

短时数据驱动的新能源电力系统频率稳定 在线预测

王清宇¹, 王桢祎²

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012;

2. 国网黑龙江省电力有限公司经济技术研究院, 黑龙江 哈尔滨 150000)

摘要: 低惯量系统在扰动下的频率响应轨迹的最低点可以作为频率安全状态评估的重要指标。因此, 提出了一种基于短时数据驱动的频率最低点的在线预测方法。首先, 揭示了频率响应轨迹最低点特征的产生原因, 并给出相应的表征方法。然后, 通过使用广义频率响应模型推导出频率最低点的时域解析表达式。对于模型中较难获得的频率控制参数, 以发电机组频率偏差量为输入, 有功出力为输出, 利用基于最小二乘法的参数识别来获取。由于该方法利用扰动后的初始频率轨迹来预测频率最低点, 因此系统自身的响应数据能够提高预测结果的准确性。在改进的 39 节点系统中所提频率轨迹最低点预测方法的有效性进行了验证, 通过与基于模型驱动的预测方法的计算结果进行对比, 进一步证明了该方法的实用性。

关键词: 低惯量电力系统; 频率稳定; 频率最低点; 数据驱动

Online prediction of new energy power system frequency stability by short-term data-driven

WANG Qingyu¹, WANG Zhenyi²

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China; 2. Economic and Technical Research Institute of State Grid Heilongjiang Electric Power Co., Ltd., Harbin 150000, China)

Abstract: It is particularly important to obtain the nadir point of the frequency response trajectory of a low-inertia system under disturbance, as it can serve as a crucial indicator for frequency security state assessment. Therefore, this paper proposes an online prediction method for the frequency nadir point based on short-term data-driven approaches. First, the paper reveals the causes of the frequency response trajectory nadir point's characteristics and its representation methods. Then, using a generalized frequency response model, the time-domain analytical expression for the frequency nadir point is derived. For the frequency control parameters in the model that are difficult to obtain, the generator frequency deviation is used as the input and the active power output as the output, with parameter identification based on least squares method to acquire the values. Since this method uses the initial frequency trajectory after disturbance to predict the frequency nadir point, the system's own response data can enhance the accuracy of the prediction results. The effectiveness of the proposed frequency nadir point prediction method is verified using an improved New England 39-bus system. By comparing the results with those from a model-driven prediction method, the practical applicability of this approach is further demonstrated.

Keywords: low-inertia power system; frequency stability; frequency nadir; data-driven

0 引言

随着新能源大规模接入电网，电力系统面临着前所未有的低惯量风险。由于接入新能源的电力电子元件是非旋转的静止元件^[1]，随着其接入规模的增大并逐步替换常规旋转电源，系统等效转动惯量急剧降低，应对功率缺额和功率波动的能力随之减弱，导致电网频率问题愈发严重^[2-3]。

当系统发生扰动后，若频率变化保持在国标规定的范围之内，则系统是稳定安全的^[4]。在高比例新能源电网中，易发生新能源场站脱网故障，这会导致系统频率跌落超出规定范围，触发电网第三道防线动作^[5]。为保障电网的频率安全，需要准确预测电网频率动态特征，从而为电网调度以及新能源场站频率支撑策略提供指导。其中，预测电网在扰动下的频率最低点是否超过电网规范限值，对频率安全状态评估非常重要^[6-7]。

当前，预测系统扰动后频率动态特征的主要方法包括时域仿真法^[8-9]、人工智能法^[10-11]和等效模型法^[12-13]。时域仿真法因考虑了电力系统各个元件的详细参数，具有信息详细、计算准确度高且仿真误差小的优点，但在分析大规模电网时，建模困难且计算量大，耗时较长；人工智能法可有效处理物理模型非线性和复杂的问题，训练速度快，泛化能力强，但对数据样本要求高且可解释性差，当系统模型发生改变时，往往需要重新训练；等效建模法通常忽略网络特性，保留系统中影响频率变化的关键环节，具有建模简单、计算速度快的特点，是当前最受关注且应用最广的方法。其中，平均系统频率模型^[14]与系统频率响应模型^[15]应用最为广泛。

建立具有初级频率控制的低阶频率响应模型，是分析频率轨迹和预测频率最大偏差的基础。文献[16]提出一种改进的综合惯性控制策略，并在此条件下推导出电力系统频率响应模型描述系统频率的解析表达式，分析系统的频率稳定性；文献[17]建立了含高风电渗透的互联电力系统频率响应模型，并通过容量加权平均法将其聚合为单机模型；文献[18]以抛物线频率偏差

