

含高比例新能源的电力系统频率稳定研究综述

李国庆, 刘先超, 辛业春, 姜涛, 闫克非, 王拓

(现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林 132012)

摘要: 作为“双碳”战略目标的关键载体, 含高比例新能源的电力系统具有惯量水平低、调频能力差、抗扰性能力弱等特征, 对频率稳定带来了全新挑战, 迫切需要深入认识能源转型背景下的频率稳定形态。该文按照“建模分析—稳定评估—调频控制”的路线, 归纳近年来国内外关于频率稳定的研究及其应用进展。首先, 梳理现有频率稳定定义的特点, 将其引申为考虑暂态频率安全的广义频率稳定概念, 分析含高比例新能源电力系统的频率响应过程; 按照系统全局频率和网络节点频率两个视角分析现有特性建模与分析方法, 分别总结频率稳定性、频率安全性的评估方法与评估指标, 初步建立考虑频率时空分布特性的节点频率安全性指标; 列举并归类源网荷储多主体参与系统调频的控制策略, 分析相关频率调控措施的特点; 最后, 结合现有研究进展, 对含高比例新能源的电力系统在频率响应特性建模、频率稳定机理评估以及频率稳定协调控制方面的未来研究方向和研究趋势进行展望。

关键词: 电力系统; 新能源; 惯量; 频率稳定; 调频控制

Research on Frequency Stability of Power System with High Penetration Renewable Energy: A Review

LI Guoqing, LIU Xianchao, XIN Yechun, JIANG Tao, YAN Kefei, WANG Tuo

(Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology of Ministry of Education, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: As a key carrier of the “dual-carbon” strategic goal, the power system with high penetration renewable energy is characterized by low inertia level, poor frequency regulation capability, and weak disturbance immunity, bringing new challenges to frequency security and stability. It is urgently needed to understand the frequency stability patterns in the energy transition context. Following the sequence of “feature modeling, mechanism analysis, stability evaluation, and frequency control”, we provide a concise overview of recent international and domestic research and applications. Firstly, we sort out the characteristics of existing definitions of frequency stabilization and derive them into a generalized concept of frequency stabilization that takes into account transient frequency safety. We analyze the characteristic modeling methods from two viewpoints: system-wide frequency and network node frequency, and summarize the evaluation methods and criteria for assessing frequency stability, global frequency security, node frequency security, and nodal inertia security. Additionally, we outline the control strategies involving multiple entities encompassing generation, grid, load, and energy storage in system frequency control, focusing on the distinctive features of associated frequency control measures. Combining current research progress, we present the forward-looking insights into the future directions of frequency feature modeling, mechanism evaluation, and coordinated control for the power system with high penetration renewable energy.

Key words: power system; renewable energy; inertia; frequency stability; frequency control

0 引言

随着全世界能源短缺、资源紧张和环境污染加剧, 世界各国纷纷提出能源转型主张, 促进构建低碳能源系统^[1]。中国提出了“2030 碳达峰、2060 碳

中和”战略目标, 构建新型电力系统和新型能源体系是实现“双碳”目标的关键载体和必由之路^[2]。截止 2023 年 8 月底, 我国新能源装机容量达到 9 亿 kW, 其中风电、太阳能发电装机容量分别为 4 亿 kW 和 5 亿 kW, 占总电源容量的 32.6%^[3]。预计到 2060 年, 新能源装机总量达到 50 亿 kW, 渗透率超过 60%^[4]。由此可见, 我国正在加速形成含高比例新能源的电力系统。

基金资助项目: 国家自然科学基金(U2066208)。

Project supported by National Natural Science Foundation of China (U2066208).

然而，含高比例新能源的电力系统的频率稳定正面临严峻挑战。一方面，风光可再生能源发电存在随机性、波动性、间歇性强等特点，使得系统的有功功率平衡难度越来越大，据统计我国新能源日最大功率波动已超过 1 亿 kW，分钟级时间尺度的功率变化可以达到总装机容量的 1%左右；另一方面，含高比例新能源的电力系统惯量水平低、调频能力差、抗扰性弱，导致该特性的主要原因为：(1) 风光可再生能源等电力电子设备常采用跟网型控制方式，运行于最大功率跟踪(maximum power point tracking, MPPT)状态，不参与电网的频率耦合过程，对电网几乎不体现惯量响应，也无一次调频能力^[5]。(2) 电力电子设备的不当运行控制策略可能恶化系统的频率振荡模式，降低系统自身的致稳性，且电力电子设备的耐受能力(过压、过流、频率穿越)较差，频率扰动易导致其脱网，进而对系统的频率稳定性造成不利影响^[6]。近年来，频率稳定事故时有发生。2015 年 9 月 19 日，锦苏特高压直流发生双极闭锁，导致 0.41 Hz 的频率偏移，华东电网损失 3.55%的负荷^[7]；2016 年 9 月 28 日，极端天气下风电机组大规模脱网使得 48.36%新能源渗透率的南澳电网频率跌落至 47 Hz 以下，供电恢复时间长达 50 h^[8]；2019 年 8 月 9 日，因雷击引发分布式电源退出、频率变化率保护动作等连锁故障的英国电网发生大规模停电事故，事故造成英国包括伦敦等重要城市出现停电现象，损失负荷约 3.2%^[9]。诱发上述事件的直接原因不尽相同，但其内在原因主要与惯量水平低、调频备用不足等因素有关。

