

基于谱聚类与动态特征融合的负荷侧等效惯量估计方法

马贵卿¹, 王海鑫¹, 夏明超¹, 李云路¹, 杨俊友¹, 陈哲²

(1. 沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870; 2. 奥尔堡大学 能源技术学院, 奥尔堡 DK-9220)

摘要:在新能源高占比电力系统中,随着电源侧惯量支撑能力的持续下降,负荷侧动态惯量响应的时空差异性对系统频率稳定的影响日益凸显。针对负荷侧惯量在空间分布上的响应差异,传统方法难以动态分区与量化表征的问题,提出一种基于谱聚类与动态特征融合的负荷等效惯量估计方法。首先,根据负荷设备的动态特性,建立负荷侧惯性资源的分类体系,将其归纳为3类特征化的惯性等效元件。在此基础上,提出一种动态谱聚类算法,依据负荷频谱能量分布的相似性实现惯量的自适应分区。进一步,构建融合时空特征的负荷侧惯性计算框架,引入节点惯量贡献度指标,结合负荷类型动态权重调整与分区惯量聚合策略,形成分层惯量计算架构。仿真结果表明,在IEEE 29节点系统中,所提方法的惯量估计均方根误差较传统方法降低52.17%,多工况下最大相对误差不超过5.3%,验证其有效性与适应性。

关键词:惯量估计;负荷侧惯量;频率动态;时空异质性;负荷分区

DOI:10.15938/j.emc.2025.12.006

中图分类号:TM73;TM61

文献标志码:A

文章编号:1007-449X(2025)12-0063-12

Spectral clustering and dynamic feature fusion based method for load side equivalent inertia estimation

MA Guiqing¹, WANG Haixin¹, XIA Mingchao¹, LI Yunlu¹, YANG Junyou¹, CHEN Zhe²

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. Department of Energy Technology, Aalborg University, Aalborg DK-9220, Denmark)

Abstract:In power systems with a high penetration of renewable energy, the inertia support capability from the generation side continues to decline. This inertia reduction significantly impacts system frequency stability. The load side dynamic inertia response exhibits substantial spatiotemporal variations that conventional approaches fail to adequately capture. Traditional methods lack both dynamic partitioning capability and effective quantification of these spatial differences in inertia response. To address these limitations, a novel load side equivalent inertia estimation method based on spectral clustering and dynamic feature fusion was proposed. First, a systematic classification framework for load side inertia resources was established according to their dynamic characteristics. This framework categorizes loads into three

收稿日期: 2025-07-04

基金项目: 智能电网重大专项(2025ZD0806200); 国家自然科学基金重点项目(52337003); 高等学校学科创新引智计划(D23005); 辽宁省科技计划联合计划项目(2023JH2/101700275)

作者简介: 马贵卿(1997—), 男, 博士研究生, 研究方向为新型电力系统惯量估计、电力系统稳定性分析与控制;

王海鑫(1989—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新型电力系统建模与分析、负荷侧响应;

夏明超(1976—), 男, 博士, 教授, 研究方向为交通动力控制与安全、电力系统运行与控制;

李云路(1996—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新型电力系统惯量估计;

杨俊友(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为新型电力系统惯量估计、特种电机建模与设计;

陈哲(1955—), 男, 博士, 教授, 研究方向为新型现代电力系统。

通信作者: 王海鑫

distinct types of inertial equivalent components, each representing a specific dynamic behavior pattern in frequency response. Subsequently, a dynamic spectral clustering algorithm was developed to achieve adaptive inertia partitioning based on the similarity of load spectral energy distribution. Furthermore, a computational framework for loadside inertia that integrates spatial and temporal features was constructed. By introducing a node inertia contribution index and combining it with dynamic weight adjustment for load types and a zonal inertia aggregation strategy, a hierarchical inertia calculation framework was formed. Simulation results on the IEEE 29-node system show that the proposed method reduces the root mean square error of inertia estimation by 52.17% compared to traditional methods, with a maximum relative error not exceeding 5.3% under multiple operating conditions, verifying its effectiveness and adaptability.

Keywords: inertia estimation; load side inertia; frequency dynamics; spatial-temporal heterogeneity; load partition

0 引言

随着“双碳”战略的深化推进,电力系统加速向以新能源为主体的新型架构转型^[1-2]。可再生能源通过电力电子设备大规模并网,导致传统同步发电机组的容量占比显著降低^[3-4]。风电、光伏等新能源机组因具有“零惯量”特性,与系统频率呈现解耦状态而无法提供惯量支撑^[5-6],致使系统等效惯量水平下降及一次调频能力弱化,对电网频率安全形成严峻挑战。

当前惯量支撑研究主要集中于发电机组、新能源及储能系统等电源侧技术。随着电源侧惯量贡献持续衰减,负荷侧惯量对电网稳定性的支撑作用日益凸显,传统以电源侧为主导的惯量支撑体系亟待系统性重构^[7-8]。研究表明,目前电力系统负荷侧平均惯性常数已超过系统总惯量的 20%^[9],因此负荷侧惯量精确量化已成为电力系统动态安全分析的关键研究方向。在紧急控制策略中优先保障高惯量负荷的持续运行并规避其非计划脱网,能够显著增强电力系统的运行可靠性。

近年来,已有若干研究针对负荷侧惯量估算进行了探讨。文献[10]提出的白盒方法通过解耦电源侧惯量贡献提取负荷侧惯量;文献[9,11]基于电网频率中断事件历史数据构建了需求侧惯量化评估模型;文献[12]开发的在线监测算法可追踪负荷时变惯性特征,但此方法将负荷侧视为一个整体,缺乏对负荷侧区域惯性的探讨;针对弗伦斯堡市停电事件的研究^[13-14]解析了用户类别与惯性贡献的关联特性,但未考虑负荷侧的地理分布特性;文献[15]通过高压直流输电扰动实验验证了电站辅助负荷的惯性调节作用,但未能独立量化负荷侧贡

献。现有方法虽已关注负荷侧惯性特性,但尚未有效应对负荷类型多样性与空间异质性等技术挑战。

需特别指出,同类型负荷元件的惯量呈现显著差异,负荷侧惯量不仅取决于用户规模,更与设备类型特性密切相关。在动态运行的电力系统中,负荷规模与设备类型持续变化,理论上精确估计需实时状态分析,但由此产生的计算复杂度阻碍了工程应用。当前主流方案采用特征相似性聚类方法。文献[16-17]通过扰动后负荷功率电压依赖特性分析,结合发电母线功率-电压数据提出惯性分区计算模型;文献[18]开发的数据驱动等效惯性划分模型提升了系统惯性辨识精度。然而现有研究虽已关注惯性区域分布特征,其表征方法仍面临双重局限性。基于负荷类型的精细化建模需精确获取元件参数,却受限于海量参数采集困境及时间漂移效应;采用用电特性的聚类策略虽提升效率,但需处理多维用电数据且难以表征扰动下地理分布差异引起的频率响应差异,致使惯性估计精度受限问题仍未得到根本解决。