为输入，建立频率最低点预测的分析模型，打破了闭环系统，使调速器响应和频率偏差的计算解耦，并用多项式拟合法来刻画各调速器的主频响应特性。上述文献都是在已知系统模型参数的情况下建立频率响应模型，而实际工程应用中，系统模型参数通常是未知的。近年来，以通信技术和相量测量单元为基础的广域量测技术在电力系统中的应用日益广泛^[19]，该技术能实时采集并上传各量测点的电网运行状态数据，基于测量数据建立相应的频率响应等效模型。文献[20]根据双馈异步风电机组的风速、频率和并网功率，建立了频率响应降阶模型，该模型可以较为准确地反映附加频率控制下双馈风电场的频率响应特性，但并没有考虑系统中其他频率控制的影响；文献[21]基于风电场公共并网点相量测量单元的实测数据，构建风电场的详细动态等效模型，针对时变参数采用基因学习粒子群混合算法进行参数辨识，但是受系统模型和运行方式的影响较大；文献[22]提出了一种基于广域量测信息的物理-数据融合频率偏差极值在线预测方法，该方法以受扰动后系统的暂态运行数据作为模型输入，可实现频率偏差极值的在线快速预测，虽然该方法在一定程度上具有很好的可解释性，但是迭代求解的过程常常出现无解的情况。

针对上述出现的问题，本文提出了一种基于扰动后初始频率轨迹的频率稳定预测方法。该方法考虑了整个系统的频率控制，对系统的适应性好，同时也易于求解。首先，对频率响应轨迹最低点形成进行了数学分析；然后，通过使用广义频率响应模型，推导出频率最低点的时域解析表达式，并利用量测数据来获取频率响应模型中的频率控制参数，将频率最低点预测问题转化为参数识别问题。

1 频率响应动态过程

1.1 频率响应模型

电力系统频率可以反映发电机转速的变化。如果忽略系统中功率角和电压快速变化的动态特

性，以及网络结构的影响，那么可以使用同步机转子运动方程来描述电网频率的动态响应过程，即

$$\Delta P_m(t) - \Delta P_d(t) - D\Delta f(t) = M\Delta \dot{f}(t) \quad (1)$$

式中， ΔP_m 为系统总机械功率偏差； ΔP_d 为系统的功率缺额，即电磁功率偏差； M 为系统等效惯量； D 为系统等效阻尼系数。

通过对式（1）中的微分项进行拉普拉斯变换，可以得到

$$\Delta P_m(s) - \Delta P_d(s) = (Ms + D)\Delta f(s) \quad (2)$$

在频率控制 $G(s)$ 的作用下， ΔP_m 会随频率偏差 Δf 的变化而变化。 $G(s)$ 的目标是抑制频率出现偏差，因此在频率偏差与机械功率偏差之间形成负反馈，形成的闭环结构如图1所示。

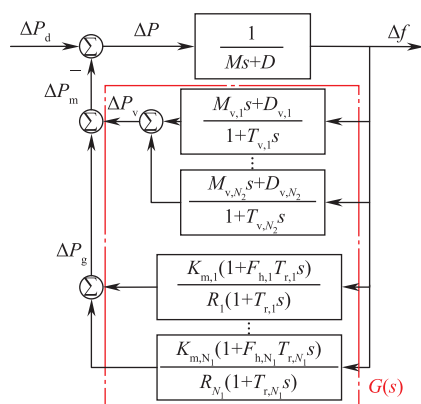


图1 电力系统频率响应模型

Fig. 1 Power system frequency response model

图1中， ΔP_g 为系统中传统火电机组的总功率偏差，其调频控制可用一阶惯性环节来表示，即

$$\Delta P_g = \sum_{i=1}^{N_1} \frac{K_{m,i}(1 + F_{h,i}T_{r,i}s)}{R_i(1 + T_{r,i}s)} \Delta f \quad (3)$$

式中， K_m 为机械功率增益系数； F_h 为高压缸功率比； T_r 为再热时间常数； R 为调制系数； N_1 为参与调频的火电机组总数。

ΔP_v 表示系统中新能源机组的总功率偏差，其调频控制采用虚拟惯量控制来表示，即

$$\Delta P_v = \sum_{j=1}^{N_2} \frac{M_{v,j}s + D_{v,j}}{1 + T_{v,j}s} \Delta f \quad (4)$$