当前，国内外学者集中于新能源发电设备频率响应特性建模、系统频率稳定评估、新型频率控制等方面开展了相关研究，但仍存在以下几方面研究重点和难点：(1) 新能源发电单体容量小、总体数量大、机组型号多，其中主流的风电、光伏机组机型超 500 种，其运行特性、故障穿越能力较传统同步电源差异大^[10]，需建立兼顾海量异质化调频资源特性和求解效率的系统频率响应模型；(2) 由于地理位置上的自然资源禀赋差异，新能源发电集群与同步电源等异质化调频资源存在空间分布差异，使得系统受扰后系统的节点频率响应时空差异显著^[11]，需重新审视探究节点频率响应建模与稳定评估方法；(3) 面对系统的调频手段多样化和各设备调频能力差异化特征，需整合设计资源互补的调频控制策略。

综上，相比传统电力系统，含高比例新能源的

电力系统的频率稳定机理更加复杂，其频率稳定评估方法与控制措施亟待革新。为此，本文按照频率响应过程、频率响应建模及其分析方法、频率稳定评估及控制的研究路线，总结了近年来国内外学者的相关研究进展，研究框架如图 1 所示。首先梳理频率稳定的定义，分析含高比例新能源的电力系统的频率响应过程；按照全局频率-节点频率的路线介绍现有的频率响应特性建模方法，讨论并设计系统全局频率和节点频率两个方面的安全稳定评估指标；列举分析源网荷储设备在参与系统调频中的控制策略及其特点，根据已有研究成果讨论未来含高比例新能源的电力系统频率稳定分析、评估与控制的研究趋势并进行展望。

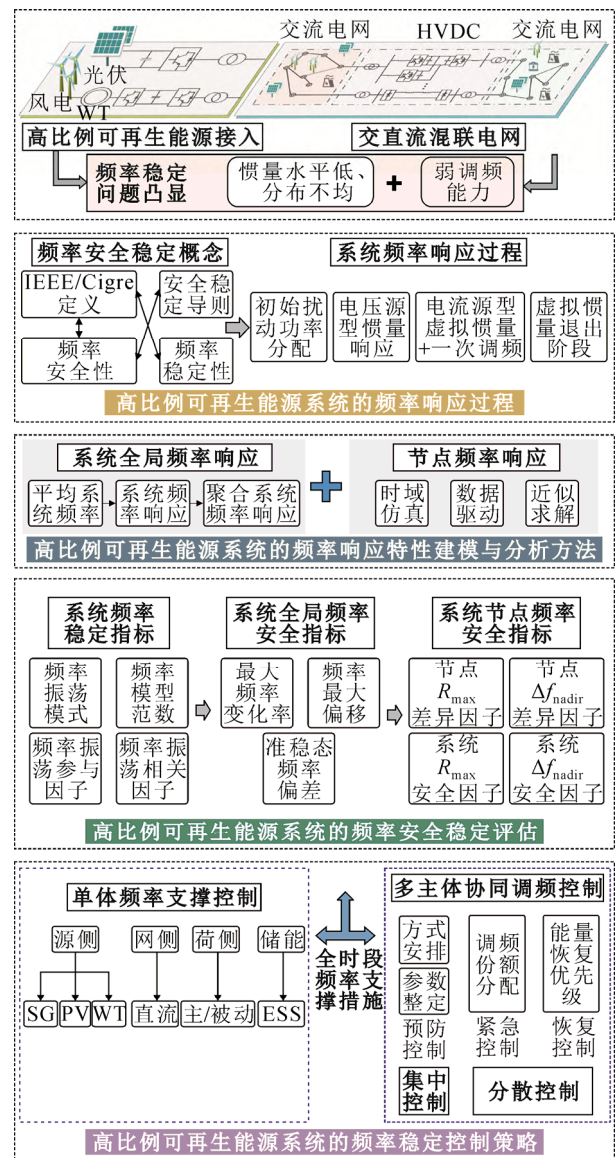


图 1 含高比例新能源的电力系统的频率稳定研究框架
Fig.1 Research framework of the frequency security and stability of power systems with high penetration renewable energy

1 频率稳定相关概念

1.1 频率稳定定义

频率是衡量电力系统电能质量的基本指标之一, 稳定分析中常采用交流信号(电压或电流)的相位变化率作为暂态频率^[12]。IEEE/CIGRE 工作组将频率稳定定义为: 电力系统在发生严重的系统故障导致发电和用电之间严重失衡后保持稳定频率的能力, 按照扰动所引起的频率响应时间跨度可进一步分为短期与长期频率稳定^[13]。我国《电力系统安全稳定导则》将频率稳定定义为: 电力系统受到小扰动或大扰动后, 系统频率能够保持或恢复到允许的范围, 不发生频率振荡或崩溃的能力。上述两种定义认为系统频率稳定应同时满足 2 个条件: (1) 系统受扰后存在频率准稳状态; (2) 准稳态频率满足人为设定要求。否则为系统频率失稳, 该定义侧重于准稳态频率判据。对于含高比例新能源的电力系统而言, 调频资源空间分布不均使得节点频率差异显著, 且电力电子设备的应力承受和故障穿越能力较同步电源差, 极易因频率变化率(R_{\max})和最大频率偏移(Δf_{nadir})保护动作脱网, 进而由节点暂态频率安全越限引发系统频率失稳。因此, 应将暂态频率安全性纳入电力系统的频率稳定性中, 考虑电力系统暂态频率安全的广义频率稳定定义(简称“频率稳定”)为: 电力系统发生扰动后, 系统的暂态频率始终能够保持在一定安全范围, 并恢复或过渡到新的满足运行约束的状态的能力。

1.2 频率响应过程

含高比例新能源的电力系统的有功功率-频率响应过程如图 2 所示, 考虑新能源发电设备主动频率支撑控制作用, 在传统电力系统的 3 阶段频率响应过程基础上扩展为初始时刻扰动功率分配、电压源型惯量响应、电流源型虚拟惯量与同步电源一次调频、电力电子设备调频退出与能量恢复 4 个阶段。