针对上述问题,本文提出一种基于谱分析与动态特征聚类的负荷等效惯量估计方法,首先考虑负荷侧惯量特性将其映射为 3 类特征化惯性元件。然后,基于谱分析追溯负荷惯性状态,揭示系统惯量、功率扰动与频率响应的关联机制,将惯性动态特征类似机组进行聚类。最后利用负荷侧惯性计算框架,建立考虑空间差异的分区惯量计算模型。依托 MATLAB/Simulink 平台搭建 IEEE 29 节点仿真模型,通过多工况对比验证所提方法较传统方法的精度优势。研究成果为电力系统惯量评估提供精细化分析方法,对新型电力系统动态特性分析与安全控制具有重要参考价值。

1 负荷侧惯量特性分析

与电源侧以同步机组为主同质惯量特性不同,负荷侧惯量资源呈现设备类型异构性、动态响应分散性特征,需建立差异化的惯量表征模型^[19-20]。作为衡量频率稳定性的关键指标,系统等效惯量本质上是多时空尺度惯性资源动态响应的聚类表征。负荷侧惯量解析的核心难点在于海量异构设备的惯量贡献存在强非线性耦合特性,若采用设备级精细化建模将引发维度灾难。为此,本文提出基于设备特性与负荷特点的惯性资源分类方法,将负荷侧惯量映射为异步电动机、同步电动机及静态负荷 3 类特征化惯性元件,如图 1 所示。

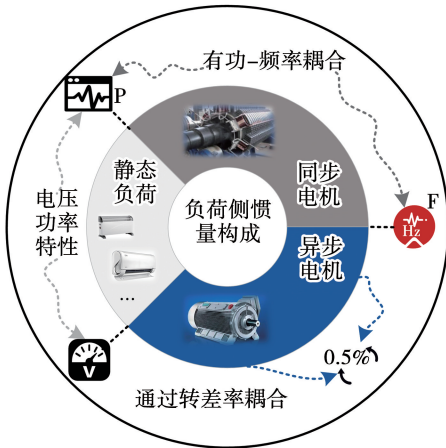


图 1 负荷侧惯量构成

Fig. 1 Components of load side inertia

1.1 同步电动机惯量模型

作为电网中分布最广的惯性元件,同步电动机通过有功功率-频率动态耦合机制实现其惯性响应特性^[21]。当系统发生功率波动时,转子转速与系统频率的刚性耦合触发电能能量转换,功率波动引发转子加速或减速运动,进而导致频率偏差。通过动能存储与释放过程产生与频率变化率成比例的动态功率响应,这种基于转子机械动能瞬时释放的机电耦合机制形成了惯性支撑原理。其有功-频率动态过程可由下式完整表征:

$$H_{sg} = \frac{P_m - P_e}{2 \frac{d\omega_r}{dt}} \quad (1)$$

式中: P_e 和 P_m 分别为同步电动机的电磁功率和机械功率; ω_r 为同步电动机的转动角速度。转子转动惯量存储的动能经机电耦合通道转化为电磁功率输

出,形成抑制频率变化的惯性效应,其惯量大小 H_{sg} 与功率输出和转速直接相关。

1.2 异步电动机惯量模型

与电力系统同频刚性连接的同步电动机不同,异步电动机凭借其转差运行机制,与电网形成“非同频”韧性连接关系^[22-23]。这种连接关系本质源于异步电机的内电势动力学特性,在机电暂态过程中,气隙中的旋转磁场与转子之间存在相对运动,基于电磁感应原理,于转子绕组中感应出具有转差频率的电动势矢量 E_i ,该电动势矢量随转子一同旋转。若定义相对于静止定子绕组的转子内电势矢量为 E_{im} ,则其旋转频率为转差频率与异步电机转子转速之和。

在机电暂态过程中,忽略电磁暂态并折算转子参数后,异步电机可表示为典型等值电路。由于励磁电抗远大于漏抗,电路可进一步简化,定子漏抗被等效移至转子侧。此时,转子内电势向量 e_{im} 在数值上等于电机定子出口电压 U ,其旋转角速度由转差频率与转子机械转速共同决定。因此,等效内电势 U 的旋转动态直接反映了异步电机的运行特性,通过分析其变化可揭示电机的频率响应与惯量特性。

其惯量特性可通过简化等值电路分析,如图 2 所示。图中: R_s 、 X_s 、 R_r 和 X_r 分别为定子绕组和转子绕组的等值电阻和漏抗; e_{im} 为转子内电势向量; U 为异步电机机端电压; s_a 为转差率。由于 U 与 e_{im} 在数值上相等且端电压变化较容易获取,因此后续用 U 来表示异步电机的内电势。

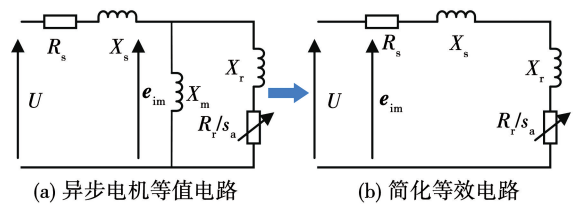


图 2 异步电机简化等效电路

Fig. 2 Simplified equivalent circuit of induction motor

由图 2 可得,异步电机的电磁功率 P_e 和机械功率 P_m 分别为:

$$P_e = \frac{U^2}{(R_s + \frac{R_r}{s_a})^2 + (X_s + X_r)^2} (\frac{R_r}{s_a} + R_s); \quad (2)$$

$$P_m = \omega_r k [\alpha + (1 - \alpha)(1 - s_a)^\sigma]. \quad (3)$$

式中: k 和 σ 分别为负载系数及机械负载特性指数;

α 为恒力矩参数。由于转差率的存在,异步电机电磁功率、机械功率与转速呈非线性耦合关系。基于小信号建模方法,在稳态工作点线性化推导参数间关系,可求得异步电动机对系统的有效惯量。由此可得线性化后的异步电机惯量 H_{agl} 表达式为

$$2H_{agl}s\Delta\omega_r = \Delta P_m - \Delta P_e. \quad (4)$$

基于式(4)可以得到异步电动机的小信号模型。由于 $\Delta\omega$ 可以直接被观测,因此基于梅森增益公式可以直接求解输入 $\Delta\omega$ 和输出 ΔP_e 之间的传递函数为

$$G(s) = \frac{\Delta P_e}{\Delta\omega} = \frac{K_1 s + K_2}{2H_{agl}s + K_3}. \quad (5)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= 2 \frac{\omega_{r0}}{\omega_0} f_e H_{agl}; \\ K_2 &= \frac{\omega_{r0}}{\omega_0} f_e f_m; \\ K_3 &= f_m + \left(-\frac{1}{\omega_0}\right)(f_m - f_s). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