式中， M_v 为虚拟惯量系数； D_v 为阻尼系数； T_v 为变流器时间常数； N_2 为参与调频的新能源机组总数。

1.2 频率稳定评价指标

预测电网在扰动下的频率最低点是否超过电网规范限值，对频率稳定评价指标非常重要。频率稳定性评价指标通常用于衡量系统频率恢复的速度和程度，反映系统在扰动后是否能维持稳定的频率运行，这一评估往往是基于频率最低点的变化来进行的。频率最低点通常是系统频率响应中的关键点，能够反映出系统对扰动的抵抗能力和恢复能力。频率最低点的值越低，意味着系统对扰动的响应越剧烈，恢复的难度也越大。

根据图1所示，当确定系统的惯量和阻尼时，频率轨迹可以看作是一个以 ΔP_m 与 ΔP_d 叠加为输入的惯性响应。 ΔP_m 实际表征的是发电机转子的机械转矩，而 ΔP_d 表征的是发电机转子的电磁转矩，通过对比两种转矩的大小，即可分析出频率最低点形成的原因，如图2所示。

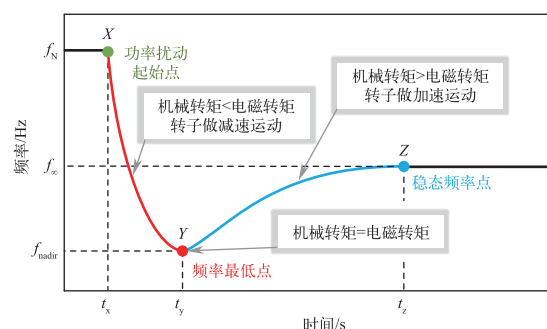


图2 电力系统频率响应最低点形成的表征

Fig. 2 Characterization of power system frequency response nadir shape

当系统出现有功缺额时，电磁转矩将会激增，电磁转矩大于机械转矩，转子将会进行减速运动；此时调速器会增大汽门开度，机械转矩逐渐增加，转子做加速度减小的减速运动，对应于图2中显示的XY段。当机械转矩增加到和电磁转矩相同时，转子将不再减速，达到最低转速时，即为频率的最低点，对应于图2中显示的Y点。由于调速器的惯性作用和频率偏差的存在，频率无法保持在Y点。例如，再热式汽轮机存在由调速器再热时间常数来衡量的再热段充汽时延，以及等效高压缸做功比例的影响，机械转矩还会继续增加，此时转子将开始做加速运动；当停止增加

汽门开度的信号送达时，涡轮转矩达到最大值，且大于电磁转矩，接下来调速器发出减小汽门的信号，转子将做加速度减小的加速运动；当机械转矩减小到和电磁转矩相同时，此时到达Z点，对应于图2中显示的YZ段。

2 频率最低点的在线预测

2.1 频率最低点解析

由图2可以发现，频率最低点发生在机械转矩与电磁转矩相等处。根据式（1）可知，此时频率的变化率为零，因此可以通过这一条件确定频率最低点的解析表达式。在求频率最低点之前，还需要先求出频率控制 $G(s)$ 。

由图1可知，频率控制 $G(s)$ 包含传统频率控制特性和新能源机组的频率控制特性。观察式（3）和式（4）可以发现，频率控制特性皆由一阶惯性环节构成，因此采用具有一阶零极点的通用模型结构来表征各个机组频率偏差与机械功率偏差之间的耦合，即

$$G_k(s) = \frac{\Delta P_{m,k}}{\Delta f_k} = \frac{as+b}{cs+d} \quad (5)$$

式中， a 、 b 、 c 和 d 为第 k 台机组所对应的频率控制参数。

由于系统整体调频产生的机械功率可以视为各个调频单元产生机械功率的线性叠加，因此系统整体调频模型可以视为各个调频模型在数学上的叠加，则有

$$G(s) = \sum_{k=1}^N G_k(s) = \frac{\alpha s + \beta}{\lambda s + \gamma} \quad (6)$$

式中， α 、 β 、 λ 和 γ 为整个系统的频率控制参数； N 为参与调频的机组总数， $N=N_1+N_2$ 。

将频率控制 $G(s)$ 用式（6）表示，从而得到如图3所示的频率响应模型。

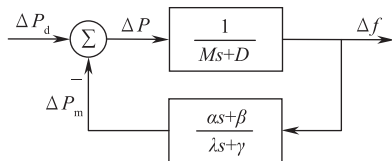


图3 简化的频率响应模型

Fig. 3 Simplified frequency response model

在该模型中，前向通道由惯量和阻尼构成，而反馈通道则涵盖了系统中频率调节的综合效应，即所有发电机组的机械功率叠加。在已知系统惯量和阻尼的情况下，只要确定模型中的四个参数 α 、 β 、 λ 和 γ ，就可以分析频率响应。根据图3所示的模型，频率的时域表达式可推导为

$$\Delta f(t) = \frac{\Delta P_d}{\lambda M} \left(\frac{\gamma}{\omega_n^2} + A e^{-\xi \omega_n t} \sin(\omega_r t + \theta) \right) \quad (7)$$