1) 扰动初期不平衡功率分配阶段

假设含高比例新能源的电力系统节点集合 $\Omega = \{i \in N | i \leq n\} = \Omega_V \cup \Omega_I \cup \Omega_D$, 其中 Ω_V 为电压源型节点集合, Ω_{Vr} 为电压源型电力电子设备节点集合, 且 $\Omega_{Vr} \subseteq \Omega_V$; Ω_I 为电流源型节点集合; Ω_D 为负荷节点集合; n 为系统节点数; N 为自然数集合。电网在出现扰动瞬间, 不平衡功率按照同步功率系数分配至各电压源设备, 进而产生不平衡转矩, 满足以下关系:

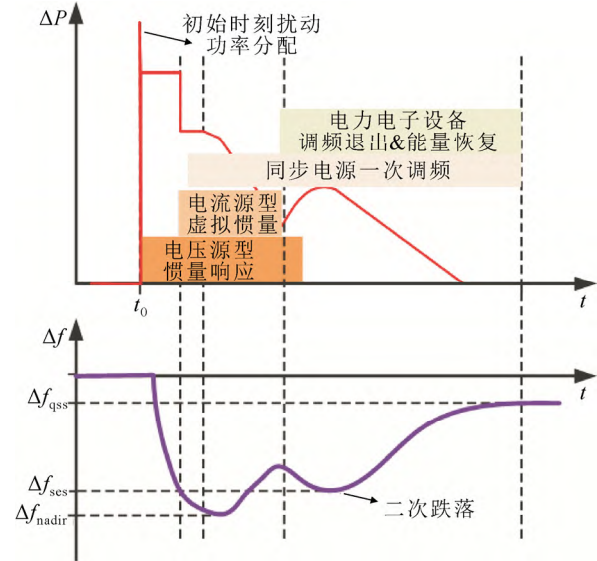


图 2 含高比例新能源的电力系统的功率-频率响应

Fig.2 Active power and frequency response of power system with high penetration renewable energy

$$\Delta P_{L_i}(0^+) = \left(K_{ik} / \left(\sum_{i=1}^n K_{ik} \right) \right) \Delta P_L, i \in \Omega_V \quad (1)$$

式中: ΔP_L 为节点 k 的负荷变化量即电网总的不平衡功率; $\Delta P_{L_i}(0^+)$ 为节点 i 的不平衡功率; K_{ik} 为节点 i 与扰动点 k 之间的同步功率系数, 电压源设备离扰动点越近, 所分担的不平衡功率就越大。

2) 电压源型惯量响应阶段

初始时刻的不平衡功率分配过程在一瞬间完成, 当不平衡功率分摊至电压源型设备时, 将阻碍不平衡功率带来的频率变化, 由转子摇摆方程描述为:

$$\begin{cases} 2H_i \frac{df_i}{dt} = -\Delta P_{L_i}(0^+) \\ f_i = \frac{d\theta_i}{dt} \end{cases}, i \in \Omega_V \quad (2)$$

式中: f_i 和 θ_i 分别为电压源型设备的频率(角速度)和电角度; H_i 为电压源设备的惯量系数, 惯量越大, 则电压源型设备保持原角速度状态的能力越强。

电压源型惯量响应的主要表现形式是通过吞吐转子动能来弥补功率缺额 $\Delta P_{L_i}(0^+)$, 故该阶段各设备按照惯量分配扰动功率为:

$$\Delta P_{L_i}(t) = \left(H_i / \sum_{i \in \Omega_V} H_i \right) \Delta P_L \quad (3)$$

3) 电流源型虚拟惯量与一次调频阶段

电流源虚拟惯量控制通常存在采集信号和控制方面的延时, 通过控制风光储设备的可调能量进

行短时功率支撑。同时，同步电源原动机开始调整机械功率参与系统一次调频。当电压源惯量功率、电流源虚拟惯量功率、一次调频功率之和与扰动功率相等时，系统频率达到最大偏移点 Δf_{nadir} 。

4) 电力电子设备调频退出&能量恢复阶段

电力电子设备的惯量支撑持续时间较短，在电流源型和电压源型虚拟惯量相继退出后，新能源设备将从电网吸收能量(以系统频率下降为例)并恢复至 MPPT 点，此时系统再次面临功率缺额，进而引发频率二次跌落，满足以下关系：

$$2H_{COI} \frac{df_{COI}}{dt} = \sum_{i \in \Omega_r - \Omega_{er}} \Delta P_{ei} - \sum_{i \in \Omega_r \cup \Omega} \Delta P_{ei} - \Delta P_L \quad (4)$$

式中： H_{COI} 为系统惯性中心的惯量； f_{COI} 为惯性中心的频率； $\sum_{i \in \Omega_r - \Omega_{er}} \Delta P_{ei}$ 为同步电源的调频功率； $\sum_{i \in \Omega_r \cup \Omega} \Delta P_{ei}$ 为新能源设备退出调频时的缺额功率。

在频率发生二次跌落阶段时，同步电源设备继续参与惯量阻拦和一次调频作用，以满足新能源的能量恢复需求。当新能源吸收能量并恢复至 MPPT 点时，系统恢复至准稳态，存在以下关系：

$$\Delta P_L = -(K_{vol} + K_{cur}) \Delta f_{qss} \quad (5)$$

式中： K_{vol} 为电压源型设备的单位调节功率系数； K_{cur} 为电流源型设备的单位调节功率系数； Δf_{qss} 为系统的准稳态频率偏差。

2 频率响应特性建模与分析方法

根据 1.2 节的频率响应过程可知，电力系统的频率变化特性主要与有功扰动幅度、调频单元物理参数、网络结构有关。以同步电源主导的系统中不同类型的同步发电机物理结构基本相似，其物理参数与装机容量基本成正比，不同区域电网的惯量与调频能力基本相当，采用全局频率响应模型可表征系统的频率响应特性。而含高比例新能源的电力系统中调频资源在响应性质与空间分布方面呈现显著差异，增大了节点频率的分散性，此时不仅需要关注系统全局的频率变化特性，还需要研究考虑调频资源空间分布影响的节点频率响应建模方法。

