

基于全变差正则化的电力系统惯量评估方法

杨灵睿¹, 郭成¹, 郭圳², 代瑞¹, 戴景³

(1. 昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 昆明理工大学 机电工程学院, 云南 昆明 650500;
3. 云南电网有限责任公司人才发展中心, 云南 昆明 650500)

摘要:针对惯量常数评估过程中存在的计算精度和运算时间问题,提出一种基于log-cosh函数全变差正则化的电力系统惯量评估方法。通过全变差正则化得到频率量测数据的泛化函数,结合L曲线得到正则化参数的曲率函数,并利用log-cosh函数更新正则化参数;构建Hessian近似矩阵和梯度表达式,通过迭代得到最佳频率变化率(RoCoF);结合功率量测的差值法,通过摇摆方程得到系统惯量评估值。所提方法通过引入全变差正则化算法获取系统RoCoF,提高了RoCoF的计算精度,加快了计算速度,可以有效提高电网惯量评估的准确度。将IEEE 3机9节点系统和10机39节点系统算例的数值模拟结果与带外生输入的自回归滑动平均模型的结果进行对比,验证了所提方法的有效性和优越性。

关键词:高比例新能源电力系统;全变差正则化;惯量评估;log-cosh;频率变化率

中图分类号:TM73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202507006

0 引言

《“十四五”现代能源体系规划》中提出:实施可再生能源替代行动,推动构建新型电力系统,推动电力系统向适应大规模高比例新能源方向演进。然而,高比例新能源电力系统的惯量支撑能力不足易引发系统频率失稳问题^[1-2],如2016年9月28日澳大利亚停电事件当天的新能源发电占比高达48.36%,2019年8月9日英格兰及韦尔斯大片地区大停电事件当天的新能源发电占比高达47.6%^[3-4],发生大停电事件的原因均与新能源占比过高而导致系统惯量支撑能力不足有关。因此,评估高比例新能源电力系统的惯量水平对于保障新型电力系统的频率稳定具有重大意义。

惯性体现为一个系统的抗扰动能力,电力系统惯量是维持系统频率稳定的关键,表现为电网受到扰动后系统频率发生的抵抗作用^[5-6]。关于系统惯量水平评估的研究最早开始于20世纪90年代,主要对传统转动惯量进行粗略估计。但随着新能源的发展,大量变流器接口器件替代传统同步机组,系统的传统转动惯量水平随之降低,并出现非传统转动惯量。因此,文献[7]提出了“广义惯量”的概念,从转动力学发展到能量学角度诠释惯量,拓宽了惯量的定义范畴,使得新能源机组等非传统发电设备的

惯量也能纳入系统惯量的范畴^[8]。这一拓展为惯量评估方法提供了新的方向,目前惯量评估方法主要分为两大类^[9]。一类方法是侧重构建模型的惯量评估方法,如:文献[10-11]基于赤池信息准则(Akaike information criterion, AIC)确定带外生输入的自回归滑动平均模型(autoregressive moving average model with exogenous inputs, ARMAX)的阶次,建立了系统功率-频率动态模型,从而准确辨识系统惯量水平;文献[12]基于输出误差模型中拟合度最高和未知参数少的输出误差模型与区域等值频率响应模型对电网惯量进行连续估计。但该类方法^[10-12]均需要在评估准确度和参数依赖度之间做取舍,且一般耗时较长。另一类方法是从系统的实际工况出发,从数据驱动的角度对惯量进行评估^[13-14],如:文献[15]将切片采样引入马尔可夫蒙特卡罗模拟中,对系统惯量进行概率评估,且考虑了新能源不确定性对电网惯量的影响;文献[16]分析了系统等效惯量与频率功率谱密度之间的关系,实现了在线监测系统惯量水平。

在实际应用中,当系统惯量发生变化时,最直接的表现是电力系统的频率变化率(rate of change of frequency, RoCoF)发生变化。RoCoF反映了系统惯量对频率波动的影响^[17],尤其在大规模可再生能源接入后的电力系统中,惯量变化对频率波动的影响尤为显著^[18]。国内外学者也从RoCoF角度对惯量评估方法进行了大量的研究。文献[19]采用基于滑动窗口的分段多项式拟合惯量评估方法,避免了拟合次数对RoCoF曲线的影响以及一次调频介入时间对惯量评估精度的影响。文献[20]采用差值法估计系统RoCoF来评估系统惯量,并利用区间平均值避免了因数据选择产生的偶然误差,该方法在计算过

收稿日期:2024-11-14;修回日期:2025-04-15

在线出版日期:2025-07-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52367002);云南省科技厅联合基金重点资助项目(202201BE070001-15)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52367002) and the Key Project of Science and Technology Department of Yunnan Province Joint Fund (202201BE070001-15)

程中无需功率缺额数据,解决了实际功率缺额难以获取的问题。但上述方法中 RoCoF 的计算精度仍有待提高。从数学角度而言,根据系统频率数据获得 RoCoF 是经典的不适定反问题^[21]。为了解决这类问题,正则化方法(如 Tikhonov 正则化^[22]、全变差正则化^[23]等)通常被认为是较为准确的手段。Tikhonov 正则化对解的要求过于光滑,从而降低了 RoCoF 的计算精确度;而全变差正则化更适用于离散数据,如电力系统频率数据。然而,传统的全变差正则化方法存在非线性和不可微性的挑战^[24],因此需要优化正则化项。文献[25]提出了一种基于粗略差分函数的正则化方法,但其计算精度较低;文献[26]提出了一种基于 huber 函数优化的正则化方法,但其分段线性结构可能导致优化过程陷入局部最优解。

