

电力电子并网装备等效惯量评估研究进展

贾焦心, 杨添淇, 颜湘武, 张建坡

(华北电力大学 分布式储能与微网河北省重点实验室, 河北 保定 071003)

摘要:高比例新能源依靠变流器等电力电子设备并网,削弱系统惯量特性的同时也丰富了系统惯量的来源。为明晰惯量评估在新型电力系统中的作用和潜力,评述了国内外电力电子并网装备等效惯量评估领域的研究进展,并提出探讨与展望。从能量来源的角度简要阐述等效惯量的内涵,根据功率扰动和频率量测2个要素,回顾惯量离线估计的研究历程。通过划分2种主流的研究思路,对电力电子并网装备及新能源电力系统的惯量在线评估研究成果进行梳理。最后尝试对未来新能源电力系统惯量评估领域需深入研究的方向提出展望。

关键词:惯量;等效惯量;惯量估计;电力电子并网装备;新能源电力系统

中图分类号:TM73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202308006

0 引言

“双碳”目标下,电力系统电源构成须进行巨大调整^[1],大量光伏、风机等新能源电力设备代替传统的同步发电机组并网,煤炭污染得到有效治理^[2]。预计到2030年,光伏、风机发电总装机容量将达到1.2 TW^[3]。

对于电力系统而言,惯量表示该系统面对功率扰动时维持频率稳定的能力。传统电力系统中,惯量主要来自同步发电机的旋转部件,当电力系统面对功率缺额或剩余时,同步机组的转子通过调节自身转速的方式相应地释放或吸收功率,以维持系统尽量在当前频率不变^[4]。随着高比例的新能源发电设备替代了传统同步机组并网,电力系统的惯量受到严重削弱。一方面,光伏发电设备不具有旋转元件,无法提供传统意义上的惯量,只能以各种虚拟惯量控制策略为系统提供虚拟惯量;另一方面,风机虽具有旋转元件,但其与光伏设备都依赖逆变器并网,变流器影响了系统频率和风机转速的耦合关系^[5],无论系统是否在工频运行,风机、光伏都会工作在最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)模式,有功出力不再跟随系统频率变化而改变^[6],解耦导致的惯量动态响应能力的缺失将增大系统出现大功率缺额的概率^[7]。

风机、光伏大幅并网带来的低惯量问题在世界范围已引发多起频率安全事故,如南澳“9·28”大停电^[8]、英国“8·9”大停电^[9]等。相关学者对这2起大

停电事故进行分析,认为系统惯量支撑能力的缺乏是导致两起事故的主要原因之一^[10-12]。由此可见,低惯量电力系统的惯量评估对于指导新能源并网容量设定、维持电力系统频率安全具有重要作用。

鉴于准确的惯量估计对于未来低惯量电力系统可靠和安全运行的重要性,惯量估计方法的研究已取得丰富成果,但众多的研究方法并未形成严格、统一的分类体系^[13];且目前惯量评估领域的综述性文献大多针对以同步机惯量为主体的传统电力系统,而聚焦于光伏、风机等电力电子并网装备惯量评估的文献相对较少。

本文首先简要阐述了等效惯量的含义;其次根据时间尺度,将等效惯量评估分为离线评估和在线评估,回顾了惯量离线评估的研究历程;然后根据研究思路不同,将惯量在线评估分为侧重于构建模型的研究和侧重于扰动工况的研究2类,分别归纳述评其国内外研究现状,并简要总结了目前惯量预测估计的相关成果;最后尝试对目前低惯量电力系统的惯量评估工作存在的局限进行探讨,展望了未来的研究方向。

1 等效惯量含义

传统电力系统主要依靠同步发电机的旋转部件提供惯量。转子利用自身所储存的动能补偿系统功率缺额,或对系统盈余的功率进行吸收,以维持系统的频率稳定。同步发电机惯量系数 H 的计算公式如下^[14]:

$$H = \frac{E}{S_N} = \frac{J\omega_n^2}{2S_N} \quad (1)$$

式中: E 为额定转速下转子具有的动能; S_N 为同步机组的额定容量; J 和 ω_n 分别为转子的转动惯量和额定转速。在系统面临功率扰动时,功率变化引发转速变化的过程可用摇摆方程描述^[15],如式(2)所示。

收稿日期:2023-04-02;修回日期:2023-07-28

在线出版日期:2023-08-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52207102);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2022MS074)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52207102) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2022MS074)

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_n \\ 2H \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e \approx P_m - P_e \end{cases} \quad (2)$$

式中: δ 为发电机的功角; ω 为转子转速; T_m 、 T_e 分别为发电机的机械转矩和电磁转矩; P_m 、 P_e 分别为发电机的机械功率与电磁功率。时至今日, 一部分应用于新能源电力系统的研究方法仍然将摇摆方程作为基础, 以计算不同层级的等效惯量。

新能源电力系统中, 同步相量测量单元(phasor measurement unit, PMU)为精确估计系统惯量奠定基础。截至2020年, 国内高压电网全部500 kV节点、部分220 kV节点和重要电厂均已被PMU覆盖, 布点数量超过3 000^[16]。同时随着光伏、风机并网比例的提高, 惯量结构更加复杂, 新能源机组可以通过对并网变流器实施构网型(grid forming, GFM)或跟网型(grid following, GFL)控制来对系统进行虚拟惯量补偿, 温控负荷和储能电站也可以为新能源电力系统提供惯量响应, 系统架构见附录A图A1。因此, 在高比例电力电子设备并网的现代电力系统中, 其等效惯量可以理解为传统惯量、虚拟惯量、负荷侧惯量维护系统频率稳定能力的合力, 惯量的来源及影响机理见表1, 表中影响变量的选取基于表达式 $J \frac{d\omega}{dt} = \Delta T$ (ΔT 为机械转矩与电磁转矩之差)。