由此可得异步电机的有效惯量如下形式:

$$H_{ag}(s) = \frac{\Delta P_e}{s\Delta\omega} = \frac{K_1 s + K_2}{(2H_{agl}s + K_3)s}. \quad (7)$$

在频率稳定性的传统分析框架中,研究焦点通常置于同步发电机的频率调节特性,而将异步电动机的影响简化为一个等效阻尼系数。然而,现有研究表明,异步电机实际上通过电磁暂态过程表现出不可忽视的频率支撑能力^[24-25]。根据式(7)揭示的异步电机惯量耦合关系,当系统出现不平衡功率时,转速扰动量 $\Delta\omega$ 呈现负值特征,触发异步电机转差率 s_a 的负向响应。该动态过程致使电磁功率扰动量 ΔP_e 同步呈现负值特性,有效降低发电机负载。值得注意的是,电磁功率与转子转速形成双向耦合机制, P_e 变化引发 ω_r 动态调整,而 ω_r 的调整又通过转差率反馈改变 P_e 幅值。在负荷扰动初期,异步电机凭借转差率瞬时响应快速提供频率支撑。随后转子动能持续释放形成渐近式支撑增强效应。由此可知异步电机和同步电机经过负荷扰动以后,对系统提供的功率均为时变函数,其数值不仅取决于式(5)~式(7)所表征的转子时间常数、定转子漏抗等参数,还受初始负载率、转差率工作点等工况条件显著影响^[24]。

1.3 静态负荷惯量模型

静态负荷的惯性效应源于其电压-功率动态特

性。无论是恒阻抗、恒电流和还是恒功率负荷,其端电压均随系统频率升降呈现正相关变化^[25]。由于静态负荷类型多样性需引入附加分量来表征其惯量特性,因此有

$$\Delta P_L = P_{L0} \left[k_z \left(\frac{U_L}{U_{L0}} \right)^2 + k_i \left(\frac{U_L}{U_{L0}} \right) + k_p \right] (1 + K_{pf} \Delta f). \quad (8)$$

式中: P_{L0} 为扰动前负荷有功功率; U_L 表示负荷节点电压; 恒阻抗负荷、恒电流负荷和恒功率负荷的占比系数分别为 k_z 、 k_i 和 k_p 。根据受扰动后的摇摆方程,其静态负荷惯量可表示为

$$H_{sl} = \frac{\Delta P_L(t)}{2 \frac{df}{dt}}. \quad (9)$$

在电力系统发生扰动引致有功功率缺额时,系统电压幅值维持相对稳定,因此 U_L 始终维持在 1 pu 附近,且功率频率调节系数 K_{pf} 量值显著偏低。这种双重约束条件导致静态负荷的有功功率消耗量维持相对稳定,其对应的虚拟惯量贡献值 H_{sl} 呈现二阶小量特性。因此在许多研究中认为静态负荷所提供的虚拟惯量有限,常常将其忽略^[14]。但是在短时惯量支撑过程中,静态负荷的惯量贡献因其独特的缓释特性具有不可忽略的工程价值。静态负荷通过电压-频率耦合机制参与的准稳态能量再分配过程,能够在扰动后 1~2 秒内持续释放惯量支撑,其持续时间显著长于动态负荷的瞬时响应。这一特性源于静态负荷的非线性电压依赖特性与频率调节的弱灵敏度 K_{pf} 的共同作用。电压跌落引发的功率缺额需通过多时间尺度的电压恢复过程逐步释放,而频率耦合的秒级相位滞后进一步延长了能量释放的持续时间。而且,尽管单点静态负荷的虚拟惯量贡献率较小,但其在配电网中的广域分布特性通过空间聚类效应可将整体惯量支撑能力提升至 12%~18%^[9]。

2 基于谱分析的负荷侧分区方法

2.1 负荷惯性变化下时频特性分析

由上文分析可知不同类型的负荷元件所呈现的惯量不同,电力系统负荷侧惯量具有动态时空差异性,其大小不仅取决于负荷接入规模,更与负荷元件类型构成密切相关。因此,亟需探索基于负荷动态本质特征的聚类方法,以突破现有方法在数据依赖

性和模型适应性方面的双重瓶颈。

在如图 3 所示的 IEEE 29 节点下,本研究深入探究了惯性水平与功频动态响应间的关联机制。通过采集区域联络线数据 $X(t)$,并进行全局归一化处理,首先观测了统一扰动下负荷惯性变化对母线频率的影响规律。为优化计算效率,沿 L5 联络线将系统划分为左右两个区域,重点分析左侧区域惯性变化下的时频特性。

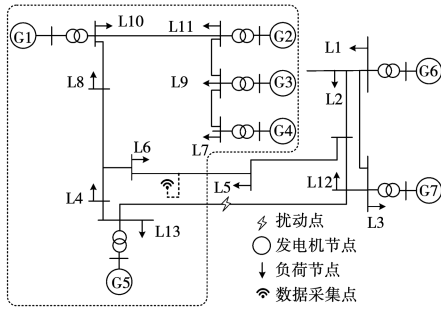


图 3 IEEE 29 节点系统拓扑图

Fig. 3 Topology of IEEE 29-bus system

惯量变化下的频率及功率谱分析如图 4 所示,由图 4(a)可知,系统暂态频率最低点随等效惯性常数变化呈现显著的单调递减趋势。这一现象不仅印证了经典摇摆方程中惯性项对系统动能缓冲的核心作用,更揭示了高比例电力电子接口设备渗透下,惯量空间分布异质性引发的频率动态响应非线性耦合机制。由于功频的耦合特性,在扰动下系统功率变化过程中仍应存在这种作用关系。为了阐明惯量与系统动态响应之间的相互作用关系,对功率谱进行了全面的分析。

基于图 4(a) 频率响应下的功率数据开展功率谱分析,即有

$$S[k] = \frac{1}{T} \left| \sum_{t=0}^{T-1} X(t) e^{-j\frac{2\pi kt}{T}} \right|^2, (k = 0, 1, \dots, T-1). \quad (10)$$

其中: T 为样本总数; k 对应离散频率索引。

基于图 4(b) 的结果显示,主要的能量波动集中于 $0.5 \sim 2$ Hz 频段,在此范围内随着惯性值增加,1 Hz 附近的峰值频率向更低频的方向偏移,且具有相近极值频率的机组表现出相似的频率响应特性。由此可知 $0.5 \sim 2$ Hz 内极值点越接近的曲线在扰动中的频率支撑能力越类似,那么其惯量支撑能力也越类似,基于此聚类方法可以无视地理分布精确找