为了解决上述问题,本文从数据驱动的角度出发,根据原始频率数据获得 RoCoF,由此作为惯量评估的基础。为了提高计算效率和准确性,提出了一种基于 log-cosh 函数的全变差正则化方法用于系统惯量评估,并引入 L 曲线准则来选取最优正则化参数,从而实现高比例新能源电力系统有效惯量的准确评估。所提方法通过引入全变差正则化算法获取 RoCoF,相较于 ARMAX,可以有效提高惯量评估的准确度,并减少运算时间。

1 电网惯量评估原理

惯性时间常数是指在发电机的转轴上加入额定转矩后,转子从静止状态加速到额定转速所需要的时间。节点惯量即为该节点处发电机的惯性时间常数。

根据同步机的转子运动方程,可得传统发电机组的惯量水平满足式(1)。

$$\begin{cases} d\delta/dt = \omega - \omega_0 \\ Jd\omega/dt = T_T - T_E \end{cases} \quad (1)$$

式中: δ 为功角; ω 为系统的角频率; ω_0 为系统的额定角频率; J 为转子的转动惯量; T_T 为原动机的机械转矩; T_E 为发电机的电磁转矩。

随着绿色能源的发展,近年来越来越多的新能源接入电网,并伴随大量的电力电子器件接入电网,相应的虚拟惯量问题随之而来,则考虑新能源的节点惯量水平可表示为:

$$2Hdf/dt = \Delta P - D\Delta f \quad (2)$$

式中: H 为节点惯量; f 为系统频率; Δf 为节点频率差; df/dt 为 RoCoF; ΔP 为节点功率差,为扰动前、后的功率差; D 为系统阻尼系数。在实际电网中, D 很小,对惯量辨识结果几乎没有影响,所以本文忽略 $D\Delta f$ 项。

电网区域大且节点众多,获取单一节点的惯量存在效率过低且辨识误差大的问题,所以需要相应的系统区域惯量评估方法。此时,考虑高比例新能

源接入的系统理论惯量水平 H_s 可表示为:

$$H_s = \frac{\sum_{i=1}^n H_{Gi} S_{Gi} + \sum_{j=1}^m H_{Xj} S_{Xj}}{\sum_{i=1}^n S_{Gi} + \sum_{j=1}^m S_{Xj}} \quad (3)$$

式中: H_{Gi} 、 S_{Gi} 分别为传统机组 i 的惯量水平、容量; H_{Xj} 、 S_{Xj} 分别为新能源机组 j 的虚拟惯量水平、容量; n 、 m 分别为传统机组、新能源机组数量。

2 全变差正则化在 RoCoF 分析中的应用

从 RoCoF 角度出发对惯量水平进行评估,在实际电网中易于获取的是电网实时功率和实时频率,从而可获得功率差、频率差,进而通过基于 log-cosh 函数的全变差正则化方法获得 RoCoF。

2.1 正则化方法

当数据存在噪声影响并非精确时,传统的可微函数(如三次样条函数、Runge-Kutta 函数等)的求解结果存在很大的误差,而正则化方法能在满足 Hadamard 条件下有效提高解的鲁棒性。

基本定义与定理^[27]如下。

定理 1: 若对所有的 $x \in H^1$, 一族有界线性算子 $R_\alpha: H^2 \rightarrow H^1$ 满足 $\lim_{\alpha \rightarrow 0} R_\alpha Kx = x$, 即算子族 $R_\alpha K$ 逐点收敛于恒等算子, 则称该算子族为一个正则化策略, 其中 $\alpha > 0$ 为正则化参数。

定理 2: 设 Y_α 为紧算子 $L: H^1 \rightarrow H^2$ 的一个正则化策略, 且 $\dim L = +\infty$, 则有以下 2 点。① 存在序列 $\{\gamma_i\}$, 当 $i \rightarrow +\infty$ 时, 有 $\|\gamma_i\| \rightarrow +\infty$; ② 序列 $\{Y_\alpha Lx\}$ 在 H^1 的有界子集上并非一致收敛, 即 $Y_\alpha L$ 不按算子范数收敛于恒等算子。

常见的算子方程为:

$$Kx = y \quad (4)$$

式中: x 为待求量; y 为已知量; K 为无限维 Hilbert 空间 H^1 与 H^2 之间的紧线性算子。

当 y 为准确数值时, 可以获得 x 的准确值, 即 $x = K^{-1}y$ 。然而, 当已知量 y 存在误差时, 有:

$$Kx^\delta = y^\delta \quad (5)$$

式中: y^δ 、 x^δ 分别为存在误差的已知量、待求量, 其中误差水平 $\delta > 0$ 。

则 x 的正则化解 x_α^δ 与真实值 x 之间的误差为:

$$\begin{aligned} \|x_\alpha^\delta - x\| &\leq \|R_\alpha(y^\delta - y)\| + \|R_\alpha y - x\| \leq \\ &\|R_\alpha\| \|y^\delta - y\| + \|R_\alpha Kx - x\| \leq \|R_\alpha\| \delta + \|R_\alpha Kx - x\| \end{aligned} \quad (6)$$

结合附录 A 图 A1 所示正则化参数的变化误差可知, 当 $\alpha \rightarrow 0$ 时, $\|R_\alpha\| \delta \rightarrow +\infty$, $\|R_\alpha Kx - x\| \rightarrow 0$ 。当选取合适的正则化参数 α , 使得 $\|R_\alpha\| \delta + \|R_\alpha Kx - x\|$ 取极小值, 且 $\delta \rightarrow 0$ 时, $\|R_\alpha\| \delta + \|R_\alpha Kx - x\| \rightarrow 0$ 。

