相关<sup>[31]</sup>。

根据 1.2 节可知, 频率变化率最大值和频率稳态偏差(调频备用充足的情况下)的显式表达式分别为

$$f_{ROCOF, \max} = \left. \frac{d\Delta f(t)}{dt} \right|_{t=0^+} = \frac{-\Delta P_L}{2H_{sys}} \times 50 \quad (1)$$

$$\Delta f_{ss} = \Delta f(t) \Big|_{t=\infty} = \frac{-\Delta P_L}{\frac{1}{R_{eq}} + D} \times 50 \quad (2)$$

式中,  $R_{eq}$  为系统等效调差系数,  $R_{eq} = \left( \sum_i^N R_i^{-1} \right)^{-1}$ , 其中  $R_i$  为机组  $i$  一次调频的调差系数。

由于频率最低值与多种参数相关，具有高非线性特性，且没有显式表达式，因此难以实现快速准确预测，是频率稳定安全评估的研究重点。

## 2 基于 ASF 模型开环解耦的频率最低值预测方法

### 2.1 ASF 模型的开环解耦处理

由图 1 闭环 ASF 模型可得转子运动方程为

$$2H_{\text{sys}} \frac{d\Delta f(t)}{dt} = \sum_{i=1}^N \alpha_i \Delta P_i(t) - D\Delta f(t) - \Delta P_L \quad (3)$$

由于  $\Delta P_i(s) = G_i(s) * \Delta f(s)$ ，使得式(3)的方程阶数与发电机组调速系统的复杂程度和数目相关，难以对  $\Delta f(t)$  直接进行快速求解。并且在闭环反馈下，频率偏差  $\Delta f$  与调速系统的输出机械功率变化量耦合，需要对其进行反馈解耦处理，才能独立求取频率最低值  $\Delta f_n$ 。

由于当电力系统发生大功率扰动后，系统的总有功调节曲线呈线性增长，具体见附录 C 图 C1。

因此，系统总有功调节可表示为关于时间  $t$  的一次函数<sup>[32]</sup>，且总有功调节曲线一定经过原点和点  $(\Delta P_L, t_n)$ 。综上，系统总有功调节曲线表达式为

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i \Delta P_i(t) - D\Delta f = \frac{\Delta P_L}{t_n} t, t \in [0, t_n] \quad (4)$$

式中， $t_n$  为频率最低点所在时间。将式(4)代入式(3)可得

$$\Delta f(t) = \frac{\Delta P_L}{2H_{\text{sys}}} \left( \frac{1}{2t_n} t^2 - t \right), t \in [0, t_n] \quad (5)$$

式中： $\Delta f$  为带未知参数  $t_n$  的抛物线曲线； $t$  为时间变量； $t_n$  为未知参数。

从式(4)和式(5)可知，图 1 的闭环 ASF 模型中频率偏差曲线可由抛物曲线式(5)近似，即对图 1 闭环 ASF 模型开环解耦，以抛物线近似后的  $\Delta f(t)$  作为调速器的输入，如图 3 所示。

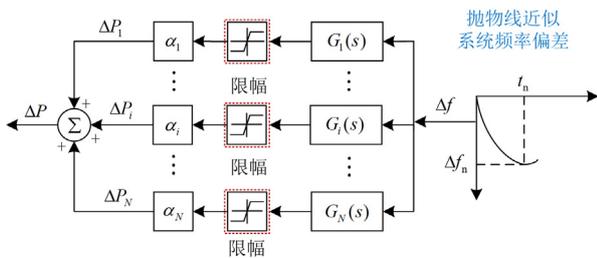


图 3 开环 ASF 模型

Fig. 3 Open-loop of ASF model

根据图 3 以及频率峰值出现时刻系统总有功功率平衡的情况来求解  $t_n$ ，具体如下：当  $t = t_n$  时，系统频率变化率  $d\Delta f / dt = 0$ ，根据式(3)，有

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i \Delta P_i(t_n) - D\Delta f_n - \Delta P_L = 0 \quad (6)$$