2.1 系统全局频率响应建模与分析方法

全局频率响应模型忽略网络特性对扰动分配过程的影响，保留影响有功-频率响应的关键环节，将所有的电压源型设备简化频率模型投影至假设的惯量中心(center of inertia, COI)上，以一台等值的惯量中心发电机来描述系统全局频率响应。COI 的

频率表示为：

$$f_{COI} = \frac{\sum_{i \in \Omega} H_i f_i}{\sum_{i \in \Omega} H_i} \quad (6)$$

基于系统惯量中心的假设，结合式(2)、(6)可得到 COI 的转子运动方程为：

$$\sum_{i \in \Omega} \left(2H_i \frac{df_i}{dt} \right) \approx \sum_{i \in \Omega} 2H_i \cdot \frac{df_{COI}}{dt} = P_m - P_e - \sum_{i \in \Omega} P_{Li} \quad (7)$$

式中： P_m 、 P_e 分别为系统的总机械功率和电磁功率。由式(1)、(3)、(8)可知，惯量中心成立前提是系统各电压源型设备的 R_{max} 相同，换言之，若扰动位置与电压源设备的电气几何均距刚好等于惯量均距，则可将系统视为一个惯量中心，除此之外惯量中心与系统全局的频率存在偏差，属于一种近似的表征方法。

在惯量中心假设成立前提下，典型的系统全局频率响应建模方法主要分为平均系统频率(average system frequency, ASF)和系统频率响应(system frequency response, SFR)模型以及在 ASF 和 SFR 基础上的融合模型等。ASF 模型将多机发电机转子等值作为一个质量块，建立保留调速器和集中负荷的等值转子频率响应模型，但多机系统下的 ASF 模型阶数较高，难以获得全局频率的解析解。P. M. Anderson 在 ASF 模型基础上将原动机调速器简化为一次调频-再热器一阶传递函数，并将负荷调频效应简化为线性，此时发电机组便降阶为二阶的 SFR 模型如图 3 所示^[4]。

图 3 中， T_{RH} 为再热环节时间常数， F_{HP} 为汽轮机高压缸功率比例系数， R 为调差系数， D 为系统阻尼系数， K 为与发电单元功率因数和旋转备用相关的系数。文献[15]通过容量加权聚合的方法将系统所有同步机组等值为一个聚合的 SFR 模型，此时通过解析可得到全局频率的时域解：

$$\Delta f_{COI}(t) = \frac{R \Delta P_L}{DR + 1} \left(1 + \alpha e^{-\zeta \omega_n t} \sin(\omega_n t + \varphi) \right) \quad (8)$$

式中：参数 α 、 φ 、 ω_n 和 ζ 的具体形式见文献[16]。

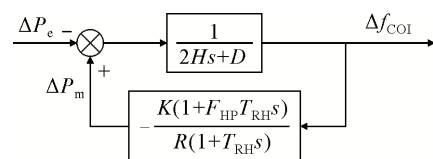


图 3 系统频率响应模型

Fig.3 System frequency response model

特别要指出的是, 电力电子设备的结构较同步机复杂, 目前其频率响应建模方法主要借鉴同步电源的 SFR 建模思路, 忽略快动态与非线性环节(如逆变器调制、限幅等), 将其小信号线性化为类 SFR 模型。文献[17]建立了考虑不同风速的风电小信号模型, 文献[18]建立了含虚拟惯量控制的风电小信号线性化模型, 文献[19-20]建立了含虚拟惯量控制的光伏单元小信号模型。实际上, 新能源设备模型的精细程度与频率响应精度强相关, 文献[21]指出双馈风电频率响应模型应考虑锁相环和转速环级联耦合效应, 文献[22]采用时频域分析方法发现转子电流环-转子磁链动态对双馈风电机组的功频响应精度存在影响。文献[23]采用劳斯近似法和 Pade 逼近法对新能源场站频率响应模型进行降阶。

在上述新能源频率响应模型基础上, 可按照容量加权聚合的方法建立含高比例新能源的电力系统的全局频率响应模型。文献[24]忽略新能源本体的弱调频特性, 仅保留附加频率控制单元建立了新能源电网的聚合频率响应模型; 文献[25]将附加频率控制的风电等效为一阶传递函数, 将构网型电压源换流器(voltage source converter, VSC)等效为转子运动方程, 基于加权平均法得到含构网设备的系统聚合 SFR 模型; 文献[26]针对多风速风电场, 按照风速相似度进行聚合, 构建了含多台等值机的系统扩展 SFR 模型。

从上述分析可知, 系统全局频率响应模型中的精度主要由高比例电力电子设备模型的简化程度决定, 而刻画影响频率响应的电力电子多控制环节间快慢交互动态是特性建模的关键点和难点。

2.2 节点频率响应建模与分析方法

节点频率响应分析的目的在于明晰系统的节点频率模态, 把握节点频率的时空变化规律。面向高维非线性动力学系统, 既可采用基于机理模型的时域仿真求解方法和基于黑箱模型的数据驱动分析方法, 也可以采用简化机理模型的近似求解方法。