为了得到 $\|R_\alpha\|\delta+\|R_\alpha Kx-x\|$ 的极小值,通常需构造泛函。根据构造的不同,泛函可分为Tikhonov正则化、最小二乘法正则化、有限差分正则化、全变差正则化函数等。但针对本文处理的频率数据中可能含有非光滑数据的现象,本文引入全变差正则化方法^[28]。

2.2 基于log-cosh函数的频率全变差正则化

考虑到实际电力系统中的频率数据是离散且非光滑的,本文基于全变差正则化理论来获取稳定的RoCoF。

由离散化第一类Fredholm积分方程可知,系统频率数据和RoCoF之间满足如下关系:

$$\sum_{i=1}^N tk_{i,j} \frac{df_i}{dt} = \sum_{i=1}^N K_{i,j} \frac{df_i}{dt} = f_j \quad (7)$$

式中: t 为采样时间; $K_{i,j}$ 为核函数, $K_{i,j}=tk_{i,j}$; f_i 、 f_j 分别为第*i*、*j*个频率采样值; N 为采样总次数。

但根据式(7)计算得到系统RoCoF是一个不适定问题,结合2.1节可知,要想由扰动激励的电力系统频率数据计算得到稳定的RoCoF解,则需要构造式(8)所示正则化函数。

$$\left[K^T K + \alpha L \left(\frac{df}{dt} \right) \right] \frac{df_\alpha}{dt} = K^T f \quad (8)$$

式中: $L(df/dt)=tD^T E(f)D$, D 为正则化算子, $E(f)$ 为 $(N-1) \times (N-1)$ 阶的对角矩阵; K 为线性算子; f 为频率向量; df_α/dt 为RoCoF的正则化解。

为了使RoCoF的正则化解无限接近RoCoF的真实值,构造式(9)所示泛函 $\varphi(f)$,当 $\varphi(f)$ 取最小值时,RoCoF的正则化解即为待求的RoCoF真实值。

$$\varphi(f) = \frac{1}{2} \left\| K \frac{df}{dt} - f \right\|_2^2 + \alpha T(f) \quad (9)$$

式中: $T(f)$ 为稳定泛函。

为了实现任意时刻的系统频率与RoCoF之间始终满足式(9)所示泛函,本文引入基于log-cosh的正则化函数 $T(f)$,如式(10)所示,其考虑了系统频率数据因离散采样造成的不光滑性。

$$T(f) = \left\| \frac{1}{\beta} \lg \left[\cosh \left(\beta \left[\left(\frac{df}{dt} \right)^2 + \beta^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right) \right] \right\|_1 \quad (10)$$

式中: β 、 β 分别为正则化项的参数和参数矩阵。

因实际频率数据一般是从同步相量测量单元(phasor measurement unit, PMU)获得,而PMU是通过全球定位系统(global positioning system, GPS)秒脉冲作为同步时钟构成的。故实际频率数据属于离散数据,而非连续数据,则式(10)中的微分需要基于离散化思想用差分近似替代微分。

3 基于全变差正则化的惯量评估方法

基于频率量测数据建立正则化函数是实现惯量评估的重要环节,但如何求取最优正则化解是提高惯量评估准确度的关键步骤。

3.1 最优正则化解

根据正则化泛函的性质,最优正则化解与正则化参数密切相关。因此,选择合适的正则化参数是获得最优正则化解的关键。根据正则化参数选取时间的不同,通常有先验、后验2类方法。先验方法在实际问题中较难实现,而后验方法通过在迭代过程中不断优化正则化参数,从而获得最优解。本文结合惯量计算过程,采用L曲线^[29]准则作为后验方法来选择最优的正则化参数。

L曲线准则是通过log-log尺度刻画正则化解 x_α 的范数 $\|x_\alpha\|$ 与残差范数 $\|Kx_\alpha - y\|$ (y 为已知量向量)之间的关系来选择正则化参数,因其曲线形状类似“L”故命名为L曲线准则。当正则化参数较小时,正则化解范数 $\|x_\alpha\|$ 对参数较敏感,微小波动可能导致较大的误差;而当正则化参数较大时,残差范数 $\|Kx_\alpha - y\|$ 对正则化参数较敏感。因此,L曲线的转折点对应的正则化参数即为选择的最优正则化参数值。

由L曲线准则可知,L曲线转折点对应的值即为曲率函数最大值,则该曲线的曲率函数 $C(\alpha)$ 为:

$$C(\alpha) = - \frac{r(\alpha)s(\alpha)[\alpha r(\alpha) + \alpha^2 s(\alpha)] + \frac{(r(\alpha)s(\alpha))^2}{ds(\alpha)/d\alpha}}{(r^2(\alpha) + \alpha^2 s^2(\alpha))^{3/2}} \quad (11)$$

式中: $s(\alpha) = \|x_\alpha\|^2$; $r(\alpha) = \|Kx_\alpha - y\|^2$ 。

对于式(11),当 $C(\alpha)$ 达到最大值时, α 即为最优正则化参数。

由于系统频率数据在采集过程中可能存在误差,为了准确得到系统RoCoF的稳定解,采用迭代方法逐步逼近真实值,迭代公式为:

$$x_{\kappa+1} = x_\kappa + d_\kappa = x_\kappa - h_\kappa / \tilde{H}(df_\kappa/dt) \quad (12)$$

$$\tilde{H}(df_\kappa/dt) = K^* K + \alpha L(df_\kappa/dt) \quad (13)$$

$$h_\kappa = K^* (K df_\kappa/dt - f^\delta) + \alpha L(df_\kappa/dt) df_\kappa/dt \quad (14)$$