其中

$$\begin{cases} \xi = \frac{\gamma M + \lambda D + \alpha}{2\sqrt{\lambda M(\gamma D + \beta)}} \\ \omega_r = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}, \quad \omega_n = \sqrt{\frac{\gamma D + \beta}{\lambda M}} \\ A = \frac{1}{\omega_r \omega_n} \sqrt{\frac{\lambda \beta - \gamma \alpha}{M}} \\ \theta = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda \omega_r}{\gamma - \lambda \xi \omega_n} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{\omega_r}{-\xi \omega_n} \right) \end{cases} \quad (8)$$

由1.2节的分析可知，当频率变化率为零时，频率响应出现最低点，则有

$$\Delta f_{\text{nadir}} = \frac{\Delta P_d}{\lambda M} \left(\frac{\gamma}{\omega_n^2} - A \omega_r e^{-\xi \omega_n t_{\text{nadir}}} \right) \quad (9)$$

其中

$$t_{\text{nadir}} = \frac{1}{\omega_r} (-\theta_1) \quad (10)$$

式（9）即为频率最低点的解析表达式，该表达式由参数 α 、 β 、 λ 、 γ 、 M 和 D 组成。在已知惯量和阻尼的情况下，如果在频率最低点出现之前可以获取到 α 、 β 、 λ 、 γ 四个参数，就可以利用式（9）预测出频率最低点。

2.2 数据驱动的频率最低点分析

在系统辨识领域中，最小二乘法是一种基本的估计方法。最小二乘法根据系统的输入输出时间函数来建立一个能模仿真实系统行为的数学模型，数据的准确性将决定最终模型的准确性。以通信技术和相量测量单元为基础的广域量测技术在电力系统中的广泛应用，为频率的在线预测提供了更多、更准确的数据样本，针对样本中的不良数据，可采用状态估计进行剔除。确定 $G(s)$ 的

四个参数 α 、 β 、 λ 、 γ ，可以先利用以最小二乘法为核心的系统进行识别，以获取各台机组的频率控制，即

$$\hat{G}_k(s) = \frac{\hat{a}s + \hat{b}}{\hat{c}s + \hat{d}} \quad (11)$$

然后通过式(6)叠加求得系统整体调频控制 $G(s)$ 中的四个参数 α 、 β 、 λ 、 γ 。通常使用 $G_k(s)$ 两端的信号来构建数据集。由 $G_k(s)$ 端口输入和输出信号的物理意义可知，其分别代表着调频单元 k 所感知到的频率和调节的机械功率。在配有丰富量测装置的实际电力系统中，获取这两种信号已经不再是难题。

1) 利用双线性变换法将式(5)转化为 z 域，即 $s = 2(1-z^{-1})/T(1+z^{-1})$ ， T 为采样时间间隔，则有

$$G_k(z) = G_k(s) \Big|_{s=\frac{2(1-z^{-1})}{T(1+z^{-1})}} = \frac{\frac{2a+bT}{2c+dT} + \frac{bT-2a}{2c+dT}z^{-1}}{1 + \frac{dT-2c}{2c+dT}z^{-1}} \quad (12)$$

$$= \frac{B_0 + B_1z^{-1}}{1 + b_1z^{-1}} = \frac{Bz^{-1}}{bz^{-1}}$$

式中， B_0 、 B_1 和 b_1 为 $G_k(z)$ 的待辨识参数； Bz^{-1} 和 bz^{-1} 为单位后移算子的多项式。

基于 $G_k(z)$ 以频率偏差为输入、系统一次调频增发功率为输出建立待辨识单一调频单元模型，公式为

$$\Delta P_m(t_k) = G_k(z)\Delta f(t_k) \quad (13)$$

式中， t_k 为采样时间点； $\Delta P_m(t_k)$ 为 t_k 时刻的系统一次调频增发功率，即输出信号； $\Delta f(t_k)$ 为 t_k 时刻的频率偏差，即输入信号。