1) 基于机理模型的时域仿真法

含高比例新能源的电力系统的节点频率响应本质上为异质化电源的机电暂态和网络能量分配的耦合过程, 因此时域仿真法将系统表示为微分-代数方程组, 以正常运行时的系统潮流作为初值, 通过数值积分方法求解获得网络各节点频率的数值解。目前业界较为常用的时域仿真软件包括 PSASP、BPA、PSS/E 和 DIGSILENT/PowerFactory。采用时

域仿真法可以准确地模拟系统受扰后的动态行为, 但只适用于对规模较小的系统做事前、离线计算。同时, 含高比例新能源的电力系统中电力电子非线性控制(如: 锁相环、换相失败、换流器闭锁等)也会影响节点频率响应, 需要建立考虑电力电子电磁暂态过程的机电-电磁混合仿真模型以满足精度需求。

2) 基于黑箱模型的数据驱动方法

基于黑箱模型的数据驱动方法充分挖掘电网节点间的静动态依存关系, 通过学习算法从海量数据中构建节点频率与多因素之间的映射关系和关联特征^[27]。其主要流程是: 首先对采集的时域仿真数据或者真实历史数据进行特征提取和模型构建以代替基于物理机理知识的建模工作, 然后通过少量实测数据即可快速预测网络中各节点频率的未来变化趋势, 以此达到在线态势安全评估目的^[28]。数据驱动在表征海量场景下节点频率与扰动信息、运行方式以及电力电子控制方式的关联关系方面具有优势。目前, 已有研究将深度置信网络^[29]、度量学习^[30]、改进堆栈降噪自动编码器^[31]、轻量梯度提升机^[32]、深度残差收缩网络^[33]和神经网络^[34]等算法应用于电力系统节点频率响应分析。文献[35]总结了深度学习在频率分析与控制中的研究进展, 认为大数据的深度学习方法在未来电力系统复杂频率时空特性和频率安全态势感知研究方面具有极大潜力。但数据驱动所训练的模型精度依赖于数据集的规模和广泛真实的频率事件数据, 可能发生小概率误判进而导致更严重的连锁事故, 并且存在可解释性差等缺陷, 因此目前只应用于电网的辅助决策中。

3) 近似求解方法

近似求解方法的核心为: 根据 1.2 节思路计算各发电单元的等效角频率, 然后忽略网络阻抗、电感电流以及电容电压变化, 采用节点电压代数方程代替网络微分方程, 表征节点-电源之间的频率影响关系。F. Milano 学者提出了分频器理论的节点频率表征方法^[36], 该方法利用节点电压方程中各节点电压的相位导数变化构建网络节点频率与同步电源转子转速之间的关系为:

$$\omega_B = 1 - \left((B_{BB} + B_{B0})^{-1} B_{BG} \right) (\omega_G - 1) \quad (9)$$

式中: ω_B 、 ω_G 分别为网络节点频率列向量和电压源内电势节点频率列向量; B_{BG} 为网络-电压源内电势节点电纳矩阵; B_{BB} 为网络节点电纳矩阵; B_{B0} 为电压源内电势节点电纳矩阵。

由式(10)可知,分频器理论只需通过同步相量测量单元(phasor measurement unit, PMU)获得系统中各电压源设备的频率信息便可计算节点频率。考虑电网中PMU单元的有限性,文献[37]设计了基于分布式分频器的含虚拟惯量双馈风电系统频率时空特性分析方法,但电力电子设备电磁暂态造成的相位突变可能导致误差较大。为此,文献[38]提出一种基于重心的频率时空估算方法,通过推导系统质心频率-惯量中心频率和惯量中心频率-节点频率的灵敏度关系,根据质心频率变化数据计算网络节点的频率变化。上述研究建立了发电单元与网络节点频率的近似关联关系,而多机系统发电单元的频率响应是求解节点频率的前提,文献[39-40]将原动机调速器与同步机转子解耦,推导了两机和三机等值系统的降阶频率时空模型;文献[41]采用二阶结构近似各发电单元的频率模型,基于二次特征值分析方法得到各节点频率响应的共模频率与差模频率分量;文献[42]基于模态分析方法来估计系统在惯性响应阶段各发电机的转子转速。简化网络方程的近似求解精度大多情况可以接受,但如何计算系统中多样化电压源构网型发电单元的角频率模态是后续关注重点。

将上述3类节点频率分析方法的特点列于表1中,已有文献主要针对传统电力系统的频率时空分布特征开展了一些研究,鲜有关于含高比例新能源的系统频率时空特性分析的报道,如何反映支撑型电力电子设备与同步电源的响应差异对节点频率的影响,值得进一步深入研究。

3 频率稳定评估

系统频率稳定评估主要包含频率稳定性和频率安全性2个方面。频率稳定性主要关注系统受扰后各节点准稳态频率的敛散性,而频率安全性主要取决于人为设置的 R_{\max} 、 Δf_{nadir} 门槛和允许范围。针对确定的系统,前者评估结果是唯一的,而后的评估结果和安全裕度由系统调频性能和设备自身安全约束共同决定。

3.1 频率稳定性评估

频率稳定性本质上是系统保持有功功率平衡和频率相对平稳的能力,取决于系统物理本身的致稳属性。在系统受扰后,网络各节点频率围绕惯量中心频率变化最终达到相同的频率响应形态(平稳或者发散)。目前频率稳定问题的限定研究场景仍假

表1 节点频率响应分析方法特点对比

方法	模型特点	模型复杂度	适用场景	前提假设	求解精度	求解效率	可解释性
时域仿真法	详细全阶模型	阶数高、复杂	小规模系统	无	高	慢,不适用于在线	强
数据驱动法	数据特征模型	阶数低、较复杂	不限规模	无	取决于训练数据	快,适用于在线	差
近似求解法	简化模型	较简单	较大规模系统	小扰动	较高	较快	强