式中: κ 为迭代次数; x_κ 、 $x_{\kappa+1}$ 分别为第 κ 、 $\kappa+1$ 次迭代后的解; f^δ 为存在误差的频率采样值; d_κ 为第 κ 次迭代解的修正量; $\tilde{H}(df_\kappa/dt)$ 为第 κ 次迭代的Hessian近似矩阵; h_κ 为第 κ 次迭代的梯度; K^* 为 K 的伴随矩阵。

当达到最大迭代次数 M 后,可得到系统RoCoF的最终解。

为了验证本文所提方法对RoCoF的整体拟合效果,以Bestfit指标进行评价,其计算表达式为:

$$\gamma_{\text{Bestfit}} = \left[1 - \frac{\sqrt{(\Delta_1 - \bar{\Delta})^2}}{\sqrt{(\Delta - \bar{\Delta})^2}} \right] \times 100\% \quad (15)$$

式中: γ_{Bestfit} 为Bestfit指标值; Δ_1 为本文方法拟合得到的变化率数据; Δ 为计算得到的准确变化率数据; $\bar{\Delta}$ 为 Δ 的平均值。

本文所提基于全变差正则化的惯量评估方法的复杂度主要集中在RoCoF的计算过程,计算复杂度为 $O(N_3 M(N_2+1))$,其中 N_2 为给定范围内的正则化参数数量, N_3 为样本数据量。而ARMAX先根据频率-功率数据确定模型的最佳阶次,然后在阶跃响应下进行惯量评估。其中模型阶次的确定是整个算法的重要部分,计算复杂度为 $O(N_a N_b N_c N_k N_1)$,其中 N_a 、 N_b 、 N_c 分别为系统极点数量、零点数量、系数 C 数量的选取量, N_k 为延迟值的选取量, N_1 为频率-功率数据量。故从理论上可知,本文所提方法的计算复杂度远低于ARMAX的计算复杂度。

3.2 惯量评估方法

基于全变差正则化得到频率量测数据的变化率是实现准确评估系统惯量水平的主要环节。PMU获得的频率量测数据 F 、功率量测数据 P 见式(16)。

$$\begin{cases} F=[f(t_1), f(t_2), \dots, f(t_N)] \\ P=[P(t_1), P(t_2), \dots, P(t_N)] \end{cases} \quad (16)$$

式中: $f(t_i)$ ($i=1, 2, \dots, N$) 为 t_i 时刻的含噪频率测量值; $P(t_i)$ 为 t_i 时刻的含噪功率测量值。

为了消除因数据采集带来的误差,对初始数据进行预处理,包括滤波、均值化预处理,其中均值化采用线性均值化,滤波采用Butterworth滤波器,滤波函数为:

$$|H(j\Omega)|^2 = 1/[1+(\Omega/\Omega_c)^{2\rho}] \quad (17)$$

式中: $H(\cdot)$ 为幅值; Ω 为进入滤波器的信号频率; Ω_c 为Butterworth滤波器的截止频率,本文中取值为0.5 Hz; ρ 为滤波器的阶数,本文中取 $\rho=2$ 。

为了有效评估惯量,还需要获取初始功率,进而获得功率变化量,本文引入差值法计算功率变化量,如式(18)所示。

$$2H_1 = \frac{P_1 - P_0}{df/dt|_{t_1}}, \quad 2H_2 = \frac{P_2 - P_0}{df/dt|_{t_2}} \quad (18)$$

式中: H_1 、 H_2 分别为 t_1 、 t_2 时刻的系统惯量; P_1 、 P_2 分别为 t_1 、 t_2 时刻的有功功率; $df/dt|_{t_1}$ 、 $df/dt|_{t_2}$ 分别为 t_1 、 t_2 时刻的RoCoF; P_0 为初始时刻的有功功率。

通过基于log-cosh的全变差正则化方法获得RoCoF,基于PMU的频率数据构造离散泛函函数以获得RoCoF。假设 t_1 时刻和 t_2 时刻之间间隔不大,则系统惯量水平几乎不变,即 $H_1 \approx H_2$ 。则惯量水平为:

$$2H_1 = \frac{P_1 - P_2}{df/dt|_{t_1} - df/dt|_{t_2}} \quad (19)$$

综上所述,当系统发生扰动后,首先通过PMU测量得到功率、频率量测值,然后采用本文所提基于

log-cosh的全变差正则化方法进行惯量评估,流程图如附录A图A2所示,具体步骤如下:

- 1) 获得功率量测数据 P 、频率量测数据 F 、采样频率 f_s 、最大迭代次数 M ;
- 2) 对初始数据进行滤波、均值化预处理;
- 3) 根据式(10)和式(11)更新正则化参数 α ;
- 4) 根据式(13)计算第 κ 次迭代的频率波动量的Hessian近似矩阵 $\tilde{H}(x_\kappa)$;
- 5) 根据式(14)计算第 κ 次迭代的频率波动量的梯度 h_κ ;
- 6) 根据步骤2)、3)求得第 κ 次迭代的修正量 d_κ ;
- 7) 根据修正量得到近似解 $x_{\kappa+1} = x_\kappa + d_\kappa$;
- 8) 重复步骤2)~7),直至达到最大迭代次数 M ;
- 9) 进行滤波处理后再结合式(18)计算系统惯量。

4 仿真验证

4.1 数值分析

为了验证本文所提基于log-cosh的全变差正则化方法对数据变化率的计算准确度,采用3组复杂程度不同的数据进行验证,3组数据的函数表达式如式(20)所示。

$$\begin{cases} f_1(t) = 0.3t^2 - 8.7t + 56 \\ f_2(t) = 0.6\cos(100\pi t + 0.3) \\ f_3(t) = 0.6\cos(100\pi t + 0.3) + 0.4\cos(40\pi t - 0.2) + 0.3\cos(160\pi t - 0.2) \end{cases} \quad (20)$$