2) 将式(13)差分化，得出对应的向量方程形式为

$$\Delta P_m(t_k) = X^T(t_k)\theta \quad (14)$$

式中， $X(t_k) = [P^T(t_k), F^T(t_k)]^T$ 为信息向量； $P(t_k) = [-\Delta P_m(t_k - 1)]^T$ 为系统一次调频增发功率向量； $F(t_k) = [\Delta f(t_k - 1), \Delta f(t_k)]^T$ 为频率偏差向量； $\theta = [b_1, B_1, B_0]^T$ 为待辨识参数向量。

设采样数据长度为 L ，则在每个时间步长 t 内，有

$$P = X\theta \quad (15)$$

式中， $P = [\Delta P_m(t_1), \dots, \Delta P_m(t_k), \dots, \Delta P_m(t_L)]^T$ 为系统一次调频增发功率矩阵； $X = [X^T(t_1), \dots, X^T(t_k), \dots, X^T(t_L)]^T$ 为信息矩阵； $\theta = [b_1, B_1, B_0]^T$ 为待辨识参数向量。

3) 为了衡量式(14)辨识得到的模型与实际过程的接近程度，使用最小二乘法来衡量二者之间的偏差，公式为

$$J(\theta) = \sum_{k=1}^L [\Delta P_m(t_k) - X^T(t_k)\theta]^2 \quad (16)$$

式中， $\Delta P_m(t)$ 为基于时域仿真得到的系统一次调频增发功率； $X^T(t)$ 为辨识得到的系统一次调频增发功率； k 为采样时间序号； L 为采样数据长度。

当式(16)对 θ 求偏导数结果为零时，等价值则取最小值，解得

$$\theta = (X^T X)^{-1} X^T P \quad (17)$$

将式(17)辨识后的参数 $\hat{\theta}$ 代入到式(18)中，根据拉普拉斯逆变换确定 $G_k(s)$ 中的参数，得到调频单元 k 的调频模型 $G_k(s)$ 表达式为

$$G_k(s) = G_k(z) \Big|_{z=\frac{2+Ts}{2-Ts}} \quad (18)$$

将辨识得到的 $G_k(s)$ 通过式(6)叠加，即可获取 $G(s)$ 中 α 、 β 、 λ 和 γ 的具体值，建立系统整体频率控制 $G(s)$ 。将得到的参数 α 、 β 、 λ 和 γ 代入式(9)中，即可预测频率最低点。

基于初始频率响应最低点预测方法总结如下。

1) 采集最低点出现之前的各台机组的频率偏差与有功出力增量，以频率偏差为输入、有功出力增量为输出建立数据集。

2) 利用最小二乘法辨识各台机组频率控制 $G_k(s)$ 中的参数 a 、 b 、 c 和 d 。

3) 将各台机组频率控制 $G_k(s)$ 叠加，得到系统整体频率控制 $G(s)$ ，同时得到参数 α 、 β 、 λ 和 γ 。

4) 将参数 α 、 β 、 λ 和 γ 代入式(9)中，预测频率稳定性。

3 算例分析

本节将基于DIgSILENT PowerFactory软件

中改进的39节点系统，对提出的频率轨迹最低点预测方法进行验证，如图4所示。

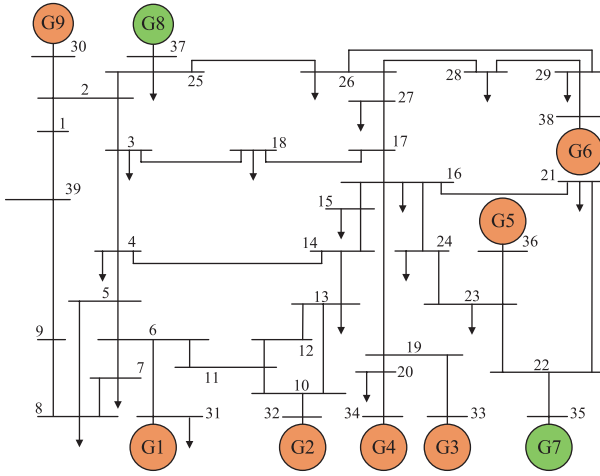


图4 改进的39节点系统

Fig. 4 Improved 39-node system

图4中，改进的39节点系统由9台发电机组组成，包括配备经典频率控制的传统同步发电机（G1~G6、G9）和配备虚拟惯量控制的风电场（G7、G8）。测试系统的基准功率为6 800 MW，系统惯量为3.96（pu），阻尼为0.26（pu），以各机组的容量进行加权平均计算，计算公式为

$$S = \sum_{i=1}^N S_i, M = \frac{\sum_{i=1}^N M_i S_i}{S}, D = \frac{\sum_{i=1}^N D_i S_i}{S} \quad (19)$$