到类似表现的负荷机组。

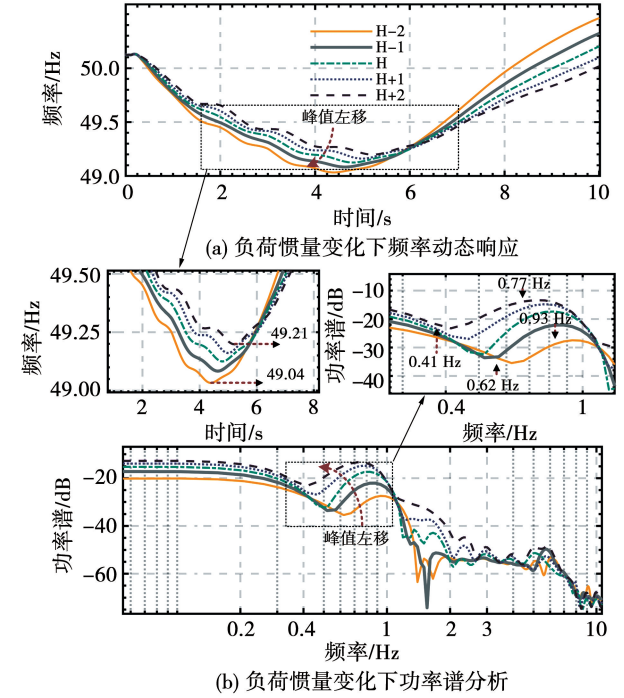


图 4 惯量变化下时域和频域分析

Fig. 4 Time and spectral-domain analysis of inertia variation

2.2 基于动态特征融合的负荷侧分区

上述惯量变化下的时域和频域动态分析为构建基于谱特性的新型聚类方法提供了理论依据,通过提取频谱峰值功率 P 、特征频率 ω_{peak} 及标准差 ξ 构建三维特征矩阵 N ,利用所提取的动态特征相似性实现机组惯性特性分类,即有

$$P = \max_{f \in [0.5, 2]} S[k]; \omega_{\text{peak}} = 2\pi \arg \max_{f \in [0.5, 2]} S[k]; \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} \mu &= \sqrt{\frac{\sum_{f \in [0.5, 2]} f S[k]}{\sum_{f \in [0.5, 2]} S[k]}}; \\ \xi &= \sqrt{\frac{\sum_{f \in [0.5, 2]} (f - \mu)^2 S[k]}{\sum_{f \in [0.5, 2]} S[k]}}. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

为验证方法有效性,选取系统左侧 8 条负荷曲线进行测试,如图 5 所示。尽管 L11 与 L13 机组存在显著地理分布差异,但其频谱特征呈现高度相似性($\omega_{\text{peak}} = 1.2$ Hz, $\xi = 0.08$),被准确聚类至同一惯性类别。这表明基于谱分析的聚类方法有效克服了传统方法受时空分布限制的缺陷,实现了惯性特征的精准辨识。

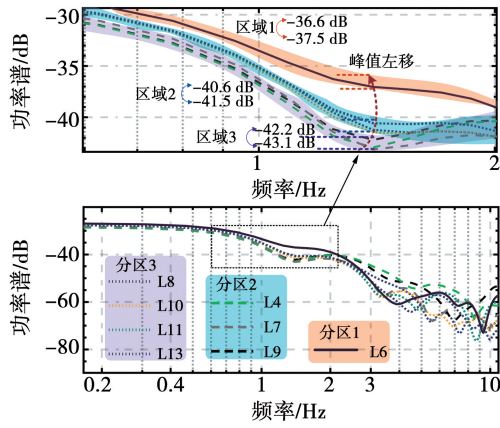


图5 基于谱分析的负荷聚类

Fig.5 Load clustering based on spectral analysis

3 负荷侧惯性计算框架

基于上述分析方法设计了基于谱分析聚类方法的系统等效惯量分区估计技术框架,如图6所示。该方法采用两阶段递进式架构,第一阶段以负荷扰动下的惯性响应历史数据为输入,根据其谱特征划分惯性区域并构建负荷区域惯性映射模型,通过功频特征与动态聚类机制实现负荷侧动态耦合分区;第二阶段基于分布指数(inertia distribution index, IDI)^[26],利用负荷类型权重在耦合分区基础上实现区域惯性参数的动态精确辨识。

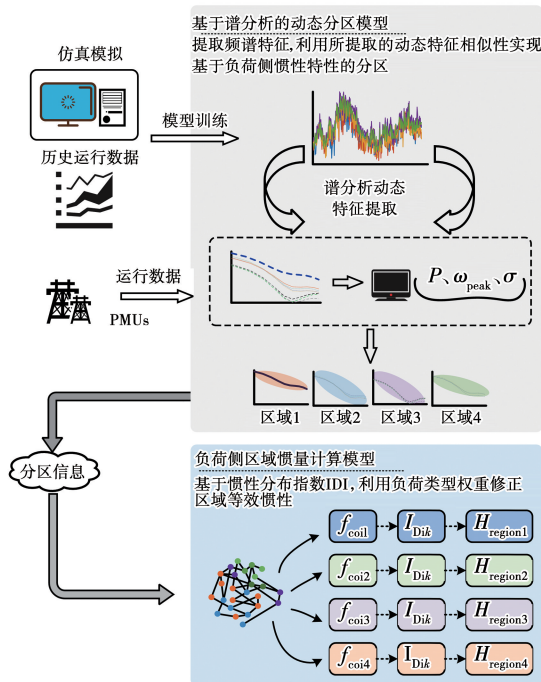


图6 负荷侧等效惯量动态估计框架

Fig.6 Load side equivalent inertia dynamic estimation framework

鉴于扰动后系统频率呈现空间分布特性,需通过惯性加权定义平均频率信号 f_{coi} ,即

$$f_{\text{coi}}(t) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n f_k(t). \quad (13)$$

式中: $f_k(t)$ 为区域内第 k 个设备的频率变化量; n 为设备总数。负荷侧惯性的高度分散性与电源侧同步机主导区域的集中式惯性特性形成显著的空间异质性。

为量化表征惯量的空间异质性特性,引入基于离散化处理的惯性分布指数,其电气距离参数 d_k 定义为

$$d_k = \sqrt{\frac{1}{M\Delta T} \sum_{i=1}^M [f_k(i) - f_{\text{coi}}(i)]^2}. \quad (14)$$

式中: d_k 表示节点 k 与惯性中心间的电气距离; M 为样本数量; ΔT 为相量测量单元(phaser measurement unit, PMU)的采样间隔; $f_k(i)$ 和 $f_{\text{coi}}(i)$ 分别为节点 k 与惯性中心的第 i 个频率测量值; $M\Delta T$ 对应扰动发生至系统频率调节启动的时间窗口。节点惯性分布指数进一步定义为

$$I_{\text{Dik}} = \frac{d_k - d_{\text{max}}}{d_{\text{max}} - d_{\text{min}}}. \quad (15)$$