式中: $f_1(t)$ 、 $f_2(t)$ 、 $f_3(t)$ 分别为信号1—3的函数表达式。

为了验证本文所提方法的鲁棒性,分别对3组数据添加15 dB的白噪声,并根据本文所提方法拟合其变化率,再与式(20)计算得到的实际变化率进行对比,结果如附录A图A3所示。由图可知,信号1—3的复杂度越来越高,其 γ_{Bestfit} 分别为94.1289%、90.9612%、81.8460%,可见对于简单信号,本文所提方法计算其变化率的准确度非常高,随着信号复杂度增大,本文所提方法计算变化率的准确度仍保持在较高的水平。还可看出,本文所提方法存在端点效应,但时间较短,且电网惯量评估一般选择在扰动发生0.5 s后进行^[9],此时完全可以避免因端点效应产生的误差,故本文所提方法从理论上可用于电网区域惯量评估。

为了进一步展示L曲线准则在正则化中的作用,本文结合信号3的变化率计算过程中正则化参数的优化过程,并根据文献[24],正则化参数不宜设置过大,故此处设置正则化参数的变化范围为 $[10^{-3}, 2 \times 10^{-2}]$ 。根据式(11)计算信号的曲率函数,绘制L曲线,如图1所示。

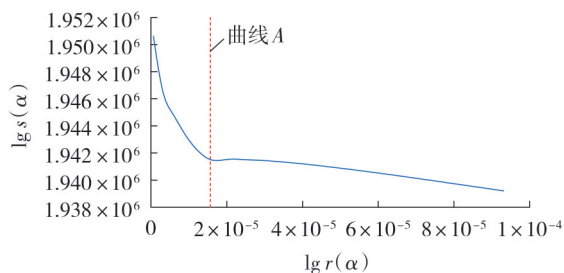


图1 信号3的L曲线

Fig.1 L curve of Signal 3

由图1可知,位于曲线A左边的L曲线的斜率较大,曲线几乎与横轴垂直,此时 $s(\alpha)$ 变化较大, $r(\alpha)$ 变化较小,表示传播的数据误差 $\|x_\alpha\|$ 占误差的主要部分;位于曲线A右边的L曲线的斜率较小,表示正则化误差 $\|Kx_\alpha - y\|$ 占误差的主要部分,则曲线的拐点处为整体误差最小点。

为了计算拐点处对应的最优正则化参数,根据式(11)计算L曲线的曲率函数,根据曲率函数的最大值,可知最优正则化参数 $\alpha = 5 \times 10^{-3}$ 。

4.2 算例分析

4.2.1 小系统仿真结果分析

基于PSASP软件,以改进3机9节点系统为算例对本文所提方法进行验证,该系统的额定频率为50 Hz,基准容量为100 MV·A,其中发电机 G_2 为双馈直驱风机,风机发电量占比为19.42%。改进3机9节点系统拓扑结构如附录A图A4所示,其相应的参数设置如附录A表A1和表A2所示。

为了模拟系统发生扰动,发电机 G_3 在运行时间为1 s时切机10%,即减少7.116 MW功率,然后以0.01 s为步长采集各发电机的频率和功率波动数据。

当系统在发生扰动后,由于各发电机的惯量水平、与扰动点之间距离的影响,各发电机的频率偏差在最大频率偏差、波形、相角等方面都呈现出不同程度的差异。基于采样得到的数据,首先对其进行均值化和滤波处理。设置最大迭代次数 $M=30$;根据文献[24]将参数 β 设置为 10^{-4} ,正则化参数 α 的取值范围为 $[10^{-3}, 2 \times 10^{-2}]$ 。根据式(11)构造L曲线的曲率函数,如图2所示,从而确定最优正则化参数取值。由图2可知,最优正则化参数 $\alpha = 10^{-3}$ 。

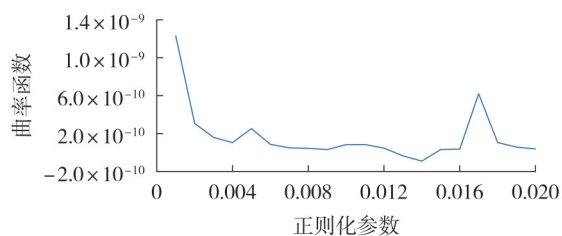


图2 L曲线的曲率函数

Fig.2 Curvature function of L curve

为了证明本文所提惯量评估方法的优越性,将其与ARMAX方法进行比较,结果见表1。由表可知,本文所提方法的惯量评估误差在3%以内,而ARMAX方法的惯量评估误差最高达到6.66%,整体的评估误差水平明显高于本文所提方法的误差水平。

表1 小系统的惯量估计结果

Table 1 Inertia estimation results of small system

节点	惯量 实际值/s	ARMAX方法		本文方法	
		惯量 估计值/s	误差/%	惯量 估计值/s	误差/%
G_1 所处节点	8.0	8.6632	6.66	7.9784	2.79
G_2 所处节点	2.5	2.5329	1.32	2.5301	1.20
G_3 所处节点	9.5	9.1701	2.37	9.6051	1.73

在Intel CORE i5-8250U CPU@1.6GHz和Intel UHD Graphics620的背景下,当采样点总数 $N=100$ 时,本文所提方法的运行时间为20.2548 s,但是ARMAX方法的运行时间为268.5963 s,可见ARMAX方法的运行时间明显长于本文所提方法的运行时间,方法的运行时间与2种算法的复杂度相符。本文所提方法避免了多次循环迭代,从理论上缩短了运行时间。故本文所提基于正则化的惯量评估方法具有可行性,且与ARMAX方法相比,其不仅在评估准确度上具有明显的优势,还具备更快的运行速度。