式中， S 为系统总容量； M 为系统惯量； D 为系统阻尼； N 为参与调频的机组数量。

仿真步长设置为0.01 s。经典频率控制参数见表1，虚拟惯量控制参数见表2。

表1 经典频率控制参数

Tab. 1 Parameters of classical frequency control

机组	K_m	R	T_r	F_h
G1	1.00	0.05	9.00	0.25
G2	1.00	0.05	9.00	0.25
G3	0.95	0.05	8.00	0.25
G4	0.95	0.05	8.00	0.25
G5	1.00	0.05	9.00	0.25
G6	1.00	0.05	9.00	0.25
G9	0.90	0.04	7.00	0.30

表2 虚拟惯量控制参数

Tab. 2 Parameters of virtual inertia control.

机组	M_v	D_v	T_v
G7	5.00	1.00	7.00
G8	5.00	1.00	7.00

在0 s时刻，对改进的39节点系统施加0.05（pu）的扰动量，仿真频率轨迹如图5所示。可以观察到最低点出现在3.06 s，数值为49.798 Hz，记为 F_{nadir} 。频率偏差 ΔF_{nadir} 为-0.202 Hz，将该值作为后续预测频率最低点所要对照的实测值。

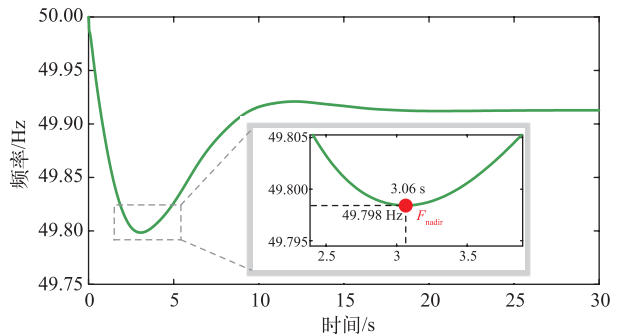


图5 仿真频率响应轨迹

Fig. 5 Simulation frequency response trajectory

为了衡量预测值与实测值之间的接近程度，定义一个相对误差函数 E 作为指标， E 越小，表示预测值越贴近实测值，公式为

$$E = \frac{\Delta f_{\text{nadir}} - \Delta F_{\text{nadir}}}{\Delta F_{\text{nadir}}} \times 100\% \quad (20)$$

式中， Δf_{nadir} 为预测值； ΔF_{nadir} 为实测值。

频率最低点在3.06 s时刻出现，这意味着只能用3.06 s之前的数据来预测频率最低点。最理想的情况下，数据采集截止时间接近频率最低点出现时间，同时考虑实际信号传输还需要一部分时间，故选择0~2.8 s的频率响应轨迹和有功出力作为理想情况下的数据集，如图6a所示。通过本文提出的方法，预测出的频率最低点出现在3.03 s，数值为49.802 Hz，频率偏差为-0.198 Hz。通过对其误差函数的计算结果可以看出，预测的频率最低点与实际的频率最低点高度接近，这说明了本文所提预测方法的准确性。

上述预测是在理想情况下进行的，频率最低点紧跟在测量数据之后，对参数辨识来说，预测距离测量数据越近的点越准确。在实际情况中，可供利用的数据有限，系统的扰动量越大，频率最低点出现的时间越接近扰动起始时刻。因此，探究测量数据的长短对预测的影响至关重要。考虑到功率扰动起始点到频率最低点附近之间的频率响应轨迹的斜率相差不大，以0.7 s为间隔，将理想情况下的时间段0~2.8 s逐渐减小到0~0.7 s，三个时间段对应的频率响应轨迹如图6b~d所示。