式中: I_{Dik} 表示节点 k 对应的惯性分布指数值; d_{max} 和 d_{min} 分别为节点与惯性中心之间的最大、最小电气距离。由于惯性中心频率 f_{coi} 具有最小频率偏差,将其作为基准频率。 I_{Dik} 值越小表明节点惯性越大且越接近惯性中心。结合负荷类型权重修正区域等效惯性,即

$$H_{\text{region}} = \frac{\sum_{k=1}^n (H_k \eta_k) I_{\text{Dik}}^{-1}}{\sum_{k=1}^n I_{\text{Dik}}^{-1}}. \quad (16)$$

类型增强因子 η_k 用于平衡不同分区下的惯性总值,定义如下:

$$\eta_k = \begin{cases} 1, & \text{同步节点;} \\ 1 - \lambda_{\text{ag}}, & \text{异步节点;} \\ \lambda_{\text{sl}}, & \text{静态节点。} \end{cases} \quad (17)$$

其中异步节点权重 λ_{ag} 与静态节点权重 λ_{sl} 的值可以通过电动机容量占比与负荷单元惯量回归模型动态调整^[14]。

4 仿真验证

仿真实验在 MATLAB/Simulink 平台构建,系统架构如图7所示。硬件配置采用 Intel® Core™ i7-1250 处理器与 64GB DDR4 内存。建立包含 29 节

点与 7 台发电机的标准测试网络,严格遵循 IEEE 标准配置潮流计算参数。系统标称频率设定为 50 Hz,系统详细参数参见表 1 与表 2。

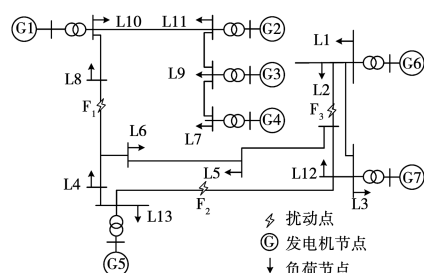


图 7 IEEE 29 节点仿真测试系统结构图

Fig. 7 Topology of IEEE 29 node system

表 1 发电机节点详细参数

Table 1 Parameters of generator node

发电机	容量/MVA	功率/MW	惯量/s	类型
G1	5 500	—	6.4	swing
G2	2 200	1 800	7	PV
G3	200	180	7	PV
G4	2 700	2 500	8	PV
G5	5 000	4 500	6	PV
G6	5 900	5 000	7	PV
G7	4 900	4 500	7	PV

表 2 负荷节点详细参数

Table 2 Parameters of load node

负荷	有功功率/MW	无功功率/Mvar	负荷类型
L1	1.2	330	RL, 异步电机
L2	43	990	RL, 异步电机
L3	2.5	1 650	RL, 同步电机
L4	3.3	990	RLC
L5	5.4	1 320	RL, RLC
L6	4.7	1 320	RL
L7	3.2	660	RLC
L8	4.6	1 980	RL
L9	3.1	330	RL
L10	2.2	660	RL
L11	2.2	660	RC
L12	69	520	RC, 同步电机
L13	155	322	RLC, 异步电机

4.1 不同扰动下负荷侧动态分区评估

在系统频率故障后的 1.2 秒内,采集 13 个负荷节点的功频数据以构建样本集,并进行训练与动态

分区。如图 7 所示,设置了 3 个位置与大小均不相同的扰动(阻值分别为 0.1、0.05 和 0.3 Ω),并于 5 个电网周期后清除。分区结果见图 8 与图 9。

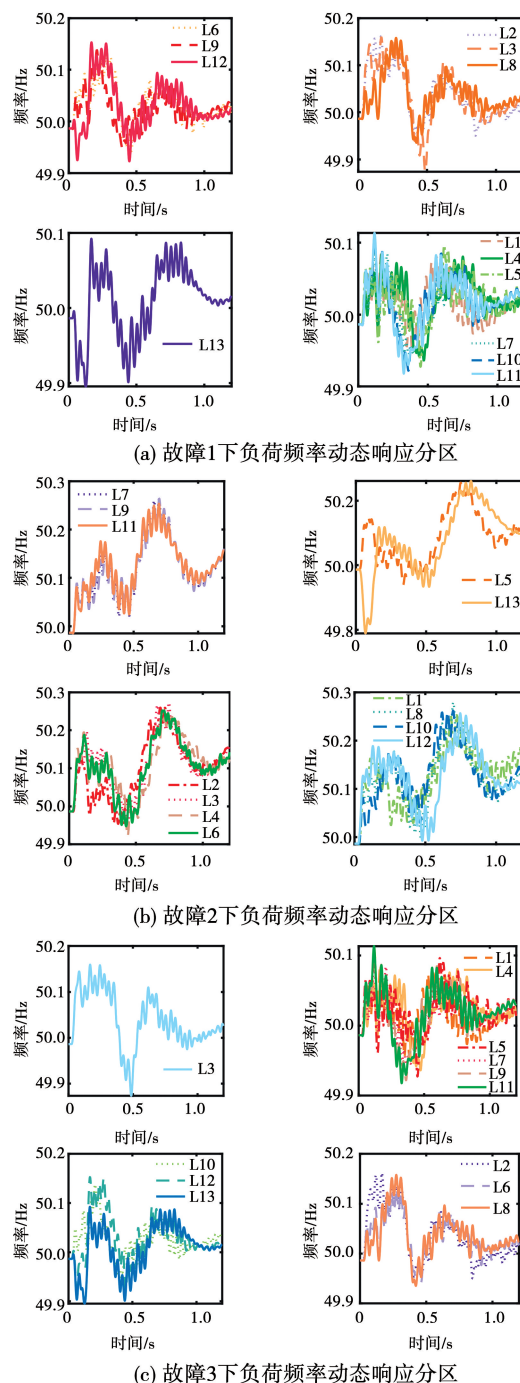


图 8 不同故障位置下频率动态响应分区

Fig. 8 Frequency dynamic response partitioning under different fault locations

分析图 8 ~ 图 9 可知,各负荷节点的抗扰能力存在显著差异,同一故障下由于负荷类型和故障位置不同,负荷节点的惯性支撑表现亦不同。如图 8(a)可知,L2、L3 和 L8 在扰动开始时迅速抬升

频率进行惯量支撑,而 L13 频率呈现出短暂的下跌后迅速进行攀升进行惯量支撑。通过谱聚类分析模型,具有相似动态特性的负荷被聚类至同一区域。然而,当扰动位置改变时,负荷频率响应特性发生偏移,导致原有分区结构不再适用。本文提出的动态分区方法通过谱分析精准捕获负荷特性进而进行分区。相较传统静态方法,所提出动态分区方法能够适应不同故障场景根据负荷状态进行精确聚类。