设扰动发生后电网电压幅值几乎不变,即属于小扰动稳定研究范畴。根据李雅普诺夫间接法,频率稳定性的主要分析方法是将非线性自治动力系统在平衡点处小扰动线性化,建立系统的状态空间方程,从系统的模式和模态信息中判断系统平衡点邻域的性质。对于任意一个自治系统的状态方程为:

$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B} \Delta \mathbf{u} \\ \Delta \mathbf{y} = \mathbf{C} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{D} \Delta \mathbf{u} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\Delta \mathbf{x}$ 、 $\Delta \mathbf{u}$ 和 $\Delta \mathbf{y}$ 分别为状态变量、输入变量和输出变量的增量向量; \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{D} 分别为系统矩阵、输入矩阵、输出矩阵、直接传递矩阵。

通过求解式(10)的特征根便可获知系统的稳定性充要条件为:即所有特征根均位于复平面左半平面。进一步,采用根轨迹法^[43]和灵敏度法^[44]可确定系统的频率稳定性及其影响因素。文献[45]采用特征值法发现风电接入重载弱电网时易引发锁相环振荡和频率失稳,文献[46]指出跟网型逆变器在极高渗透率(>75%)下会诱发频率小扰动失稳,文献[47]基于参与因子分析发现虚拟惯量增大、有功调频系数减小会降低虚拟同步机并联系统的频率稳定性。状态空间分析法缺乏系统动态过程物理化的一般认识,且多样化电力电子设备结构差异较大,导致上述电力电子设备对系统频率稳定性影响的结论存在场景局限性、普适性和通用性。为此,文献[48]提出适用于电力电子化电力系统小扰动分析的幅相动力学模型,该模型在状态空间方程基础上建立设备不平衡功率与内部相位之间的关系,转化为具有物理意义的一般“转子质块”结构形式。文献[49]建立了风电联网系统的幅相动力学模型,文献[50]建立了含构网逆变器的弱电网幅相运动方程,并通过判断 $\partial(df/dt)/\partial f$ 的符号表征 R_{\max} 、 Δf_{nadir} 与频率振荡稳定性之间的关系。

在频率稳定性评估指标方面, 除上述影响小扰动的频率振荡模式、模态等指标外, 文献[51]定义了频率相关比等指标量化两者与系统频率振荡模式的相关性。文献[52]提出基于 H_2 与 H_∞ 范数的动态频率抗扰性能量化指标, 文献[53-54]采用灵敏度 H_∞ 来描述虚拟同步机对频率动态性能的影响。

总体上, 现有研究对频率振荡稳定性的认识尚显不足, 主要是大多研究将频率振荡现象归结为功角稳定范畴, 实际上引发频率振荡的内在原因不一定是发电机转子间相对振荡, 可能是所有发电机转速同调变化, 并且文献[55]发现功角振荡模式与频率振荡模式在一定条件下会相互转化, 因此需要重新审视电力电子设备对系统多类型振荡模式的影响, 追溯频率振荡现象的成因。

3.2 频率安全性评估

频率安全性主要指受扰后频率的动态变化是否满足用户和设备对电网频率的设定要求。因此, 可采用时域仿真法、数据驱动法以及近似求解法计算得到系统的总体频率响应和节点频率响应, 然后判断频率变化特征是否在可接受范围之内。按照第2章所述应分为两方面评价指标: 全局频率安全指标和节点频率安全指标。

1) 全局频率安全指标

系统全局频率安全指标忽略网络特性的影响, 从惯量中心的频率变化角度关注以下评价指标:

①最大频率变化率^[56]

$$R_{\max} = -\frac{\Delta P_L f_0}{2H_{\text{COI}}} \quad (11)$$

式中: f_0 为系统的标称频率。

②频率最大偏移量 Δf_{nadir} 与频率最大偏移量时间 t_{nadir}

$$\begin{cases} \Delta f_{\text{nadir}} = -\frac{R\Delta P_L}{DR+1} \left(1 + \sqrt{1-\xi^2} \alpha e^{-\xi\omega_n t_{\text{nadir}}} \right) \\ t_{\text{nadir}} = \frac{1}{\omega_n} \tan^{-1} \left(\frac{\omega_n T_R}{\xi\omega_n T_R - 1} \right) \end{cases} \quad (12)$$

③频率准稳态偏差 Δf_{qss}

$$\Delta f_{\text{qss}} = -\frac{\Delta P_L}{D+1/R} \quad (13)$$

目前, 世界各国纷纷设置了相关的全局频率安全警戒值, 相关统计如表2所示^[57-63]。

结合上述的常见指标, 文献[64]提出基于暂态频率偏移门槛和偏移持续时间的二元表评估指标, 文献[65]进一步设计了频率偏移累积面积的评估指

表2 全局频率安全指标警戒值统计

国家	R_{\max} 警戒值 /(Hz·s ⁻¹)	Δf_{nadir} 警戒值 /Hz	Δf_{qss} 警戒值 /Hz	设备穿越值 /Hz
爱尔兰 ^[57]	0.5→1	-2.5/+2	±0.5	-2.5/+2
芬兰 ^[58]	2	±1	±0.1	-2.5/+1.5
英国 ^[59]	0.125→1	-0.8~-0.5, 0.5~0.8	±0.5	-2.5/+2
美国 ^[60]	—	0.42 ^E , 0.28 ^W , 0.405 ^{ERC} , 0.974 ^{HQ}	±0.036	-1.5/+1
澳大利亚 ^[61]	1~3	-2.5/+2	±1	-2.5/+2
中国 ^[62-63]	—	-3.5/+1.5	-0.5~-0.2, 0.2~0.5	-3.5/+1.5