表1 新能源电力系统惯量来源及影响机理

Table 1 Inertia sources and influence mechanisms of renewable energy power system

惯量来源	作用机理	影响变量
同步机	惯量支撑功率	J
虚拟同步控制(GFM)	虚拟惯量支撑功率	J
虚拟惯量控制(GFL)	频率-功率响应	ΔT
静态负荷	电压-功率响应	ΔT
异步电动机	惯量支撑功率	J

基于以上分析, 电力系统等效惯量系数可采用式(3)表示^[17]。

$$H_{\text{sys}} = \frac{E_{\text{rsg}} + E_{\text{ssg}} + E_{\text{load}}}{S_{\text{sys}}} \quad (3)$$

式中: H_{sys} 、 S_{sys} 分别为等效惯量系数和系统额定容量; E_{rsg} 、 E_{ssg} 、 E_{load} 分别为来自发电机转子、新能源机组、负荷侧的能量。本章简述了研究内容的评估对象, 关于广义惯量的普适性数学模型见文献[18]。

综上, 电力电子并网装备比例的提高一方面造成了低惯量、威胁系统频率安全的问题; 另一方面丰富了电力系统的惯量来源, 需要加快对惯量提升策略和等效惯量评估的研究。

2 惯量离线估计研究历程

作为最原始的惯量评估方法, 离线评估适用于

传统电力系统发生事故停机后的场景, 通过分析有功、频率波动等数据对离线系统的惯量进行评估。1997年, T. Inoue 等人开创了利用扰动信息进行离线惯量估计的先河。该研究将功率缺额、频率变化率(rate of change of frequency, RoCoF)的量测数据与摇摆方程相结合, 以估计系统的总惯量, 惯量系数表示为^[19]:

$$H = \frac{-\Delta P}{d(\Delta f/f_0)/dt|_{t=0}} \quad (4)$$

式中: ΔP 为扰动发生时系统的功率缺额; f_0 为系统的额定频率; Δf 为扰动发生时系统的频率变化量。由式(4)可知, 功率扰动、RoCoF 是进行惯量离线估计的2个关键要素。为明晰功率扰动对惯量估计的影响机理, 文献[20]提出利用惯量中心的RoCoF计算系统功率缺额的方法, 经验证相较传统方法精度约提升3%。文献[21]提出将PMU有功量测数据与系统阻抗矩阵相结合的思路, 将二者同时应用到功率扰动量的识别中。该方法的优势在于其减少了测量量, 且充分考虑了部分PMU读数不可用或量测数据因干扰出现错误等情况下惯量估计的准确性。文献[22]在功率扰动计算过程中考虑到了负荷侧的调频能力, 对传统的估算模型进行了完善。文献[23]对于RoCoF曲线时间范围的选择提出了新的思考, 使计算所得总功率变化较传统方法更为精确。

新能源系统获取RoCoF主要依靠嵌入式保护和测控装置。基于嵌入式装置的软件测频因其灵活性强、实现简单等特点被广泛应用, 离散傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT)、过零点监测等方法常见的软件测频方法; 随着研究的深入, DFT误差分析法等改进的DFT算法应运而生^[24], 并被广泛应用于测频工作中。各算法技术特点及优缺点对比见表2。可以看出, 现有的测频算法多存在精度低、实时性不佳等问题。此外, 文献[25]点明数据的量

表2 典型软件测频算法技术及优缺点对比

Table 2 Comparison of techniques and advantages and disadvantages of typical software frequency measurement algorithms

算法	技术	优势	缺陷
传统DFT测频算法	DFT	实现简单, 能较好地抑制非周期分量	精度低, 易受高次谐波影响
改进DFT测频算法	DFT结合窗函数修正、DFT结合差值迭代、小波变换	测量精确	实时性较差、计算量大
过零点算法	利用信号波形相继过零点的时间宽度来计算频率	易于实现	实时性较差, 易受噪声和非周期分量的影响
离散(扩展)卡尔曼滤波算法	建模, 在最小化代价函数原则下递推估计状态向量	能较好地抑制白噪声	运算量大时实时性不佳

测地点对惯量评估准确性的影响,揭示了惯量复杂的时空分布特性。文献[26]利用主成分分析辨识扰动初始时刻,但机电暂态波的时延导致该方法具有仅适用于小型系统的局限性^[27]。文献[28]提出利用广域量测系统(wide area measurement system, WAMS)同时估计扰动时间和系统惯量的方法,实现了由惯量离线估计向在线估计的过渡,为以后的研究开拓了思路,但其仅能用于单台发电机的惯量系数测量。

现代电力系统中, WAMS的发展使数据的精度得到了大幅提高,因此可以通过提升数据处理技术、改进辨识模型等方法来提高惯量离线估计的精度。但总体而言,一方面,现有的惯量离线评估方法依赖威胁系统频率安全的大扰动事件,但其在电网实际运行过程中较少发生;另一方面,惯量离线评估仅可分析事故后的惯量,无法对运行中系统的惯量水平进行常态化监测。以上2点限制了惯量离线估计在现代电力系统的应用,因此能够实时在线评估等效惯量的研究方法受到学者们的广泛关注。

3 惯量在线评估研究进展

3.1 惯量在线估计的2种思路

由于惯量离线评估的局限性和量测数据精度的提高,等效惯量在线评估的研究已成为国内外的研究热点,取得了丰硕成果。常将扰动下PMU测得的时域响应数据或准稳态时WAMS量测到的功率、频率等数据作为数据基础,应用于系统等值聚合模型,通过参数辨识等技术在线评估等效惯量^[29]。