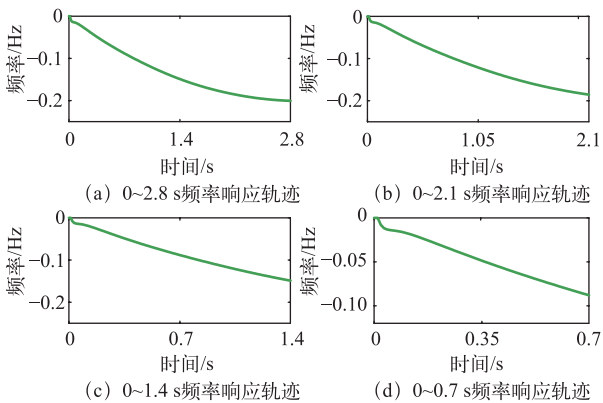


图6 不同时间段的频率响应轨迹

Fig. 6 Frequency response trajectory for different time periods

同样，将这三条轨迹分别作为输入，使用本文提出的方法对频率最低点进行预测，预测结果见表3。随着测量数据的缩短，频率最低点预测值与实际值之间的相对误差逐渐增大，在0~0.7 s时间段达到最大值。出现这种情况可能是由于同步发电机调速器的惰性，机械功率无法瞬时跟随功率扰动的变化而变化，系统在0.7 s之前的频率控制较弱，因此在测量数据的频率响应轨迹中没有明显的频率控制特征。此时的相对误差明显高于其他误差，约为两倍，但与实际值仅相差0.016 Hz，表明在频率控制较弱的情况下，本文所提出的方法预测仍具有一定的有效性。

为了探究相同时间尺度下不同扰动量对频率预测的影响，又增设了新的对比试验。考虑到扰动量越大，频率最低点出现的时间越接近扰动起始时刻，所能采集到的数据越少，因此以扰动量最大的情况来制定时间尺度。对系统分别设定

1.2 (pu)、1.0 (pu)、0.8 (pu)和0.6 (pu)的扰动量，取0~1.4 s时刻的频率响应轨迹，四个不同扰动量对应的频率响应轨迹如图7所示。

表3 不同时间段的最低点预测

Tab. 3 Prediction of the nadir point for different time periods

时间段/s	预测时间/s	预测值/Hz	相对误差 (%)
0~2.8	3.03	-0.198	1.980
0~2.1	2.99	-0.196	2.970
0~1.4	2.92	-0.193	4.455
0~0.7	2.85	-0.186	7.921

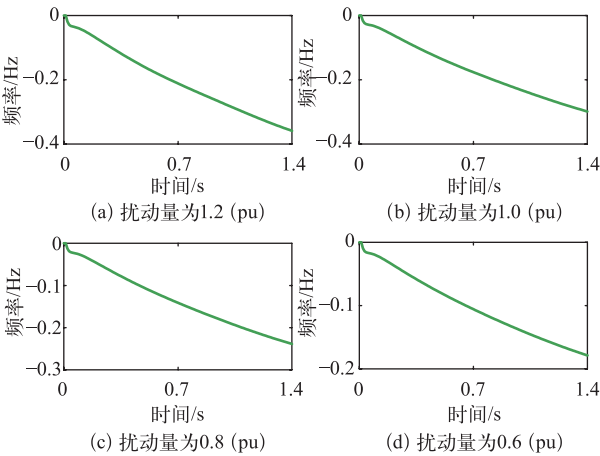


图7 相同时间尺度下不同扰动量的频率响应轨迹

Fig. 7 Frequency response trajectories for different disturbance magnitudes under the same time scale

与之相对应的预测值与绝对误差（预测值与实际值之间的数值差）见表4。

表4 相同时间尺度下不同扰动量的最低点预测

Tab. 4 Prediction of the nadir point for different disturbance magnitudes under the same time scale

扰动量 (pu)	实际值/Hz	预测值/Hz	绝对误差/Hz
1.2	-0.486	-0.479	0.007
1.0	-0.404	-0.396	0.008
0.8	-0.323	-0.315	0.008
0.6	-0.242	-0.233	0.009

随着扰动量的逐渐增大，预测值与实际值的相对误差有逐渐减小的趋势。这是由于随着扰动量的增加，采集的数据距离实际频率最低点越来越近，变相增加了数据长度，使辨识得到的参数更加精准，预测值更接近实际值。0.6 (pu) 的扰动量预测误差最大，与实际值也仅相差0.009 Hz，

表明本文所提方法面对不同扰动量的情况, 预测依然有效。虽然扰动量对预测结果具有一定的影响, 但是远没有时间尺度对预测结果的影响大。在实际应用中, 应尽可能地减少数据采集时间和预测时间, 进而实现增加数据时间尺度的效果。

为了进一步分析所提方法的实用性, 利用文献[16]中提出的基于模型驱动的预测方法与本文所提方法作对比试验。根据文献[16]预测频率最低点出现在2.95 s, 数值为49.805 Hz, 频率偏差为-0.195 Hz。该方法与本文所提方法得到的计算结果差别不大, 但是本文提出的基于数据驱动的预测方法不需要事先知道系统模型, 更符合实际工程情况, 进一步说明了本文所提方法的实用性更强。