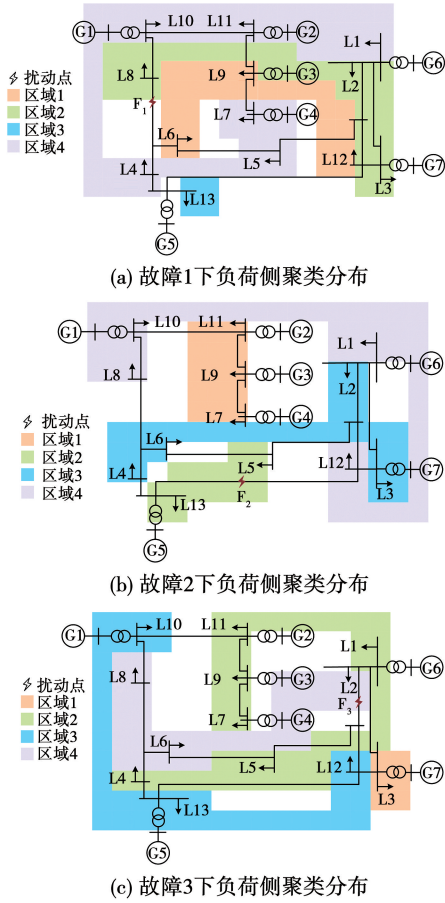


图9 不同故障位置下负荷侧分区

Fig. 9 Load side partitioning under different fault locations

4.2 多场景动态分区能力对比

为了验证所提出动态分区方法性能,在多场景下与传统静态分区方法^[26]及基于深度学习的动态分区方法^[27]进行了全面对比。以故障1工况下负荷 L12 为例,传统方法将 L5、L12、L13 划分为固定区域,如图 10 所示。而本文方法通过谱分析聚类将 L6、L9、L12 聚类至同一区域,基于深度学习的方法则将 L2、L7、L9、L12 聚类至同一区域。为了清晰展示 3 种方法的性能对比,在图 11 中引入了标准偏差曲线,计算如下:

$$\text{Error} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (f_i - f_{\text{coi}})^2}{N}} \quad (18)$$

其反映了一个数据集的离散度,可以直观地表示出偏离的程度。标准偏差越小,值与平均值的偏差越小,反之亦然。

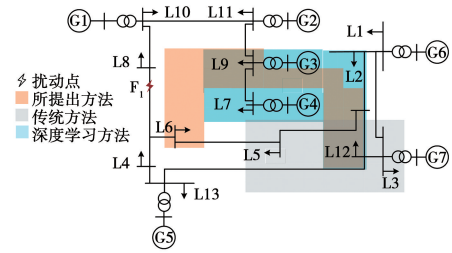


图10 故障1下不同方法分区对比

Fig. 10 Comparison of partitioning methods under fault 1

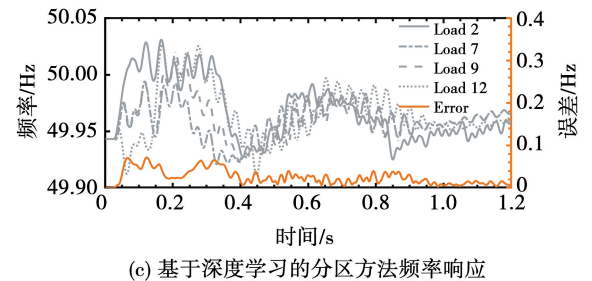
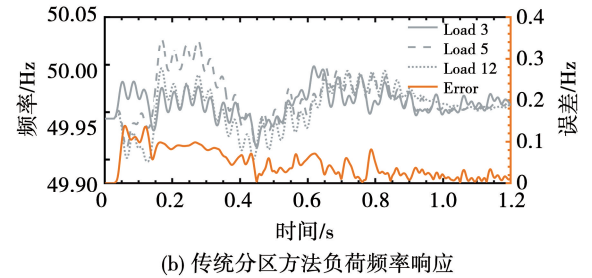
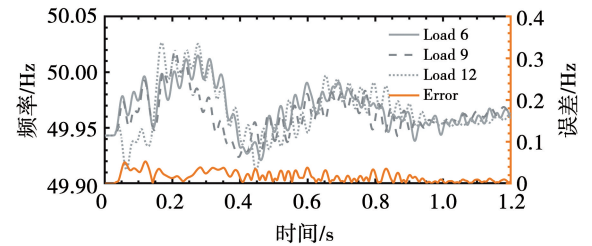


图11 故障1下不同方法分区精度对比

Fig. 11 Partitioning method accuracy comparison under fault 1

通过图 11 的频率响应对比显示,所提出方法区域内频率响应曲线标准差降低 42.7%,验证了其优越的类内一致性。所提方法即使在误差最大的 0 到

0.2 s 内,仍然维持在 0.03 Hz 以下。

根据式(16)所示关系,区域等效惯性 H_{region} 的估计误差与惯性中心频率 f_{coi} 的测量误差直接相关。传统分区方法因忽略负荷动态特性差异,导致 f_{coi} 偏离真实响应水平,误差显著。本文提出的分区方法通过聚类谱分析特性相似的负荷,使 f_{coi} 更逼近真实值。为验证方法有效性,设计对比实验分析累计误差如图 12 所示。

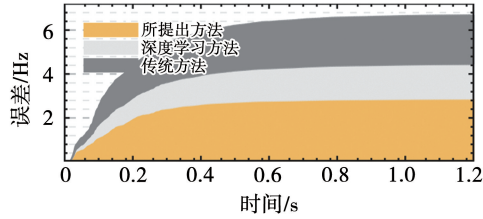


图 12 不同方法下累计误差对比

Fig. 12 Comparative performance of cumulative errors for different methods

为了验证所提出方法精度,引入平均绝对误差(mean absolute error, MAE)与均方根误差(root mean square error, RMSE)作为量化指标,结果如图 13 和图 14 所示。从图 13 ~ 图 14 可以看出,所提方法在 3 种故障工况下,MAE 分别下降了 53.44%、38.46% 和 20%, RMSE 分别提升了 48.06%、59.09% 和 48.03%,显著优于对比方法,体现出良好的多场景适应能力。尽管基于深度学习的分区方法在特定场景中可能表现出较高精度,但其对训练数据和训练效果的依赖性导致整体平均性能较差。