式中， $\Delta P_i(t_n)$  为机组  $i$  调速器在抛物线频差曲线输入下  $t_n$  时刻的输出功率。

根据式(6)可求得  $t_n$ 。然而，式(6)中  $\Delta P_i(t_n)$  未知，因此需要求解系统频率最低值时间  $t_n$  与该时刻对应调速器输出功率  $\Delta P_i(t_n)$  之间的量化表达式。

### 2.2 系统频率最低值时间 $t_n$ 与调速器输出功率 $\Delta P_i$ 间的量化表达式

根据图 3 对 ASF 模型开环解耦处理后，每个调速器的输出机械功率变化量表示为

$$\Delta P_i(s) = G_i(s) * \Delta f(s) = G_i(s) \frac{\Delta P_L}{2H_{\text{sys}}} \left( \frac{1}{2t_n} \cdot \frac{1}{s^3} - \frac{1}{s^2} \right) \quad (7)$$

对式(7)进行拉普拉斯逆变换得到每个调速器的输出机械功率为

$$\Delta P_i(t) = \frac{\Delta P_L}{2H_{\text{sys}}} \left( \frac{\iint C_{\text{Step},i}(t) dt^2}{t_n} - \int C_{\text{Step},i}(t) dt \right) = \frac{\Delta P_L}{2H_{\text{sys}}} \left( \frac{g_2(t)}{t_n} - g_1(t) \right) \quad (8)$$

式中： $C_{\text{Step},i}(t)$  为调速器  $i$  的阶跃响应； $g_2(t) = \iint C_{\text{Step},i}(t) dt^2$ ； $g_1(t) = \int C_{\text{Step},i}(t) dt$ 。

在不考虑调速器调频备用容量限制的前提下，可通过各调速器的阶跃响应，积分得到  $g_1(t)$  和  $g_2(t)$ 。由于本文只关心在频率最低值时，调速器的调频输出功率，因此将所得  $g_1(t)$  和  $g_2(t)$  代入式(8)得到在不同频率最低值时每个调速器的调频输出功率为

$$\Delta P_i(t_n) = \frac{\Delta P_L}{2H_{\text{sys}}} \left( \frac{g_2(t_n)}{t_n} - g_1(t_n) \right) \quad (9)$$

但在假设一次调频备用容量充足的情况下，忽略调频备用容量的影响，会导致调速器响应表达式求解乐观，同时也不满足经济性。因此，对调速器引入调频备用容量的限制。

$$\Delta P_i(t_n) = \min \left( \frac{\Delta P_L}{2H_{\text{sys}}} \left( \frac{g_2(t_n)}{t_n} - g_1(t_n) \right), P_{\text{re},i} \right) \quad (10)$$

式中， $P_{\text{re},i}$  为机组  $i$  的调频备用容量上限。

当输出功率大于 0 时，由于调速器响应  $\Delta P_i(t_n)$

关于  $t_n$  单调递增, 具体见附录 C 图 C2。且机组调频备用容量的比较计算通常需要在实际系统中在线运行, 为了加快算法的运行速度, 本文考虑引进调速器  $i$  恰好满载时对应的最小频率最低点时间  $t_{m,i}$ 。在离线计算中, 为调速器假设合理的调频备用容量的可能值, 预先计算好对应的  $t_{m,i}$ , 当在线获取该机组的实际调频备用时, 可选取预先计算好的临近调频备用容量下的  $t_{m,i}$  对调速器响应进行纠正。

因此, 通过式(9)以及机组  $i$  的预设调频备用, 可以分析出调速器  $i$  恰好满载时对应的  $t_{m,i}$ 。

$$\Delta P_i(t_{m,i}) = \frac{\Delta P_L}{2H_{\text{sys}}} \left( \frac{g_2(t_{m,i})}{t_{m,i}} - g_1(t_{m,i}) \right) = P_{\text{re},i} \quad (11)$$

将  $t_{m,i}$  时间后的调速器  $i$  的输出功率替换成对应调速器  $i$  的调频备用容量上限, 因此调速器  $i$  的响应如式(12)所示。

$$\Delta P_i(t_n) = \begin{cases} \frac{\Delta P_L}{2H_{\text{sys}}} \left( \frac{g_2(t_n)}{t_n} - g_1(t_n) \right) & t_n < t_{m,i} \\ P_{\text{re},i} & t_n > t_{m,i} \end{cases} \quad (12)$$