注: 上标 E、W、ERC 和 HQ 分别为美国的东部、西部、得克萨斯州和佐治亚州总部地区电网。

标; 北欧电力系统采用相关性方法分析表明: 频率标准差、频率面积、频率越限次数和 R_{\max} 标准差 4 个指标可全面衡量频率的安全性^[66]; 文献[67]引入频率跌落坡度系数量化频率变化率的平均值, 将单位阶跃扰动下 Δf_{nadir} 的倒数作为频率深度系数指标; 文献[68]考虑新能源虚拟惯量退出导致的频率二次跌落问题, 定义了频率二次跌落最大偏移量指标。

2) 节点频率安全指标

结合节点所连接设备的频率耐受能力和 2.2 节节点频率计算结果可建立节点频率分布差异指标和节点频率安全指标。

①节点频率时空差异指标^[69]

考虑网络和电源差异的节点频率在频率变化率和最大频率偏移方面存在时空差异, 建立节点频率变化率和最大频率偏移差异指标为:

$$\begin{cases} D_{R_{\max}} = \sqrt{\frac{\sum_{i \in \Omega} d_{R_{\max},i}^2}{n\Delta P_L}} \\ D_{\text{nadir}} = \sqrt{\frac{\sum_{i \in \Omega} d_{\text{nadir},i}^2}{n\Delta P_L}} \\ d_{R_{\max},i} = \left| \frac{R_{\max,i} - R_{\max,\text{COI}}}{R_{\max,\text{COI}}} \right| \\ d_{\text{nadir},i} = \left| \frac{\Delta f_{\text{nadir},i} - \Delta f_{\text{nadir},\text{COI}}}{\Delta f_{\text{nadir},\text{COI}}} \right| \end{cases}, i \in \Omega \quad (14)$$

式中: $d_{R_{\max},i}$ 与 $d_{\text{nadir},i}$ 分别为节点 i 的最大频率变化率差异因子、频率最大偏移差异因子, 表征节点频率与惯量中心频率的差异性; $D_{R_{\max}}$ 与 D_{nadir} 分别为系统最大频率变化率差异因子与系统频率最大偏移差异因子, 表征单位功率扰动下系统频率响应时空特征的显著程度。

②节点频率安全指标

$$\begin{cases} S_{R_{\max}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i \in \Omega} S_{R_{\max},i}^2} \\ S_{nadir} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i \in \Omega} S_{nadir,i}^2} \\ S_{R_{\max},i} = \left| \frac{R_{\max,i}}{R_{\lim,i}} \right| \\ S_{nadir,i} = \left| \frac{\Delta f_{nadir,i}}{\Delta f_{nadir,\lim,i}} \right| \end{cases}, i \in \Omega \quad (15)$$

式中： $S_{R_{\max},i}$ 与 $S_{nadir,i}$ 分别为节点*i*的最大频率变化率安全因子和节点频率最大偏移差异安全因子，表征设备的频率穿越安全性； $S_{R_{\max}}$ 和 S_{nadir} 分别为系统最大频率变化率安全因子和系统频率最大偏移安全因子，表征考虑频率时空差异的系统安全性。实际上，国家已出台相关标准，规定了电网接入设备的频率穿越性能要求^[70]。若 $S_{R_{\max},i}$ 、 $S_{nadir,i} > 1$ 且超过可容许持续时间，则认为设备频率穿越失败进而退出运行，扩大故障影响程度。

在含4台等值风电机的IEEE-39测试系统中(如图4所示)分析上述所建频率安全性评估指标。

设置节点17发生5.8%负荷扰动，新能源节点和其他节点分别采用±0.25 Hz/s和±0.5 Hz/s作为频率变化率安全警戒值，所有节点频率最大偏移安全警戒值为±0.5 Hz，计算系统全局频率安全指标见表3。

由表3可知，系统全局频率的3个安全均未超限，从该角度判定为全局暂态频率安全。结合时域仿真数据和COI频率可计算得到节点频率差异因子和频率安全因子计算结果如图5所示。

由图5(a)可知，节点频率变化率时空差异大，最大偏移点差异较小；由图5(b)可知，扰动节点18和新能源节点34、37的 R_{\max} 安全越限，新能源节点32的 R_{\max} 濒临越限，最大偏移安全裕度均适中。结合图5的节点频率指标可计算得到系统整体的节点频率安全指标，如表4所示。

由表4可看出，系统扰动初期频率时空差异特征显著，这主要是由于区域1和2间的惯量资源倾斜分布导致，频率安全因子指标均小于1，整体频率安全裕度适中，但出现局部节点频率安全越限。