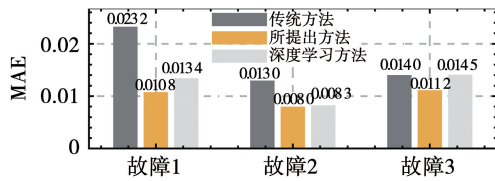


图 13 不同方法下 MAE 性能对比

Fig. 13 Comparative performance of MAE for different methods

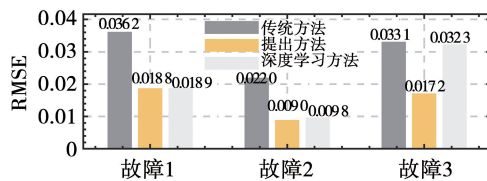


图 14 不同方法下 RMSE 性能对比

Fig. 14 Comparative performance of RMSE for different methods

4.3 负荷侧惯量估计能力对比

为了进一步验证所提出分区方法的惯量估计能力,以故障 1 后 0 ~ 2 秒数据为例,应用保形三次插值处理奇异值(分位数阈值设定 15 ~ 90),最终惯量估算结果如图 15 所示。图 16 显示了累计误差较传统方法降低 28.3%,验证了所提方法在时变工况下的有效性。

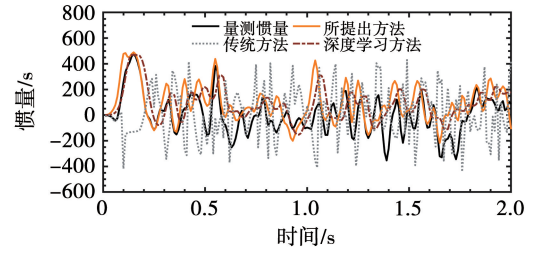


图 15 不同方法下惯性估算对比

Fig. 15 Comparison of inertia estimation between different methods

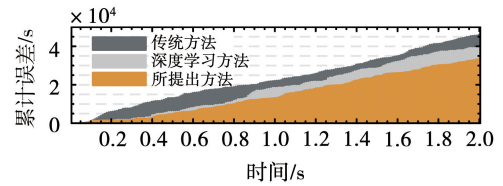


图 16 不同方法下惯性估算累计误差对比

Fig. 16 Comparative performance of cumulative inertia errors for different methods

图 17 展示了 100 次仿真不同工况下的惯性估算误差山脊图,由图中可知所提出方法的误差分布集中在 1.38 ~ 2.88 s 之间,而传统方法的误差中位值在 4.5 s 附近,基于深度学习方法的误差中位值则在 3 s 附近,验证了所提方法惯性估计精度的多场景适应能力。

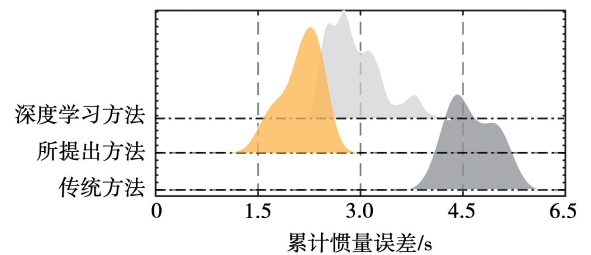


图 17 不同方法下惯性估算误差山脊图

Fig. 17 Comparison of inertia error ridge plot between different methods

4.4 不同负荷类型和地理分布下对系统惯量影响

为充分考虑负荷侧地理分布的影响,本研究对负荷分布系数进行了针对性参数调整。具体而言,基于文献[12]的数据调整了负荷分布场景。在故障1工况下,使L1的负荷系数增加了10%,L4增加了30%,L8增加了45%,L5减少了10%,L9减少了25%,L11减少了55%,以打乱现有负荷分布模式。根据图18~图19所示,地理分布变化显著影响系统惯性空间分布,但所提方法通过特征聚类仍能准确辨识具有相似地理特性的区域,验证了其鲁棒性。

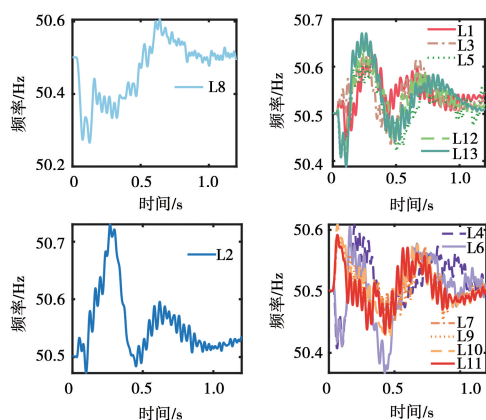


图18 不同负荷类型和地理分布差异下频率动态响应分区

Fig.18 Frequency dynamic under different load types and geographical distribution differences

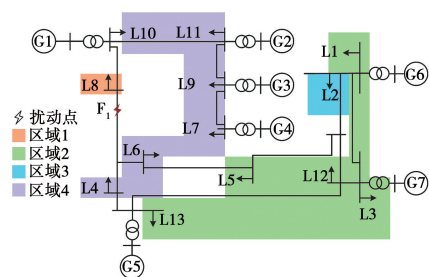


图19 不同负荷类型和地理分布差异下负荷侧分区

Fig.19 Load side partitioning under different load types and geographical distribution differences

5 结论

针对新能源高占比电力系统中负荷侧动态惯量时空异质性导致的频率稳定难题,本文提出了一种基于谱聚类分析与动态特征融合的负荷等效惯量估

计方法,并通过仿真验证其有效性,主要结论如下:

1)提出了计及设备特性与负荷动态行为的负荷侧惯量响应模型,揭示了负荷侧设备类型及其动态行为对等效惯量时空分布的作用机理。研究表明,负荷设备的功率波动特性会显著改变所在区域的等效惯量水平;不同地理位置的故障不仅会引发负荷侧分区结果的显著变化,还能通过动态耦合作用对其他区域的惯量评估产生间接影响。

2)提出了基于谱聚类分析与动态特征融合的负荷等效惯量估计方法,解决了传统方法难以量化负荷惯量时空异质性的问题,在IEEE 29节点系统中实现惯量估计均方根误差降低52.17%,最大相对误差不超过5.3%。

所构建的惯性表征框架通过频谱能量动态分区,实现了负荷惯量的精细化评估。仿真表明,该策略在多工况下均能保持鲁棒性,最大相对误差较传统方法降低38%以上,验证了其适应性。

参考文献:

- [1] 韩泽雷,鞠平,秦川,等. 面向新型电力系统的频率安全研究综述与展望[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(9): 112.
HAN Zelei, JU Ping, QIN Chuan, et al. Review and prospect of research on frequency security of new power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(9): 112.
- [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.
TENG Xianliang, TAN Chao, CHANG Li, et al. Review and prospect of research on active power and frequency control in power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of electric power systems, 2023, 47(15): 12.
- [3] 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.
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.
- [4] 曾繁宏,张俊勃. 电力系统惯性的时空特性及分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 50.
ZENG Fanhong, ZHANG Junbo. Temporal and spatial characteristics of power system inertia and its analysis method[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 50.
- [5] 文云峰,杨伟峰,林晓煌. 低惯量电力系统频率稳定分析与控制研究综述及展望[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(9): 211.