对所有调速器的输出功率数据点进行求和得到调速系统的总输出功率  $\Delta P_i(t_n)$ 。

### 2.3 考虑调频备用容量的频率最低值预测方法

根据式(6), 有

$$\Delta f_n = \frac{-\Delta P_L t_n}{4H_{\text{sys}}} \quad (13)$$

根据式(12)和式(13)得到系统总调频量  $P_m$  与  $t_n$  的量化表达式, 如式(14)所示。

$$P_m(t_n) = \sum_{i=1}^N \alpha_i \Delta P_i(t_n) + \frac{\Delta P_L D t_n}{4H_{\text{sys}}} \quad (14)$$

由式(7)可知, 频率最低值时刻系统功率平衡, 即  $\Delta P_L = \Delta P_m(t_n)$ , 因此可快速求解频率最低值时间  $t_n$ , 根据式(13)进而得到频率最低值  $\Delta f_n$ 。

本文所提频率最低值快速预测算法流程如图 4 所示。

## 3 算例分析

### 3.1 方案设计与算例介绍

为验证本文所提模型和算法的有效性, 本文基于小系统(包含 4 台火电机组和 4 台水电机组)和 ACTIVSg2000 大系统进行仿真校验。小系统具体模型参数见附录 A, ACTIVSg2000 大系统模型参数参照文献[33]。