本节将所提文献的主要思路基本归纳为2类:一类偏向从新能源系统整体出发,致力于通过构建模型、比例分析等手段对等效惯量进行直接计算或辨识;另一类偏向从系统经历的工况类型出发,致力于通过模态分析、数据驱动等手段解决小扰动或准稳态等工况下惯量的在线估计问题。

3.2 侧重构建模型的评估方法

构建模型是新能源电力系统等效惯量评估工作中针对虚拟惯量评估的常用手段,在风电场虚拟惯量系数计算方面有较多应用。目前基于构建模型的惯量评估方法可基本分为基于机理建模的评估方法和基于系统辨识的评估方法2类。

1)机理建模,根据系统的传递函数建立数学模型,之后根据模型推导和测量系统的等效惯量参数。文献[30]建立了双馈风机的简化模型,通过分析其虚拟惯量控制揭示了等效虚拟惯量系数的三阶段时变特征和形成机理,并求取了其时频域解析解。文献[31]在建模基础上给出了等效惯量系数在不同控制策略对比下的解析表达式,但该文并未深入探讨等效惯量系数对系统频率偏差、频率二次跌落等指标的影响,只是进行了定性分析。文献[32]提出了

一种评估双馈风力发电机组惯量的方法,用动态的惯量系数函数替代传统的惯量系数,更直观地揭示了惯量的动态性质和影响规律。文献[33]在构建惯量数学模型时充分考虑了虚拟惯量的引入,提出了一种计及光伏的惯量评估策略。文献[34]在聚焦风电场内部结构建模的基础上引入Copula函数,以实现风电场可用惯量的分区估计,平均误差约为4%。文献[35]利用混合Copula函数构建风速的概率分布模型,进而推算出风电场实时惯量的置信区间。然而机理建模通常需要明晰系统内部的具体运行参数和控制策略,对数据的高需求限制了该类方法的实际应用。文献[36]提出了一种能够描述新型电力系统惯量动态演变的自回归模型,利用简化的动态模型来对惯量随机过程进行可行和自适应的描述,但此类基于统计模型的方法往往需要大量的离线训练和校准。为实现无量测数据的新能源规划系统的惯量估计,文献[37]提出利用新能源比例推算系统同步机容量范围,进而建立系统惯量估计模型的方法,但该研究不足之处在于所提的惯量估计范围未充分考虑异步机惯量。

2)系统辨识,即端口特性建模,能够从数据中辨识惯量值,减少了对系统控制运行参数的依赖,降低了等效惯量评估的难度。文献[38]以系统辨识为基础,利用全时间序列聚类从频率量测数据中估算微电网系统的整体等效惯量。文献[39]通过构建含负荷惯量响应的摇摆方程模型,并引入中位差算法以提高风电场的惯量系数测量的准确性。文献[40-41]对虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)的虚拟惯量评估方法进行研究,在阶跃扰动指令下,利用递推最小二乘辨识算法从VSG输出的有功功率数据中辨识出虚拟惯量大小,但是研究所用到的最小二乘辨识算法对时变参数的辨识效果不佳,难以在高比例电力电子设备接入的现代电网中发挥优势。文献[42]对此方法进行改进,将时变遗忘因子与递归最小二乘辨识算法相结合,增强了对风电系统时变惯量的辨识能力的同时,也降低了对量测数据的需求程度。考虑到高比例电力电子设备惯量日益凸显的时空分布特性,文献[43]提出了利用容卡尔曼滤波算法辨识参数,并实时分区估计系统惯量的方法,但该研究在部分工况下无法计及电流源型虚拟惯量。文献[44]将动态最优遗忘因子的递归最小二乘算法(recursive least square algorithm of dynamic optimal forgetting factor, DOFF-RLS)应用到受控自回归辨识模型中,以针对光伏系统等效惯量的时变特性。文献[45]提出一种多新息电网节点惯量辨识方法,使全局惯量空间分布情况一目了然,但其辨识所得节点惯量精度有待提高。

虽然系统辨识能够实现等效惯量的在线估计,但辨识结果往往隐藏在高阶模型的参数中,在对模型降阶的过程中产生的误差会影响惯量在线评估的准确性^[46]。为提高等效惯量评估精度,文献[47]利用赤池信息量准则(Akaike information criterion, AIC)对辨识模型进行了定阶,避免了降阶影响模型拟合度而产生的误差。文献[48]根据动能定理提出了基于中心频率平方偏差概念的新的惯量评估方法,提高精度的同时节约了量测装置的安装成本。文献[49]利用改进的最小二乘算法对风电场并网惯量削弱量进行探讨,算例验证中大扰动、小扰动伴随发生时平均误差分别为1.90%、1.40%。各文献评估惯量层次、技术、评估效果见表3。

总体而言,目前大部分侧重于构建模型的惯量评估主要针对新能源场站及系统层次的惯量,且相对风电系统而言,应用于光储系统的评估方法较匮乏。另外,此类方法通常不得不在减少对系统具体参数的依赖和提高惯量在线评估的精度中作出取舍,更多能够兼顾两者的等效惯量评估方法值得深入研究。

3.3 侧重扰动事件的评估方法

新能源电力系统中,基于所利用扰动事件的程度可将惯量在线评估分为大扰动后的评估、小扰动后的评估及准稳态时的评估,其中基于大扰动的惯量估计更多地被应用于离线评估中,小扰动或准稳态工况下的惯量估计是目前主流的研究方向。小扰动评估方法较多应用于同步机惯量占主导地位的系统,依靠机电暂态的响应特性与系统惯量进行联系,实现惯量在线评估。例如文献[50]通过系统机电振荡参数(振型的振荡频率和阻尼比)与动态参数(惯量系数和阻尼系数)之间的内在关系来估计系统惯量,该研究的特点是降低了对频率变化的依赖,同时适用于多区域互联系统。随着变流器等电力电子设