- WEN Yunfeng, YANG Weifeng, LIN Xiaohuang. Review and prospect of frequency stability analysis and control of low-inertia power systems[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(9): 211.
- [6] 刘家豪, 王程, 毕天姝. 面向新能源电力系统频率时空动态的节点等效惯量指标及其应用[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(20): 7773.
- LIU Jiahao, WANG Cheng, BI Tianshu. Node equivalent inertia index for temporal-spatial frequency dynamics of renewable energy power system and its applications[J]. *Proceeding of the CSEE*, 2023, 43(20): 7773.
- [7] 张祥宇, 胡剑峰, 付媛, 等. 风储联合系统的虚拟惯量需求与协同支撑[J]. *电工技术学报*, 2024, 39(3): 672.
- ZHANG Xiangyu, HU Jianfeng, FU Yuan, et al. Virtual inertia demand and collaborative support of wind power and energy storage system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024, 39(3): 672.
- [8] 张剑云, 李明节. 新能源高渗透的电力系统频率特性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(11): 3498.
- ZHANG Jianyun, LI Mingjie. Analysis of the frequency characteristic of the power systems highly penetrated by new energy generation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(11): 3498.
- [9] 叶婧, 林宇琦, 张磊, 等. 考虑负荷侧惯量不确定性的机组组合[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2024, 36(7): 12.
- YE Jing, LIN Yuqi, ZHANG Lei, et al. Unit commitment considering load-side inertia uncertainty[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2024, 36(7): 12.
- [10] GAYATHRI K, MANAS K J. A practical approach to inertia distribution monitoring and impact of inertia distribution on oscillation baselining study for renewable penetrated power grid[J]. *IEEE Systems Journal*, 2023, 17(3): 3593.
- [11] 冯朔, 武家辉. 基于改进 ARMAX 模型的新型电力系统区域惯量评估方法[J]. *电力系统及其自动化*, 2025, 47(1): 51.
- FENG Shuo, WU Jiahui. Method for evaluating regional inertia of new power system based on improved ARMAX model[J]. *Power System and Automation*, 2025, 47(1): 51.
- [12] HU Pengfei, LI Yunjing, YU Xanxue, et al. Inertia estimation of renewable-energy-dominated power system[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 183(9): 1.
- [13] 周特, 周意, 王帅, 等. 变频温控负荷参与电力系统调频的综合惯量支撑技术评述[J/OL]. *中国电机工程学报*. 1-26 [2025-06-14]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.241953>.
- ZHOU Te, ZHOU Yi, WANG Shuai, et al. Review on synthetic inertia support of inverter-based thermostatically controlled loads participating in power system frequency regulation[J/OL]. *Proceedings of the CSEE*. 1-26 [2025-06-14]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.241953>.
- [14] 陈鑫宇, 王琛淇, 于晨阳, 等. 负荷侧惯量估计的精细化统计修正方法[J]. *电力工程技术*, 2024, 43(3): 244.
- CHEN Xinyu, WANG Chenqi, YU Chenyang, et al. Refined statistically modified method for load-side inertia estimation[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2024, 43(3): 244.
- [15] BEST R J, BROGAN P V, MORROW D J. Power system inertia estimation using HVDC power perturbations[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2021, 36(3): 1890.
- [16] 王蒙, 汪莹, 黄明辉, 等. 多回直流馈入的负荷中心分区电压协调控制策略[J]. *太阳能学报*, 2025, 46(3): 207.
- WANG Meng, WANG Ying, HUANG Minghui, et al. Voltage coordinated control strategy of load center[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2025, 46(3): 207.
- [17] LI Yunlu, GUO Shuang, MA Guiqing, et al. Dynamic estimation of load-side equivalent inertia by using clustering method[J]. *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, 2025, 10(1): 1.
- [18] GAYATHRI K, JENA M K. A practical approach to inertia distribution monitoring and impact of inertia distribution on oscillation baselining study for renewable penetrated power grid[J]. *IEEE System Journal*, 2023, 17(3): 3593.
- [19] 尚亚彬, 王小君, 刘盟. 考虑海量异质资源分区聚类的输配电网协同调度策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(22): 83.
- SHANG Yabin, WANG Xiaojun, LIU Zhao. Cooperative scheduling strategy for transmission and distribution networks considering partitioned clustering of massive heterogeneous resources[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(22): 83.
- [20] 徐俊俊, 陈洪凯, 张腾飞, 等. 需求响应视角下有源配电网分层分区切负荷方法[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(7): 245.
- XU Junjun, CHEN Hongkai, ZHANG Tengfei, et al. Hierarchical and partitioned load shedding method of active distribution network in demand response perspective[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(7): 245.
- [21] 马燕峰, 李金媛, 王子建, 等. 基于量测数据的新能源电力系统区域等效惯量评估方法[J]. *电工技术学报*, 2024, 39(17): 5407.
- MA Yanfeng, LI Jinyuan, WANG Zijian, et al. Assessment method of regional equivalent inertia of new energy power system based on measured data[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024, 39(17): 5407.
- [22] 曾辉, 苏安龙, 葛延峰, 等. 考虑负荷特性的区域电网在线转动惯量快速估计算法[J]. *电网技术*, 2023, 47(2): 423.
- ZENG Hui, SU Anlong, GE Yanfeng, et al. Fast estimation algorithm for on-line moment of inertia of regional power grid considering load characteristics[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(2): 423.

- [23] 刘方蕾, 毕天姝, 闫家铭, 等. 基于 PMU 同步测量的分区惯量估计方法[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2020, 47(3): 19.
- LIU Fanglei, BI Tianshu, YAN Jiaming, et al. Area inertia estimation based on PMU synchronous measurements[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2020, 47(3): 19.
- [24] PRADHAN C, BHENDE C N. Frequency sensitivity analysis of load damping coefficient in wind farm-integrated power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2): 1016.
- [25] DHARA P K, RATHER Z H. Non-synchronous inertia estimation in a renewable energy integrated power system with reduced number of monitoring nodes[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023, 14(2): 864.
- [26] 李东东, 董楠, 姚寅, 等. 考虑频率响应分散性及系统分区的含风电系统等效惯量估计[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 36.
- LI Dongdong, DONG Nan, YAO Yin, et al. Equivalent inertia estimation of a power system containing wind power considering dispersion of frequency response and system partitioning[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 36.
- [27] 徐艳春, 任建新, 宋文宇, 等. 基于 1D-SE-ResNet 的含风电电力系统动态分区惯量评估[J]. 南方电网技术, 2025, 19(6): 119.
- XU Yanchun, REN Jianxin, SONG Wenyu, et al. Dynamic partition inertia estimation of power system containing wind power based on 1D-SE-ResNet[J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(6): 119.

(编辑:朱美华)