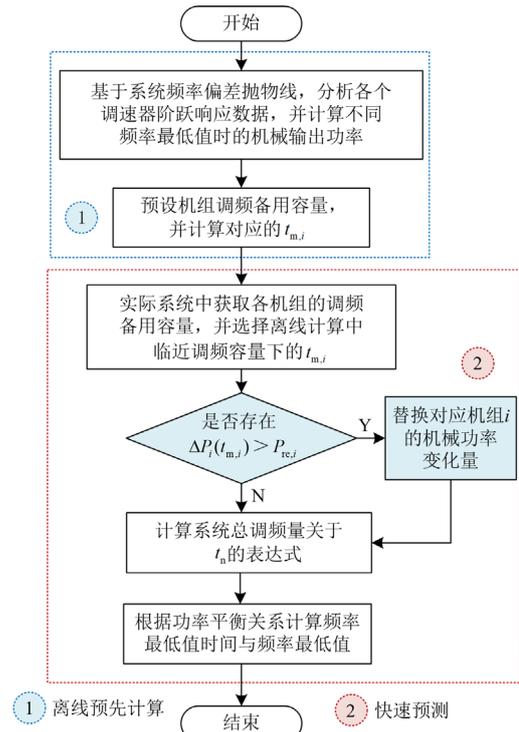


图 4 算法的流程

Fig. 4 Flowchart of the algorithm

### 3.2 小系统分析

在考虑调频备用的情况下, 计算所得理论频率响应抛物线与通过仿真所得到的实际频率曲线拟合程度较高, 如图 5 所示。

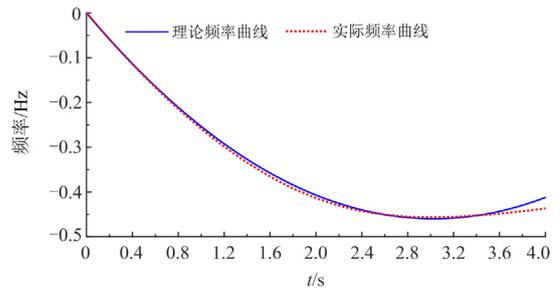


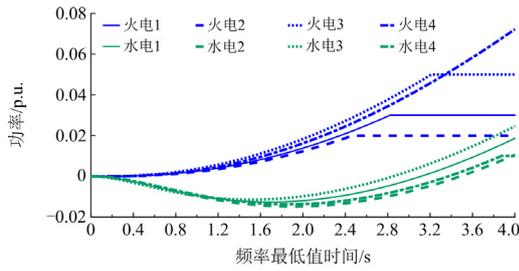
图 5 系统频率偏移曲线

Fig. 5 System frequency deviation curve

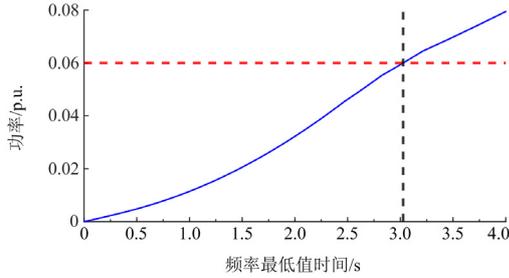
调速器考虑调频备用情况下, 各调速器系统调频机械功率曲线如图 6(a)所示。

根据机组调频曲线可知, 共有 2 台火电在频率最低点时达到调频备用上限, 与理论计算中达到调频备用上限机组数目基本一致。因此本文所提算法计算较为精确可靠。

对调速系统总调频机械功率与系统阻尼功率求和得到系统调频机械功率, 并根据式(14)求得频率最低值时间, 如图 6(b)所示。



(a) 不同调速器响应与频率最低值时间的关系



(b) 系统总调频响应曲线

图 6 调速器调频响应曲线

Fig. 6 Governor frequency regulation response curve

针对小系统，本文方法计算结果与实际仿真计算结果对比如表 1 所示。

表 1 小系统频率最低值及其时间结果对比

Table 1 Comparison of frequency nadir and time of small system

小系统	实际仿真	本文方法	相对误差/%
频率最低值/Hz	-0.4564	-0.4597	0.72
频率最低值时间/s	3.0061	3.0266	0.68

### 3.3 大系统分析

为进一步验证所提模型及算法的有效性，本文基于包含 25 台水电和 41 台火电的 ACTIVSg2000 大系统进行验证。

考虑备用的情况下，所得理论频率响应抛物线仍与通过仿真所得到的实际频率曲线保持较高的拟合精度，如图 7 所示。

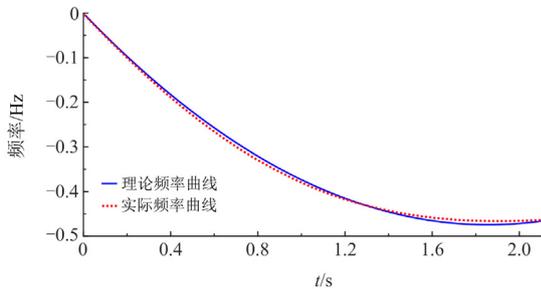


图 7 系统频率偏移曲线

Fig. 7 System frequency deviation curve

其中算法得到共有 5 台火电机组达到调频备用上限，与实际结果一致。针对 ACTIVSg2000 系统，本文

方法计算结果与实际仿真计算结果对比如表 2 所示。

表 2 ACTIVSg2000 系统频率最低值及其时间结果对比

Table 2 Comparison of frequency nadir and time of ACTIVSg2000 system

ACTIVSg2000	实际仿真	本文方法	相对误差/%
频率最低值/Hz	-0.4634	-0.4740	2.29
频率最低值时间/s	1.9357	1.8655	3.63

综合上述分析比较，算例结果验证了本文所提频率最低值预测算法的泛用性和准确度，因此可用于不同运行场景下的大扰动后系统频率最低值快速预测。

## 4 结语

本文提出了一种计及调速系统详细模型和调频备用的频率最低值快速预测方法。所提的频率最低值预测算法与已有预测方法相比，可考虑各机组调速系统详细模型和调频备用在提高预测精度的同时，可加快频率最低值的预测速度，具体如下：在实际运用中，可在事前计算好系统频率最低值时间与各机组调速系统输出功率的量化表达式，在预测时结合上述量化表达式、开机方式和各机组调频备用安排对系统频率最低值进行快速预测。本文所提算法的有效性以小系统和 ACTIVSg2000 大系统为例进行了验证。

电网调频手段日趋丰富和复杂，出现了如风电虚拟惯性响应、储能系统(能量约束型)频率调节以及直流输电系统附加频率控制等复杂新型调频手段，本文所提方法尚未考虑上述手段对频率最低值的影响，后续可进一步开展考虑上述复杂新型调频手段的快速频率最低值预测方法研究。