备的广泛使用,许多学者通过人为注入激励信号的方式,探测系统的频率响应作为惯量评估的数据基础,此类方法也可归为广义的小扰动评估方法。文献[51]将闭环辨识算法应用到等效惯量评估中,利用内部系统中电力电子设备对所设计的微扰动进行探测,观察系统的功率和频率动态响应,借此评估等效惯量。该技术的特点在于对系统的安全性影响较小,适合评估新能源电力系统中时变、非线性的等效惯量参数,但探测信号的注入会导致计算过程复杂化。文献[52]利用非侵入性的激励信号干扰系统的频率,进而通过滚动时域估计(moving horizon estimation, MHE)实时估算微电网系统的惯量,但该研究引入的有功功率脉冲序列在一定程度上存在导致区域间振荡的风险。文献[53]提出了一种估计微电网系统惯量的评估方法,对传统的基于摆动方程的估计方法进行了改进,提高了估算的精度,在小扰动工况下具有良好表现。总而言之,基于小扰动的评估方法基本都利用振荡信息与惯量之间的关联进行估计^[54],而系统的振荡频率并非单纯受系统惯量影响,因此依靠小扰动的惯量评估方法精度相对欠缺^[55]。

新能源设备渗透率的提高使等效惯量时变性渐显,依赖小扰动的评估方法往往对时变惯量的追踪能力较差;准稳态评估方法能够利用类噪声信号或系统实时运行中部分事件引起的频率变化,如负荷连续投切等功率波动事件来在线评估系统等效惯量,受到广泛关注。文献[56]提出了一种考虑快速频率响应的惯量在线估计方法,该方法能够准确跟踪VSG及含储能的风电场的时变惯量,但其缺陷是会受到数值振荡的影响。文献[57]对这一不足进行改进,利用戴维南等效实时估计VSG内部的虚拟频率,针对构网型的变流器接口资源(inverter based resources, IBRs)提出了一种基于数据驱动的时变惯

表3 各文献评估对象、技术、精度对比

Table 3 Comparison of objects, technologies and accuracy of various documents

文献	惯量层次	技术	评估效果
[30-31]	双馈风机惯量	本体模型辨识	等效惯量系数估计值与仿真值曲线吻合
[33]	光伏系统惯量	虚拟同步控制	相对容差为1.19%
[34]	风电场惯量	Copula函数+聚类算法	平均误差为4.055%
[37]	新能源系统惯量	新能源比例分析	误差范围为0.07%~9%
[38]	微电网系统惯量	系统辨识	辨识精度范围为88.1%~96.4%
[39]	风电场惯量	建立摇摆方程模型	误差范围为1.5%~10%
[40-41]	VSG惯量	递归最小二乘算法	误差约为0.7%
[42, 49]	风电场惯量	改进的最小二乘算法	文献[49]的平均误差为1.65%
[43]	区域惯量	卡尔曼滤波参数辨识	误差范围为0.98%~6.22%
[44]	光伏系统惯量	DOFF-RLS	估计值与仿真值曲线拟合度为82.46%
[45]	节点惯量	多新息辨识	误差小于6%
[46]	风电场惯量	公共耦合点有功-频率量测数据分析	误差指标为0.0186
[47]	风电场惯量	AIC改进辨识模型	误差为3.88%
[48]	新能源系统惯量	中心频率平方偏差算法	误差为2.69%

量跟踪方法。文献[58]以频率动态响应等效为基础,评估了采用不同惯量支撑方式的风机提供的等效惯量大小,并分析其影响因素。文献[59]将一阶非线性聚合电力系统模型和动态回归程序相结合,提出的算法能够在未知扰动位置和大小,的情况下,实时估计含新能源设备的大型电力系统的惯量系数。文献[60]提出了类噪声场景下的负荷惯量两阶段辨识方法,较全面地考虑了不同转矩特性负荷的惯量,增强了此类方法的实用性。各文献惯量层次、工况基础、技术见表4。随着新能源渗透率的提高,评估源侧新能源设备惯量的同时,宏观层面系统各区域、各节点间惯量的影响过程也会更为复杂,因此明晰惯量时空分布特性的研究将对未来低惯量系统的惯量估计具有指导意义。

表4 各文献惯量层次、工况基础、技术对比

Table 4 Comparison of inertia hierarchies, operating modes and technologies of various documents

文献	惯量层次	工况基础	技术
[51]	含新能源电力系统惯量	微扰动信号	闭环辨识
[52]	互联电力系统区域惯量	区域间振荡	模态分析
[53]	微电网系统惯量	小扰动事件	改进的摇摆方程模型
[54]	微电网系统惯量	有功脉冲信号	滚动时域估计
[55]	新能源电力系统惯量	随机噪声扰动	功率谱密度分析
[56]	VSG及风储系统惯量	负载骤变	建立动态估计器
[57]	IBRs惯量	频率波动事件	数据驱动
[59]	新能源电力系统惯量	准稳态运行	动态回归扩展与混合
[60]	负荷惯量	类噪声信号	两阶段辨识