4.2.2 大系统仿真结果分析

4.2.1节以3机9节点系统为算例验证了本文所提方法的可行性,但实际电网的频率波动特性更加复杂,故本节以改进IEEE 10机39节点大系统为算例再次验证本文所提方法的有效性。该系统的额定频率为50 Hz,基准容量为100 MV·A。其中机组 G_5 、 G_8 为双馈风机,系统的风电渗透率为16.77%,其他参数设置见附录A表A3和表A4。

根据文献[24]将参数 β 设置为 10^{-4} ,正则化参数 α 的取值范围为 $[10^{-3}, 2 \times 10^{-2}]$,最优正则化参数取值为 4×10^{-3} 。为了模拟系统发生大扰动后的频率响应,于5 s时切除机组 G_3 、 G_{10} 的15%功率和机组 G_8 的10%功率,功率切除量分别为97.5、54.0、112.5 MW,总功率切除量为264 MW。

在4~13 s期间,各机组机端的频率波动曲线如附录A图A5所示。

1) 单机惯量评估结果。

由图A5可知: G_3 、 G_{10} 的频率波动与其他火电机组的频率波动相比偏大,频率最低值分别为49.9749、49.9691 Hz;相较于风电机组 G_5 、 G_8 的频率波动也偏大,且在切机瞬间产生最低频率49.8938 Hz,系统频率在10 s左右稳定于49.9775 Hz。各机组的频率波动数据再次说明频率波动不仅与扰动量有关,还与扰动点距离和机组惯量有关。

设置采样时间间隔为0.01 s,采用全变差正则化算法拟合各机组的RoCoF,结果如表2所示。然后根据此计算各节点的惯量,结果如表3所示。

表2 各机组的RoCoF

Table 2 RoCoF of each unit

单位:Hz/s

机组	RoCoF	机组	RoCoF	机组	RoCoF
G ₁	0.0153	G ₅	0.0186	G ₉	0.0267
G ₂	0.0242	G ₆	0.0201	G ₁₀	0.0107
G ₃	0.0341	G ₇	0.0166		
G ₄	0.0207	G ₈	0.0328		

表3 大扰动下各节点的惯量估计结果

Table 3 Inertia estimation results of each node under large disturbance

节点	惯量 实际值/s	ARMAX方法		本文方法	
		惯量 估计值/s	误差/%	惯量 估计值/s	误差/%
G ₁ 所处节点	7.5	8.0203	6.94	7.4354	0.86
G ₂ 所处节点	4.0	4.4391	10.98	3.9502	1.25
G ₃ 所处节点	4.0	4.2982	7.46	3.8468	3.83
G ₄ 所处节点	9.0	9.0102	0.11	9.2589	2.88
G ₅ 所处节点	3.0	2.8793	4.02	3.1187	3.96
G ₆ 所处节点	6.0	5.8965	1.73	6.0848	1.41
G ₇ 所处节点	5.5	5.8732	6.79	5.5255	0.46
G ₈ 所处节点	2.0	2.1603	8.02	1.9060	4.70
G ₉ 所处节点	4.5	4.2874	4.72	4.7203	4.90
G ₁₀ 所处节点	7.0	7.3581	5.12	6.9775	0.32

由表3可知:当采用本文所提方法时,全网机组所处节点的惯量评估误差均被限制在4.90%以内,总体上评估结果较精确,机组所处节点惯量的最小评估误差仅为0.32%,最大评估误差为4.90%,平均评估误差为2.457%,总体评估误差基本稳定在3%左右;但ARMAX方法的惯量评估水平不稳定,其中最大评估误差达到10.98%,最小评估误差为0.11%,平均评估误差为5.589%。由IEEE 10机39节点系统的仿真结果可知,本文所提基于正则化的惯量评估方法同样适用于较大规模系统,且评估准确度仍较高,与ARMAX方法相比具有明显的优势。

2) 区域惯量评估结果。

鉴于扰动信号的随机性强,且负荷随机扰动距离各机组的电气距离存在差异,从而产生了机组间不同的惯量评估误差。现实电网中的节点众多,进行单机惯量评估的工作量大、数据量多,且不现实。故对于大电网而言,区域惯量评估更具有实用性,目前主要是根据电气距离、节点间的频率响应特性等参数进行电网惯量分区。本文采用文献[10]中的惯量区域划分方法,分区结果如附录A图A6所示。

大扰动下各区域的惯量评估结果如表4所示。由表可知,系统总体惯量的最大评估误差下降为3.53%,其中区域4的评估误差低至2.30%,明显低于其区域内单机组G₄、G₅、G₉的惯量评估误差。由

表3可知,各区域内机组的平均惯量评估误差分别为0.86%、2.51%、2.54%、2.722%,与表4中结果相比可知,通过区域评估可以明显降低系统整体惯量的评估误差,且整体运行时间缩短,所需数据量减少,可见采用区域惯量评估不仅降低了辨识成本,还能提高评估准确度。

表4 大扰动下各区域的惯量估计结果

Table 4 Inertia estimation results of each region under large disturbance

区域	惯量实际值/s	惯量估计值/s	误差/%
1	7.50	7.4354	0.86
2	4.78	4.8301	1.05
3	4.00	4.0711	1.78
4	5.22	5.3402	2.30

5 结论

本文提出了一种结合log-cosh全变差正则化的系统RoCoF拟合方法,用于评估系统的有效惯量。通过在多种场景下进行仿真,验证了所提方法的有效性和优越性,所得结论如下。

1) 本文引入正则化方法,从数据驱动的角度评估系统的惯量水平。通过构造泛函函数,解决了计算RoCoF时的不适定问题,从而获得频率波动数据的RoCoF,进而得到系统的惯量水平,并通过仿真分析验证了所提方法的有效性。