## 附录 A

小系统仿真模型数据如表 A1 和表 A2 所示。其中， $B_M$  为机组装机容量。

表 A1 水轮机模型参数

Table A1 Hydraulic turbine model parameters

水轮机	G1	G2	G3	G4
$B_M$	20	20	10	10
$T_d$	0.2	0.2	0.2	0.2
$b_p$	0.04	0.04	0.04	0.04
$T_g$	0.4	0.45	0.3	0.5
$K_p$	2	2	2	2
$T_w$	1.9	2.1	1.8	2
$K_i$	3	3	3	3
$\Delta P_{up}$	0.06	0.08	0.03	0.01
$K_d$	1	1	1	1

表 A2 汽轮机模型参数

Table A2 Thermal turbine model parameters

汽轮机	G5	G6	G7	G8
$B_M$	400	300	300	400
$T_g$	0.4	0.5	0.3	0.6
$b_p$	0.04	0.05	0.04	0.05
$T_{ch}$	0.3	0.3	0.4	0.45
$K_p$	5	5	5	5
$T_{rh}$	7	7	8	9
$K_i$	5	5	5	5
$F_{hp}$	0.7	0.7	0.6	0.6
$K_d$	5	5	5	5
$F_{rh}$	0.3	0.3	0.4	0.4
$T_d$	0.02	0.02	0.02	0.02
$\Delta P_{up}$	0.03	0.02	0.05	0.1

## 附录 B

为了进一步调节并校验调速器死区对频率最低值快速预测的影响, 通过算例分析中 ACTIVsg2000 系统频率最低值对比, 结果如表 B1 所示。

表 B1 评估方案结果

Table B1 Results of different evaluation schemes

系统	ACTIVsg2000		
	考虑死区	不考虑死区	差值
频率最低值/Hz	-0.4890	-0.4624	0.0266

由于 ACTIVsg2000 系统的火电机组调速器死区为  $\pm 0.033$  Hz, 与是否考虑死区的系统频率最低值的差值近似。因此, 在考虑调速器死区的情况下, 可对本文所提算法的频率最低值进行校正, 表达式为

$$\Delta f_{n, \text{修正}} = \Delta f_{n, \text{预测}} - |\Delta f_{\text{deadband}, T}|$$

式中,  $\Delta f_{\text{deadband}, T}$  为火电机组调速器死区。校正后的频率最低值与实际考虑调速器死区结果相近, 满足频率最低值快速预测的精度要求。

## 附录 C

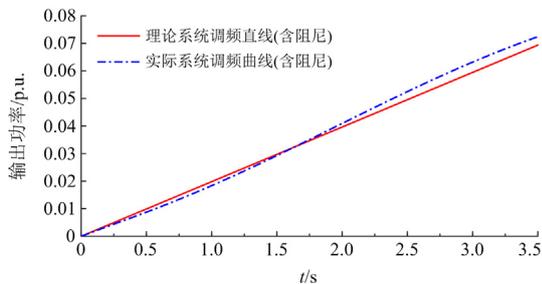


图 C1 系统调速器和阻尼响应曲线

Fig. C1 Overall governor and damping response curve

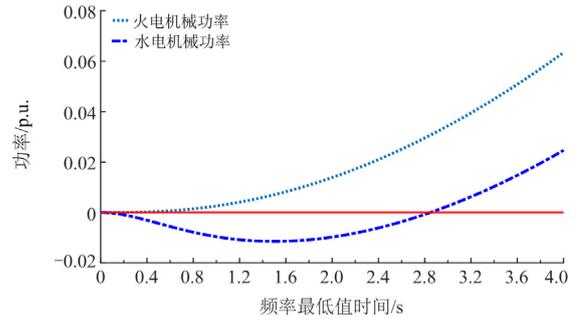


图 C2 不同调速器响应与频率最低值时间的关系

Fig. C2 Relationship of the different governor response with the time of frequency nadir