4 结束语

本文提出了一种基于短时数据驱动的频率稳定在线预测方法, 该方法可以通过扰动后的初始阶段实现。在不了解系统具体模型的情况下, 利用以最小二乘法为核心的参数辨识获取系统频率控制模型, 具有一定的工程实用性。由于该方法利用扰动后的初始频率轨迹来预测频率最低点, 系统自身的响应数据能够提高预测结果的准确性, 用包含七个同步发电机和两个新能源风电场的改进39节点系统, 对提出的最低点预测方法的有效性进行了验证。随着测量数据时间段的减小, 预测值与实际值之间的误差并未成比例增加, 这意味着对于快速响应的电网, 该方法依然适用。下一步的研究将集中于如何基于预测的最低点加强电力系统的第三道防线, 例如在频率响应模型中增加低频减载闭环控制, 使得系统在面对低频问题时不发生解列等风险, 依然能保持安全稳定运行。

参考文献

[1] 贾焦心, 杨添淇, 颜湘武, 等. 电力电子并网装备等效惯量评估研究进展[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(9): 3-10.

[2] 滕贤亮, 谈超, 昌力, 等. 高比例新能源电力系

统有功功率与频率控制研究综述及展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(15): 12-35.

- [3] DELKHOSH H, SEIFI H. Power system frequency security index considering all aspects of frequency profile[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(2): 1656-1659.
- [4] 闫炯程, 李常刚, 刘玉田. 数据驱动的新型电力系统安全风险预警综述[J]. 电网技术, 2024, 48(12): 4989-5002.
- [5] 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.
- [6] 张宇博, 杨松浩, 郝治国. 最大化电力系统频率最低点的并网风电机组频率支撑控制[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(8): 141-151.
- [7] ZHAO X X, XUE Y, ZHANG X P. Fast frequency support from wind turbine systems by arresting frequency nadir close to settling frequency[J]. IEEE Open Access Journal of Power and Energy, 2020(7): 191-202.
- [8] 李永康, 刘宝柱, 胡俊杰. 基于数据驱动与时域仿真融合的电力系统暂态稳定快速评估[J]. 电网技术, 2023, 47(11): 4386-4396.
- [9] 姜妍, 彭克, 赵学深, 等. 基于非线性解耦方法的交直流配电系统暂态稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(17): 56-65.
- [10] 裴铭, 李奕霖, 叶林, 等. 考虑惯量时空特性的系统频率响应组合预测[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(S1): 57-69.
- [11] WANG W Z, WANG Z W, LIU X, et al. Frequency response mode prediction of power system after large disturbances based on deep belief neural network[J]. IEEE Access, 2023(11): 113653-113666.
- [12] DAI J F, TANG Y, et al. An extended SFR model with high penetration wind power considering operating regions and wind speed disturbance[J]. IEEE Access, 2019(7): 103416-103426.
- [13] 姜涛, 常文文, 刘先超, 等. 考虑信息隐私的大

- 规模风电并网系统实用频率响应模型及其参数辨识方法[J]. 电网技术, 2024, 48(12): 4876-4885.
- [14] 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, 91(4): 1637-1642.
- [15] ANDERSON P M, MIRHEYDAR M. A low-order system frequency response model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(3): 720-729.
- [16] CHU Z D, MARKOVIC U, HUG G, et al. Towards optimal system scheduling with synthetic inertia provision from wind turbines[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(5): 4056-4066.
- [17] YAN K F, LI G Q, ZHANG R F, et al. Aggregated SFR model for VSC HVDC interconnected power systems with high penetration of wind power[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 216: 109018.
- [18] LIU L, LI W D, 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.
- [19] HONG Q T, KARIMI M, SUN M Y, et al. Design and validation of a wide area monitoring and control system for fast frequency response[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 3394-3404.
- [20] 陈鹏伟, 戚陈陈, 陈新, 等. 附加频率控制双馈风电场频率响应特性建模与参数辨识[J]. 电工技术学报, 2021, 36(15): 3293-3307.
- [21] 张剑, 崔明建, 何怡刚. 基于PMU实测数据的DFIG风电场等值模型鲁棒性与适应性分析[J]. 太阳能学报, 2023, 44(10): 320-328.
- [22] 张钢, 邓贤哲, 马晓伟, 等. 基于广域测量信息的物理-数据融合频率偏差极值在线预测[J]. 电力建设, 2023, 44(8): 1-12.

作者简介

王清宇（1997—），男，硕士研究生，研究方向为电力系统稳定分析。

王桢祎（1992—），女，研究方向为电力系统稳定分析。

（收稿日期：2024-12-31）