2) 本文所提基于log-cosh正则化的惯量评估方法适用于多种工况,能够从扰动数据中提取到惯量信息,并在评估准确度和运算效率方面优于ARMAX方法,验证了本文所提方法的优越性。

3) 通过对比ARMAX方法和本文所提方法的单机惯量、区域惯量评估结果,证实了相较于单机惯量评估,区域惯量评估能有效降低系统惯量评估误差。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 胡同宇,杨德健,钱敏慧,等. 基于惯量同步的构网型永磁直驱风电机组频率支撑及转速恢复策略[J]. 智慧电力,2024,52(7):72-79.
HU Tongyu, YANG Dejian, QIAN Minhui, et al. Frequency support and speed recovery strategy of grid-forming PMSGs based on inertia synchronization[J]. Smart Power, 2024, 52(7): 72-79.
- [2] 郭思远,景志滨,李洪波,等. 基于单虚拟惯量系数的双馈风机构网控制策略[J]. 智慧电力,2025,53(5):24-30.
GUO Siyuan, JING Zhibin, LI Hongbo, et al. Grid-forming control strategy for doubly-fed wind turbines based on a single virtual inertia coefficient[J]. Smart Power, 2025, 53(5): 24-30.
- [3] 江叶峰,夏宇翔,施琳,等. 基于频率空间特性和灵敏度分析的惯量配置方法[J]. 电力自动化设备,2025,45(5):209-217.
JIANG Yefeng, XIA Yuxiang, SHI Lin, et al. Inertia allocation method based on spatial frequency characteristic and sensitivity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45

- (5):209-217.
- [4] 赵伟,武家辉,买力哈巴,等. 基于改进MLE参数辨识ARMAX模型的电力系统节点惯量评估[J]. 电力系统保护与控制,2025,53(16):39-49.
ZHAO Wei,WU Jiahui,MAI Lihaba,et al. Power system node inertia evaluation based on improved MLE parameter identification ARMAX model[J]. Power System Protection and Control,2025,53(16):39-49.
 - [5] 米阳,王沛林,周杰,等. 基于电力系统分区惯量估计的储能容量配置策略[J]. 电力自动化设备,2024,44(7):13-20.
MI Yang,WANG Peilin,ZHOU Jie,et al. Energy storage capacity configuration strategy based on partitioned inertia estimation of power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2024,44(7):13-20.
 - [6] 刘勃,陈中,王毅,等. 基于斜坡渐变扰动的新型电力系统等效惯量评估[J]. 电力自动化设备,2024,44(3):49-56.
LIU Bo,CHEN Zhong,WANG Yi,et al. Ramp gradient disturbance based equivalent inertia estimation of new type power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2024,44(3):49-56.
 - [7] 鲁宗相,姜继恒,乔颖,等. 新型电力系统广义惯量分析与优化研究综述[J]. 中国电机工程学报,2023,43(5):1754-1776.
LU Zongxiang,JIANG Jiheng,QIAO Ying,et al. A review on generalized inertia analysis and optimization of new power systems[J]. Proceedings of the CSEE,2023,43(5):1754-1776.
 - [8] 李雪萍,王自力,陈燕东,等. 基于虚拟惯量模糊自适应的新能源逆变器频率主动支撑策略[J]. 电力系统保护与控制,2024,52(20):25-37.
LI Xueping,WANG Zili,CHEN Yandong,et al. Active frequency support strategy for new energy inverters based on virtual inertia fuzzy adaptive control[J]. Power System Protection and Control,2024,52(20):25-37.
 - [9] 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.
JIA Jiaoxin,YANG Tianqi,YAN Xiangwu,et al. Research progress on equivalent inertia estimation of grid-connected power electronic devices[J]. Electric Power Automation Equipment,2023,43(9):3-10.
 - [10] 徐波,章林炜,俞向栋,等. 基于系统辨识的电力系统惯量在线评估改进方法[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(18):62-69.
XU Bo,ZHANG Linwei,YU Xiangdong,et al. An improved method of power system inertia online estimation based on system identification[J]. Power System Protection and Control,2021,49(18):62-69.
 - [11] 张波,张成健,张经,等. 基于系统辨识的新能源电力系统惯性常数快速追踪方法[J]. 电力自动化设备,2025,45(3):163-170.
ZHANG Bo,ZHANG Chengjian,ZHANG Jing,et al. Fast tracking method of inertia constant of new energy power system based on system identification[J]. Electric Power Automation Equipment,2025,45(3):163-170.
 - [12] 李世春,夏智雄,程绪长,等. 基于类噪声扰动的电网惯量常态化连续估计方法[J]. 中国电机工程学报,2020,40(14):4430-4439,4723.
LI Shichun,XIA Zhixiong,CHENG Xuchang,et al. Continuous estimation method of power system inertia based on ambient disturbance[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(14):4430-4439,4723.
 - [13] 李玉京,胡鹏飞,曹宇,等. 计及频率响应延时的构网型变流器惯量参数数据驱动估计方法[J]. 电力系统自动化,2024,48(19):80-88.
LI Yujing,HU Pengfei,CAO Yu,et al. Data-driven estimation method for inertia parameters of grid-forming converter considering frequency response delay[J]. Automation of Electric Power Systems,2024,48(19):80-88.
 - [14] 丁禹升,郑竞宏,袁立强,等. 基于频率响应模型的电力系统离线惯量辨识方法[J]. 电力系统自动化,2025,49(24):125-137.
DING Yusheng,ZHENG Jinghong,YUAN Liqiang,et al. Offline inertia identification method for power systems based on frequency response model[J]. Automation of Electric Power Systems,2025,49(24):125-137.
 - [15] 王强强,姚良忠,徐箭,等. 基于切片采样-马尔科夫链蒙特卡罗模拟的高比例新能源电力系统等效惯量概率评估[J]. 电网技术,2024,48(1):140-152.
WANG Qiangqiang,YAO Liangzhong,XU Jian,et al. S-MCMC based equivalent inertia probability evaluation for power systems with high proportional renewable energy[J]. Power System Technology,2024,48(1):140-152.
 - [16] 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.
 - [17] 刘可真,谭化平,杨春昊,等. 考虑系统分区与节点频率动态响应的电力系统区域惯量估计方法[J]. 电力自动化设备,2025,45(5):200-208.
LIU Kezhen,TAN Huaping,YANG Chunhao,et al. Power system regional inertia estimation method considering system partitioning and dynamic response of node frequency[J]. Electric Power Automation Equipment,2025,45(5):200-208.
 - [18] 闫克非,李国庆,张儒峰,等. 风电场和多端柔性直流输电协同参与的受端电网分阶段调频控制策略[J]. 电力自动化设备,2025,45(4):28-36.
YAN Kefei,LI Guoqing,ZHANG Rufeng,et al. Phased frequency regulation control strategy for receiving-end power grid with coordinated participation of wind farms and multi-terminal high voltage direct current[J]. Electric Power Automation Equipment,2025,45(4):28-36.
 - [19] 孟建辉,叶泰然,任必兴,等. 考虑频率不同响应阶段的惯量评估优化策略[J]. 电力自动化设备,2024,44(11):171-177.
MENG Jianhui,YE Tairan,REN Bixing,et al. Optimization strategy for inertia assessment considering different frequency response stages[J]. Electric Power Automation Equipment,2024,44(11):171-177.
 - [20] 刘方蕾,胥国毅,王凡,等. 基于差值计算法的系统分区惯量评估方法[J]. 电力系统自动化,2020,44(20):46-53.
LIU Fanglei,XU Guoyi,WANG Fan,et al. Assessment method of system partition inertia based on differential calculation method[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(20):46-53.
 - [21] BENCHETTOU O,BENTBIB A H,BOUHAMIDI A,et al. Constrained tensorial total variation problem based on an alternating conditional gradient algorithm[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics,2024,451:116018.
 - [22] 莫若,邓小宇,蔺红,等. 基于汇集点处PMU测量的聚合电源等效惯性常数估测方法研究[J]. 智慧电力,2023,51(9):81-87,112.
MO Ru,DENG Xiaoyu,LIN Hong,et al. Equivalent inertia constant estimation method of aggregated power sources based on PMU measurement at interconnection point[J]. Smart Power,2023,51(9):81-87,112.
 - [23] CHIRINOS-RODRÍGUEZ J,DE VITO E,MOLINARI C,et al. On learning the optimal regularization parameter in inverse problems[J]. Inverse Problems,2024,40(12):125004.
 - [24] YAO J C,JIANG J Z,ZHOU F. Graph total variation and low-