## 参考文献

- [1] 张子扬, 张宁, 杜尔顺, 等. 双高电力系统频率安全问题评述及其应对措施[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 1-25.  
ZHANG Ziyang, ZHANG Ning, DU Ershun, et al. Review and countermeasures on frequency security issues of power systems with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 1-25.
- [2] 李正文, 王祥旭, 丁奇力, 等. 基于模型-数据融合驱动的频率响应分析方法[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(5): 16-24.  
LIZhengwen, WANG Xiangxu, DING Qili, et al. Model-data integration driven based frequency response analysis method[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(5): 16-24.
- [3] 郭良杰, 王德林, 谢棚, 等. 高风电渗透下电网调峰运行时的频率稳定控制策略研究[J]. 热力发电, 2022, 51(10): 103-113.  
GUO Liangjie, WANG Delin, XIE Peng, et al. Research on frequency stability control strategy of power grid peak shaving operation under high wind power penetration[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(10): 103-113.
- [4] 苏鹏, 陈璐, 吴坚, 等. 新型电力系统多能源能量惯性动态优化控制模型[J]. 电力建设, 2022, 43(9): 87-93.  
SU Peng, CHEN Lu, WU Jian, et al. Dynamic optimal control model of multi-energy inertia in new power system[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(9): 87-93.
- [5] 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 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): 6183-6192.
- [6] 薄其滨, 王晓茹, 刘克天. 基于 v-SVR 的电力系统扰

- 动后最低频率预测[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(7): 83-88.
- BO Qibin, WANG Xiaoru, LIU Ketian. Minimum frequency prediction based on v-SVR for post-disturbance power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(7): 83-88.
- [7] 张怡. 基于深度学习的电力系统扰动后频率预测[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- ZHANG Yi. Deep learning based frequency prediction after power system disturbance[D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [8] 李冠争, 李斌, 王帅, 等. 基于特征选择和随机森林的电力系统受扰后动态频率预测[J]. 电网技术, 2021, 45(7): 2492-2502.
- LI Guanzheng, LI Bin, WANG Shuai, et al. Dynamic frequency prediction of power system post-disturbance based on feature selection and random forest[J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2492-2502.
- [9] 赵冬梅, 郑亚锐, 谢家康, 等. 基于轻量级梯度提升机和生成对抗网络的含风电电力系统频率稳定评估[J]. 电网技术, 2022, 46(8): 3181-3193.
- ZHAO Dongmei, ZHENG Yarui, XIE Jiakang, et al. Frequency stability evaluation of power system containing wind power based on light gradient boosting machine and generative adversarial network[J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 3181-3193.
- [11] 陈哲, 邓宝华, 金建新, 等. 含电-气-热耦合系统的微电网频率安全评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(6): 61-70.
- CHEN Zhe, DENG Baohua, JIN Jianxin, et al. Frequency safety evaluation of microgrid with electricity-gas-heat coupling system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(6): 61-70.
- [11] 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): 61-70.
- 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): 61-70.
- [12] 姚宇, 叶承晋, 朱超, 等. 考虑需求侧快速响应资源的数据驱动频率约束经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(2): 34-45.
- YAO Yu, YE Chengjin, ZHU Chao, et al. Data-driven frequency constrained economic dispatch considering fast demand resources[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(2): 34-45.
- [13] AHMADI H, GHASEMI H. Security-constrained unit commitment with linearized system frequency limit constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1536-1545.
- [14] ZHANG C, LIU L, CHENG H, et al. Frequency-constrained co-planning of generation and energy storage with high-penetration renewable energy[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(4): 760-775.
- [15] OSKOUEE S S, KAMALI S, AMRAEE T. Primary frequency support in unit commitment using a multi-area frequency model with flywheel energy storage[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(6): 5105-5119.
- [16] ZHANG Z, DU E, TENG F, et al. Modeling frequency dynamics in unit commitment with a high share of renewable energy[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(6): 4383-4395.
- [17] 张嘉琪, 胥国毅, 王程, 等. 考虑同步机调差系数灵敏度与频率约束的机组组合[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(13): 102-110.
- ZHANG Jiaqi, XU Guoyi, WANG Cheng, et al. Unit commitment considering the sensitivity of the synchronous generator adjustment coefficient and frequency constraint[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(13): 102-110.
- [18] 周涛, 刘子诚, 陈中, 等. 异步电机频率支撑能力分析及其等效惯量评估[J]. 电力工程技术, 2022, 41(4): 18-24, 107.
- ZHOU Tao, LIU Zicheng, CHEN Zhong, et al. Frequency support capacity of asynchronous motor and its equivalent inertia evaluation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(4): 18-24, 107.
- [19] 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.
- [20] 范成围. 计及调速器非线性的电力系统动态频率特征预测[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- FAN Chengwei. Characteristic prediction of power system dynamic frequency considering governor nonlinearity[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [21] 罗启珩, 王晓茹, 刘金强, 等. 基于调速系统等值模型的电力系统发生扰动后最低频率预测[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(10): 163-167.
- LUO Qiheng, WANG Xiaoru, LIU Jianqiang, et al. Minimum frequency prediction of power system after disturbance based on equivalent model of governor system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10): 163-167.