3.4 关于惯量趋势预测的讨论

尽管准稳态评估方法通常存在数据需求量大、迭代计算过程复杂的问题,但其面对时变惯量具有一定优势,因此目前在新能源电力系统惯量在线评估工作中得到更为广泛的应用。由于新能源发电设备比例的不断增加,且其存在无法克服出力与气象条件强相关的缺陷,未来电网等效惯量的时变性必将继续增强,因此有必要进行预测系统等效惯量变化趋势的研究。文献[61]开发了一种考虑新能源并网份额的惯量预测工具,有望提前3 h预测系统惯量和主频率响应储备(primary frequency response reserve, PFR)需求。文献[62]利用数据驱动探寻风电场等效惯量与相关变量之间的非线性关系,进而预测系统等效惯量变化趋势,为维护电网运行安全提供概率统计信息。文献[63]利用BP神经网络训练,提出一种基于风速预测的风电场虚拟惯量分配策略,使不同出力的机组在调频过程中“取长补短”。文献[64]以时空分布特性为重点,提出了一种多维度的惯量评估方法,其引入的“惯量变化率”指标一定程度上能够显现系统惯量因新能源出力波动而产生的变化趋势。文献[65]研发并验证了基于神经网络

的惯量预测工具,适用于风电场渗透率高的电力系统。然而相较于负荷和风力发电预测等话题,目前关于惯量预测领域的探索明显不足^[66],亟待出现更多较为成熟的惯量预测方法,并促成其评价指标及评价体系的建立。

4 探讨与展望

随着电力电子并网装备的渗透率日益提高,系统呈现低惯量特征的同时又面临着惯量结构复杂、时空分布特性难以厘清等问题,进行等效惯量评估研究对优化电网调度、维护系统稳定具有重要意义。该文梳理述评了国内外惯量评估研究成果和特点后,针对目前低惯量系统等效惯量评估的研究现状,尝试提出以下建议。

1) 新能源电力系统等效惯量的时变性凸显,现有惯量评估方法大多以电力系统为整体进行惯量评估,且部分评估方法对时变惯量的跟踪效果不佳,未来的等效惯量评估研究需更多地聚焦于惯量复杂的时空分布特性。

2) WAMS及量测技术的发展使得所获数据更加精确。面对新能源电力系统中更丰富的惯量来源,可在样本集质量提高的基础上更广泛地结合机器学习、大数据等技术构建惯量离线、在线评估的高精度模型,最大限度发挥高精度量测数据的优势。

3) 在线评估、预测等效惯量对电网优化运行具有重要作用。电力电子并网设备威胁系统频率安全的问题已有较丰富的研究成果,但目前惯量趋势预测的研究尚处于起步阶段,且现有的惯量预测方法对系统其他变量的量测和预测信息极为依赖,亟需针对新型电力系统研究更成熟的等效惯量预测方法。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 高志远,张晶,庄卫金,等. 关于新型电力系统部分特点的思考[J]. 电力自动化设备,2023,43(6):137-143,151.
GAO Zhiyuan, ZHANG Jing, ZHUANG Weijin, et al. Thoughts on some characteristics of new style power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(6):137-143, 151.
- [2] 曹永吉,张恒旭,施啸寒,等. 规模化分布式能源参与大电网安全稳定控制的机制初探[J]. 电力系统自动化,2021,45(18):1-8.
CAO Yongji, ZHANG Hengxu, SHI Xiaohan, et al. Preliminary study on participation mechanism of large-scale distributed energy resource in security and stability control of large power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(18):1-8.
- [3] 向敏. 建立长效机制、促风电光伏发电高质量发展:《关于2021年风电、光伏发电开发建设有关事项的通知》解读[J]. 中国电力,2021(6):24-25.
- [4] 鲁宗相,汤海雁,乔颖,等. 电力电子接口对电力系统频率控制的影响综述[J]. 中国电力,2018,51(1):51-58.