- rank regularization for heterogeneous change detection[J]. Digital Signal Processing, 2025, 156: 104825.
- [25] KAUR G, CHAWLA M, ANTAL R, et al. Rough Δm -statistical convergence of order α of generalized difference sequences on probabilistic normed spaces[J]. Journal of Nonlinear and Convex Analysis, 2023, 24(9): 1955-1965.
- [26] HONG B W, KOO J, BURGER M, et al. Adaptive regularization of some inverse problems in image analysis[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2020, 29: 2507-2521.
- [27] KUMAR N, SONKAR M, BHATNAGAR G. Efficient image restoration via non-convex total variation regularization and ADMM optimization[J]. Applied Mathematical Modelling, 2024, 132: 428-453.
- [28] SULIMAN M A, BALLAL T, AL-NAFFOURI T Y. Perturbation-based regularization for signal estimation in linear discrete ill-posed problems[J]. Signal Processing, 2018, 152: 35-46.
- [29] JIA T T, SHI Y Y, ZHU Y G, et al. An image restoration model combining mixed L1[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2016, 38: 461-473.

作者简介:

杨灵睿(1999—),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统频率稳定(E-mail:ybrendax@163.com);

郭成(1978—),男,教授,博士,通信作者,主要研究方向为电能质量分析与控制、电力系统性稳定分析(E-mail:gc325@126.com)。

(编辑 陆丹)

Inertia estimation method of power system based on total variation regularization

YANG Lingrui¹, GUO Cheng¹, GUO Zhen², DAI Rui¹, DAI Jing³

(1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology,

Kunming 650500, China; 3. Talent Development Center of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650500, China)

Abstract: Aiming at the problems of calculation accuracy and computation time in the estimation process of inertia constant, an inertia estimation method of power system based on the total variation regularization of log-cosh function is proposed. The generalization function of frequency measurement data is obtained through total variation regularization, the curvature function of regularization parameter is obtained by combining the L-curve, and the regularization parameter is updated by using the log-cosh function. The Hessian approximate matrix and gradient expression are constructed, and then the optimal rate of change of frequency (RoCoF) is obtained through iteration. The estimation value of system inertia is obtained based on the swing equation by combining with the difference method of power measurement. The proposed method improves the calculation accuracy of system's RoCoF and speeds up the calculation by introducing the total variation regularization algorithm, which can effectively enhance the estimation accuracy of power grid inertia. The numerical simulation results of the IEEE 3-machine 9-bus system and 10-machine 39-bus system examples are compared with the results of autoregressive moving average model with exogenous inputs, verifying the effectiveness and superiority of the proposed method.

Key words: power system with high proportion of renewable energy; total variation regularization; inertia estimation; log-cosh; RoCoF