- [22] 刘柳, 李卫东, 唱友义, 等. 大功率缺失下频率最低点估计的低阶仿真模型[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(17): 78-83.  
LIU Liu, LI Weidong, CHANG Youyi, et al. Low-order simulation model for frequency nadir estimation with high power deficit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(17): 78-83.
- [23] 张英敏, 彭泽峰, 彭乔, 等. 预测新能源接入电网受扰后频率最低点的通用 ASF 模型[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1788-1799.  
ZHANG Yingmin, PENG Zefeng, PENG Qiao, et al. Generic ASF model of new-energy-integrated power grid for frequency nadir estimation under disturbance[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1788-1799.
- [24] BAŠKARAD T, KUZLE I, HOLJEVAC N. Photovoltaic system power reserve determination using parabolic approximation of frequency response[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(4): 3175-3184.
- [25] LIU L, LI W, BA Y, et al. An analytical model for frequency nadir prediction following a major disturbance[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 2527-2536.
- [26] 杨牧青, 王程, 葛辰雨, 等. 考虑多阻尼状态与限幅环节的新能源电力系统一次调频备用整定[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-13[2023-03-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20230301.1119.003.html>.  
YANG Muqing, WANG Cheng, GE Chenyu, et al. Primary frequency regulation reserve procurement of renewable energy power system considering multiple damping states and governor limiters[J/OL]. Proceeding of the CSEE: 1-13[2023-03-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20230301.1119.003.html>.
- [27] 申家锴, 李卫东, 李正文, 等. 计及一次调频死区与限幅的高比例风电电力系统机组组合[J]. 电网技术, 2022, 46(4): 1326-1337.  
SHEN Jiakai, LI Weidong, LI Zhengwen, et al. Unit commitment of power system with high proportion of wind power considering the deadband and limiter of primary frequency response[J]. Power System Technology, 2022, 46(4): 1326-1337.
- [28] CHAN M L, DUNLOP R D, SCHWEPPE F. Dynamic equivalents for average system frequency behavior following major disturbances[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1972 (4): 1637-1642.
- [29] COMM R. Dynamic models for steam and hydro turbines in power system studies[J]. IEEE transactions on power apparatus and systems, 1973(6): 1904-1915.
- [30] 国家能源局. 电力系统安全稳定导则: GB 38755—2019[S]. 北京: 中国电力出版社, 2019.
- [31] CAI G, ZHOU S, LIU C, et al. Hierarchical under frequency load shedding scheme for inter-connected power systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(2): 556-567.
- [32] CHÁVEZ H, BALDICK R, SHARMA S. Governor rate-constrained OPF for primary frequency control adequacy[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(3): 1473-1480.
- [33] BIRCHFIELD A B, XU T, GEGNER K M, et al. Grid structural characteristics as validation criteria for synthetic networks[J]. IEEE Transactions on power systems, 2016, 32(4): 3258-3265.

收稿日期: 2023-09-02; 修回日期: 2023-12-27

作者简介:

莫维科(1992—), 男, 博士, 研究方向为电力系统稳定分析; E-mail: eewkmo@gmail.com

严焕斌(2002—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定分析; E-mail: 786735605@qq.com

陈皓勇(1975—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力经济与电力市场、电力系统规划运行与控制。E-mail: eehychen@scut.edu.cn

(编辑 魏小丽)