- LU Zongxiang, TANG Haiyan, QIAO Ying, et al. The impact of power electronics interfaces on power system frequency control: a review[J]. *Electric Power*, 2018, 51(1): 51-58.
- [5] BEVRANI H, GHOSH A, LEDWICH G. Renewable energy sources and frequency regulation: survey and new perspectives[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2010, 4(5): 438-457.
- [6] 李昭良, 胥国毅, 王程, 等. 计及功率响应延时补偿的换流器接口电源等效惯量估计方法[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(1): 12-21.
- LI Zhaoliang, XU Guoyi, WANG Cheng, et al. Equivalent inertia estimation method for converter-interfaced generator considering power response delay compensation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(1): 12-21.
- [7] 蔡国伟, 钟超, 吴刚, 等. 考虑风电机组超速减载与惯量控制的电力系统机组组合策略[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(16): 134-142.
- CAI Guowei, ZHONG Chao, WU Gang, et al. Unit commitment strategy of power system considering overspeed load reduction and inertia control of wind turbine[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(16): 134-142.
- [8] MANWARING R. South Australia July to December 2016[J]. *Australian Journal of Politics & History*, 2017, 63(2): 315-320.
- [9] BIALEK J. What does the GB power outage on 9 August 2019 tell us about the current state of decarbonised power systems?[J]. *Energy Policy*, 2020, 146: 111821.
- [10] YAN R, SAHA T K, BAI F, et al. The anatomy of the 2016 South Australia blackout: a catastrophic event in a high renewable network[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(5): 5374-5388.
- [11] 曾辉, 孙峰, 李铁, 等. 澳大利亚“9·28”大停电事故分析及对中国启示[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(13): 1-6.
- ZENG Hui, SUN Feng, LI Tie, et al. Analysis of “9·28” blackout in South Australia and its enlightenment to China[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(13): 1-6.
- [12] 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.
- [13] HEYLEN E, TENG F, STRBAC G. Challenges and opportunities of inertia estimation and forecasting in low-inertia power systems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 147(4): 111176.
- [14] ZENG F H, ZHANG J B, CHEN G, et al. Online estimation of power system inertia constant under normal operating conditions[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 101426-101436.
- [15] XIONG L S, LIU X K, ZHANG D H, et al. Rapid power compensation-based frequency response strategy for low-inertia power systems[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, 9(4): 4500-4513.
- [16] 李毅. 基于同步数据的配电网运行状态可视化研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- LI Yi. Research of distribution network state compositive visualization based on synchronous data[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [17] 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): 50-58, 373.
- ZENG Fanhong, ZHANG Junbo. Temporal and spatial characteristics of power system inertia and its analysis method[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(1): 50-58, 373.
- [18] 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.
- [19] INOUE T, TANIGUCHI H, IKEGUCHI Y, et al. Estimation of power system inertia constant and capacity of spinning-reserve support generators using measured frequency transients[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1997, 12(1): 136-143.
- [20] AZIZIPANAH-ABARGHOEE R, MALEKPOUR M, PAOLONE M, et al. A new approach to the online estimation of the loss of generation size in power systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 34(3): 2103-2113.
- [21] SHAMS N, WALL P, TERZIJA V. Active power imbalance detection, size and location estimation using limited PMU measurements[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 34(2): 1362-1372.
- [22] ZOGRAFOS D. Power system inertia estimation and frequency response assessment[D]. Stockholm, Sweden: KTH Royal Institute of Technology, 2019.
- [23] ZOGRAFOS D, GHANDHARI M. Estimation of power system inertia[C]//2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting(PESGM). Boston, MA, USA: IEEE, 2016: 1-5.
- [24] 袁石良, 董杰, 徐志强, 等. 适应于时变频率的高精度测频算法设计与实现[J]. *电力自动化设备*, 2016, 36(11): 171-175.
- YUAN Shiliang, DONG Jie, XU Zhiqiang, et al. Design and implementation of high-precision time-varying frequency measuring algorithm[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2016, 36(11): 171-175.
- [25] ASHTON P M, SAUNDERS C S, TAYLOR G A, et al. Inertia estimation of the GB power system using synchrophasor measurements[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 30(2): 701-709.
- [26] GE Y Y, FLUECK A J, KIM D K, et al. Power system real-time event detection and associated data archival reduction based on synchrophasors[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, 6(4): 2088-2097.
- [27] 张武其, 文云峰, 迟方德, 等. 电力系统惯量评估研究框架与展望[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(20): 6842-6856.
- ZHANG Wuqi, WEN Yunfeng, CHI Fangde, et al. Research framework and prospect on power system inertia estimation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(20): 6842-6856.
- [28] WALL P, TERZIJA V. Simultaneous estimation of the time of disturbance and inertia in power systems[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2014, 29(4): 2018-2031.
- [29] 王博, 杨德友, 蔡国伟. 高比例新能源接入下电力系统惯量相关问题研究综述[J]. *电网技术*, 2020, 44(8): 2998-3007.
- WANG Bo, YANG Deyou, CAI Guowei. Review of research on power system inertia related issues in the context of high penetration of renewable power generation[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(8): 2998-3007.
- [30] 李世春, 邓长虹, 龙志君, 等. 风电场等效虚拟惯性时间常数计算[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(7): 22-29.
- LI Shichun, DENG Changhong, LONG Zhijun, et al. Calculation of equivalent virtual inertia time constant of wind farm[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(7): 22-29.
- [31] 刘皓明, 任秋业, 张占奎, 等. 双馈风机等效惯性时间常数计算及转差率反馈惯量控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(17): 49-57.
- LIU Haoming, REN Qiuye, ZHANG Zhankui, et al. Calculation of equivalent inertia time constant for doubly-fed induc-

- tion generators and slip-feedback inertia control strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17): 49-57.
- [32] GUO X, ZHU D H, ZOU X D, et al. Dynamic inertia evaluation for type-3 wind turbines based on inertia function[J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2021, 11(1): 28-38.
- [33] 李东东, 郭天洋, 刘庆飞, 等. 计及光伏发电的新能源电力系统惯量评估[J]. 太阳能学报, 2021, 42(5): 174-179.
LI Dongdong, GUO Tianyang, LIU Qingfei, et al. Inertia estimation of renewable power system considering photovoltaics[J]. Acta Energetica Sinica, 2021, 42(5): 174-179.
- [34] 马喜平, 何世恩, 姚寅, 等. 计及风速不确定性及相关性的风电场分区虚拟惯量估计[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(10): 123-131.
MA Xiping, HE Shien, YAO Yin, et al. Virtual inertia estimation of wind farm zones with wind speed uncertainty and correlation[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(10): 123-131.
- [35] 韩帅, 张峰, 丁磊, 等. 基于混合Copula函数的风电场可用惯量评估方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(3): 189-195, 210.
HAN Shuai, ZHANG Feng, DING Lei, et al. Available inertia evaluation method of wind farm based on mixed Copula function[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3): 189-195, 210.
- [36] ALLELLA F, CHIODO E, GIANNUZZI G M, et al. On-line estimation assessment of power systems inertia with high penetration of renewable generation[J]. IEEE Access, 2020, 8: 62689-62697.
- [37] 任凯奇, 张东英, 黄越辉, 等. 基于新能源出力比例的大规模系统惯量估计[J]. 电网技术, 2022, 46(4): 1307-1315.
REN Kaiqi, ZHANG Dongying, HUANG Yuehui, et al. Large-scale system inertia estimation based on new energy output ratio[J]. Power System Technology, 2022, 46(4): 1307-1315.
- [38] PHURAILATPAM C, RATHER Z H, BAHRANI B, et al. Estimation of non-synchronous inertia in AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(4): 1903-1914.
- [39] 徐波, 彭耀辉, 章林炜, 等. 计及风电场与负荷惯性响应的电力系统惯性时间常数测量[J]. 水电能源科学, 2021, 39(1): 196-200.
XU Bo, PENG Yaohui, ZHANG Linwei, et al. Measurement of power system inertia time constant considering wind farm and load inertial response[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(1): 196-200.
- [40] 罗琴琴, 苏建徽, 林志光, 等. 基于递推最小二乘法的虚拟同步发电机参数辨识方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 215-221.
LUO Qinqin, SU Jianhui, LIN Zhiguang, et al. Parameter identification method for virtual synchronous generators based on recursive least squares algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 215-221.
- [41] 曾正, 邵伟华. 基于线性化模型的虚拟同步发电机惯性和阻尼辨识[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(10): 37-43, 81.
ZENG Zheng, SHAO Weihua. Estimation of inertia and damping for virtual synchronous generator based on linearized model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(10): 37-43, 81.
- [42] 李世春, 徐松林, 李惠子, 等. 风电场等效虚拟惯量快速估计方法[J]. 电网技术, 2021, 45(12): 4683-4692.
LI Shichun, XU Songlin, LI Huizi, et al. Rapid estimation of equivalent virtual inertia of wind farm[J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4683-4692.
- [43] 曹斌, 原帅, 刘家豪, 等. 考虑频率动态响应实时分区的电力系统惯量在线评估方法[J]. 电网技术, 2023, 47(3): 930-941.
CAO Bin, YUAN Shuai, LIU Jiahao, et al. Power system on-line inertia estimation considering real-time clustering of frequency dynamic response[J]. Power System Technology, 2023, 47(3): 930-941.
- [44] MA H, YANG D, QIN H, et al. DOFF-RLS-based equivalent inertia estimation for power system with PV[C]//2022 IEEE 4th International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems(ICPICS). Shenyang, China: IEEE, 2022: 6-10.
- [45] 李元臣, 文云峰, 叶希, 等. 基于多新息辨识的电力系统节点惯量估计方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(8): 89-95.
LI Yuanchen, WEN Yunfeng, YE Xi, et al. Estimation method of power system nodal inertia based on multi-innovation identification[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(8): 89-95.
- [46] 安军, 盛帅, 周毅博, 等. 基于量测数据的风电场等效虚拟惯量评估方法[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1819-1827.
AN Jun, SHENG Shuai, ZHOU Yibo, et al. Evaluation of equivalent virtual inertia of wind farm based on measured data[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1819-1827.
- [47] 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.
- [48] 李东东, 张佳乐, 徐波, 等. 考虑频率分布特性的新能源电力系统等效惯量评估[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 2913-2921.
LI Dongdong, ZHANG Jiale, XU Bo, et al. Equivalent inertia assessment in renewable power system considering frequency distribution properties[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2913-2921.
- [49] 李世春, 薛臻瑶, 申鹭, 等. 常态下风电场并网惯量削弱量估计方法[J/OL]. 电力系统及其自动化学报. (2023-01-16)[2023-03-22]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001188>.
- [50] CAI G W, WANG B, YANG D Y, et al. Inertia estimation based on observed electromechanical oscillation response for power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4291-4299.
- [51] ZHANG J B, XU H C. Online identification of power system equivalent inertia constant[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(10): 8098-8107.
- [52] TAMRAKAR U, COPP D A, NGUYEN T A, et al. Real-time estimation of microgrid inertia and damping constant[J]. IEEE Access, 2021, 9: 114523-114534.
- [53] PHURAILATPAM C, RATHER Z H, BAHRANI B, et al. Measurement-based estimation of inertia in AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 1975-1984.
- [54] 赵波, 章德, 胡柳君, 等. 基于机电扰动传播特性的电网惯量分布辨识方法[J]. 电力建设, 2020, 41(8): 25-31.
ZHAO Bo, ZHANG De, HU Liujun, et al. Inertia-distribution estimation method based on characteristics of electromechanical disturbance propagation[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(8): 25-31.
- [55] 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.
- [56] LIU M Y, CHEN J R, MILANO F. On-line inertia estimation for synchronous and non-synchronous devices[J]. IEEE Tran-

- sactions on Power Systems, 2021, 36(3): 2693-2701.
- [57] TAN B D, ZHAO J B. Data-driven time-varying inertia estimation of inverter-based resources[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(2): 1795-1798.
- [58] ZHANG N Y, ZHU X Y, WANG D J, et al. Estimation and influencing factors analysis for equivalent inertia of wind turbines with active inertia support[C]//2022 7th Asia Conference on Power and Electrical Engineering(ACPEE). Hangzhou, China: IEEE, 2022: 1832-1837.
- [59] SCHIFFER J, ARISTIDOU P, ORTEGA R. Online estimation of power system inertia using dynamic regressor extension and mixing[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4993-5001.
- [60] 吴沛萱, 张欣然, 周晋航, 等. 基于类噪声信号的等值负荷惯量两阶段辨识方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(9): 57-63.
WU Peixuan, ZHANG Xinran, ZHOU Jinhang, et al. Ambient signal-based two-stage equivalent load inertia identification method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(9): 57-63.
- [61] DU P W, MATEVOSYAN J. Forecast system inertia condition and its impact to integrate more renewables[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1531-1533.
- [62] 巴文岚, 文云峰, 叶希, 等. 风电高渗透电网等效惯量概率预测方法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(3): 124-130, 165.
BA Wenlan, WEN Yunfeng, YE Xi, et al. Probability prediction method of equivalent inertia for high wind power penetration grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(3): 124-130, 165.
- [63] 汪正军, 高静方, 赵冰, 等. 基于风速预测的风电场虚拟惯量协调控制技术[J]. 太阳能学报, 2022, 43(10): 138-143.
WANG Zhengjun, GAO Jingfang, ZHAO Bing, et al. Wind farm virtual inertia coordinated control technology based on wind speed prediction[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(10): 138-143.
- [64] 肖友强, 林晓煌, 文云峰. 直流和新能源高渗透电网惯性水平多维度评估[J]. 电力建设, 2020, 41(5): 19-27.
XIAO Youqiang, LIN Xiaohuang, WEN Yunfeng. Multi-dimensional assessment of the inertia level of power systems with high penetration of HVDCs and renewables[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(5): 19-27.
- [65] PAIDI E S N R, MARZOOGHI H, YU J, et al. Development and validation of artificial neural network-based tools for forecasting of power system inertia with wind farms penetration[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(4): 4978-4989.
- [66] HEYLEN E, BROWELL J, TENG F. Probabilistic day-ahead inertia forecasting[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(5): 3738-3746.

作者简介:

贾焦心(1991—),男,讲师,博士,主要研究方向为虚拟同步机技术、新能源机组高低电压穿越和主动支撑控制(E-mail: jiajx33@163.com);
杨添淇(2000—),男,硕士研究生,主要研究方向为新能源发电并网与系统特性分析(E-mail: y.0916@qq.com);
颜湘武(1965—),男,教授,博士,主要研究方向为新能源电力系统分析与控制、现代电力变换(E-mail: xiangwuy@163.com);
张建坡(1973—),男,讲师,博士,主要研究方向为高压直流输电技术(E-mail: zhangjianpo@126.com)。

(编辑 王欣竹)

Research progress on equivalent inertia estimation of grid-connected power electronic devices

JIA Jiaoxin, YANG Tianqi, YAN Xiangwu, ZHANG Jianpo

(Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Microgrid of Hebei Province, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: A high proportion of new energy is connected to the grid by power electronic devices such as converters, which weakens the system inertia characteristic and enriches the sources of system inertia. In order to clarify the function and potential of inertia estimation in new power system, the research progress in the field of equivalent inertia estimation of grid-connected power electronic devices at home and abroad is reviewed, and the discussion and prospect are put forward. The connotation of equivalent inertia is briefly expounded from the perspective of energy sources, and according to power disturbance and frequency measurement, the research history of off-line inertia estimation is reviewed. By dividing two mainstream research ideas, the research results of inertia online estimation of grid-connected power electronic devices and new energy power system are sorted out. Finally, the future research directions in the field of inertia estimation of new energy power system are prospected.

Key words: inertia; equivalent inertia; inertia estimation; grid-connected power electronic devices; new energy power system

附录 A

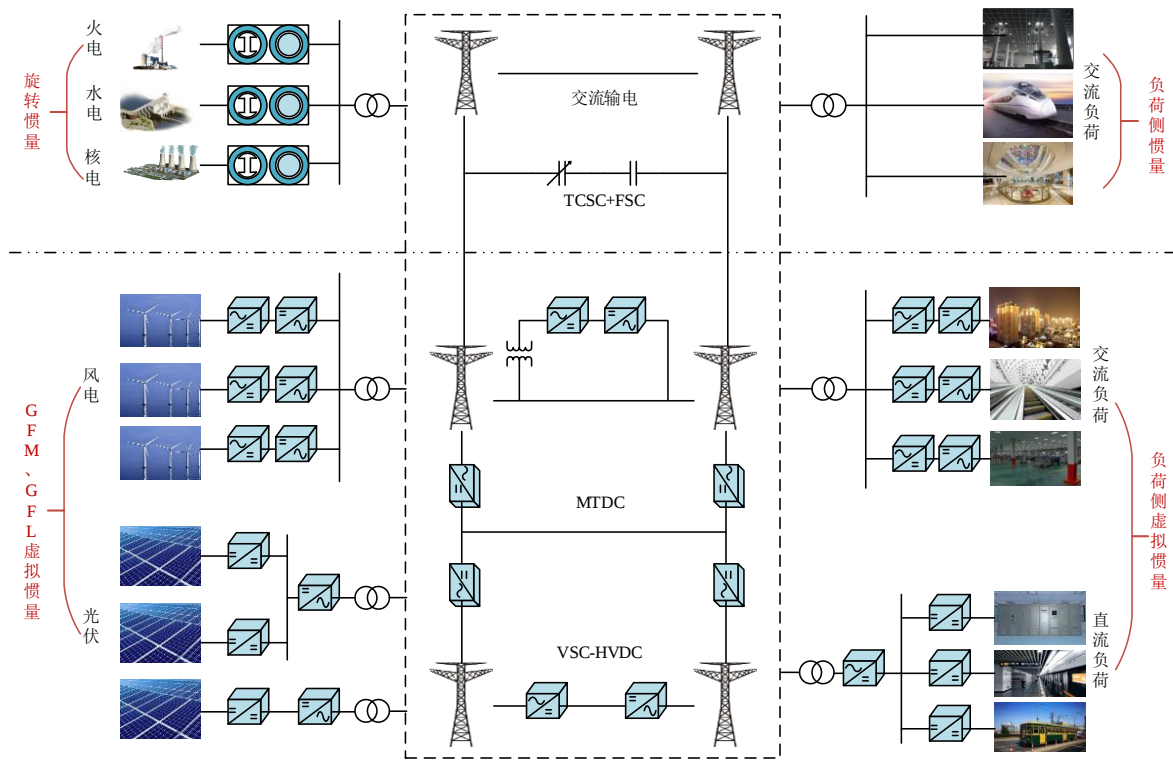


图 A1 新能源电力系统架构

Fig.A1 New energy power system architecture