4 频率稳定控制策略

目前，含高比例新能源的电力系统惯量水平和

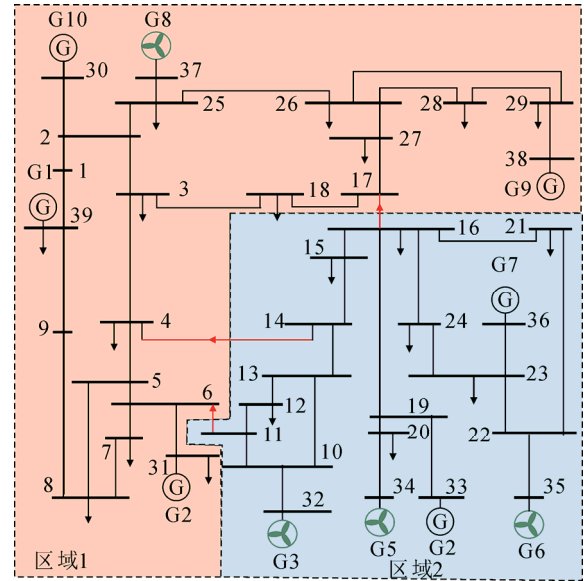


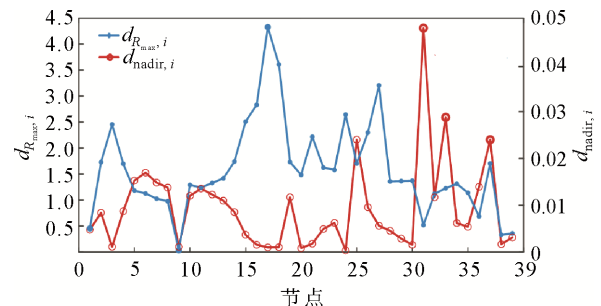
图4 含风电的 IEEE-39 测试系统

Fig.4 IEEE-39 test system with wind power

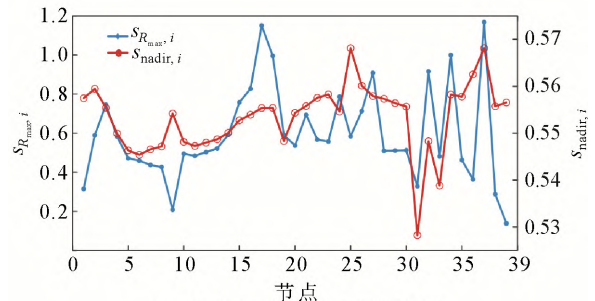
表3 全局频率安全指标计算结果

Table 3 Calculation results of global frequency security indicators

指标	$R_{\max}/(\text{Hz} \cdot \text{s}^{-1})$	$\Delta f_{nadir}/\text{Hz}$	$\Delta f_{qss}/\text{Hz}$
取值	-0.108	-0.277	-0.236



(a) 节点频率时空差异评估结果



(b) 节点频率安全评估结果

图5 节点频率安全性评估结果

Fig.5 Results of the node frequency security assessment

调频容量不足，以同步电源反馈调频与负荷投切的传统控制方法已远不能满足系统的调频需求，需充

分挖掘多样化设备的调频潜能, 设计潜在的源网荷储设备主动频率支撑策略, 图 6 概括了现有设备参与调频的控制手段及其特点。

4.1 电源侧调频控制策略

1) 同步电源调频控制

以火电、水电为代表的同步电源机组惯量与一次调频能力较新能源大、技术成熟且可操作性强, 是参与系统调频的核心角色。因此, 针对不同规模的同步电源运行状态, 设计其调频参数与调频死区、做好不同时间尺度的调频分工至关重要。文献[71]分析了火电机组调差系数对系统频率稳定性的影响, 基于分频原理设计了控制一次调频控制参数动态优化方法。文献[72-73]定义了水电机组调频优先时序, 设计了切机延时系数和频率放大系数整定方法; 文献[74]根据火电机组惯性作用、一次调频、二次调频的不同响应时间尺度, 设计了多尺度形态学滤波方法的分频段调频控制。

2) 新能源发电调频控制

风电、光伏等新能源发电设备主要依靠电力电子控制, 从而实现主动频率支撑, 主动支撑类型主要分为两类: 功率备用控制和虚拟惯量控制。

功率备用控制在扰动前采用风电机组的变转速控制或变桨距角控制和光伏发电单元逆变器直流电压控制实现主动减载。当电网出现频率跌落时, 新能源机组便可释放备用功率参与电网快速调频。实际上, 预留备用控制会影响新能源机组的服役寿命(如风电疲劳载荷、光伏电容质量), 降低新能源消纳的经济性, 一些文献采用滑膜自适应跟踪^[75]、分区风速备用控制^[76]克服以上难题。

虚拟惯量控制按其对电网体现的频率响应性质可分为电流源型虚拟惯量和电压源型虚拟惯量 2 种。电流源型虚拟惯量的控制思路主要是将系统的频率变化率和频率变化量作为新能源功率控制环的输入变量, 采用比例-微分控制得到新能源设备的附加有功功率出力变化参考值^[77], 其表达式为:

$$\Delta P_{cur} = -\frac{k_d df}{dt} - k_p \Delta f \quad (16)$$

式中: ΔP_{cur} 为电流源型虚拟惯量附加功率变化量; k_d 为虚拟惯量系数; k_p 为一次调频系数。

电压源型虚拟惯量控制以虚拟同步机、下垂控制为核心技术, 直接将转子运动方程替代锁相环节作为新能源的参考相角, 使其具备电压源构建电压幅值和相位的能力, 其控制原理如图 7 所示。

表 4 节点频率安全指标

Table 4 Nodal frequency security index

指标	$D_{R_{max}}$	D_{nadir}	$S_{R_{max}}$	S_{nadir}
取值	7.542	0.055	0.639	0.553

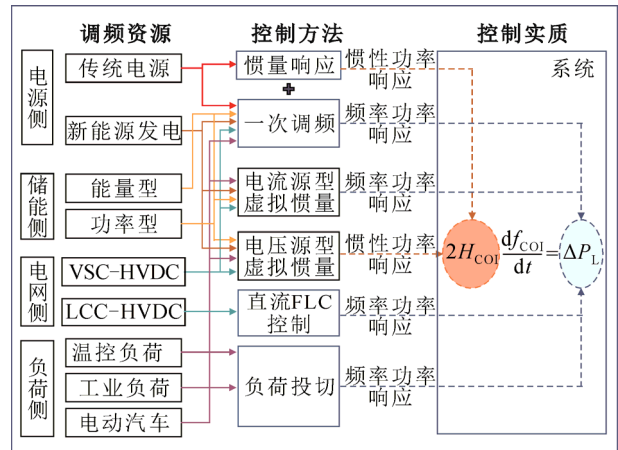


图 6 多类型设备的调频控制方法

Fig.6 Frequency control methods of multi-types equipment

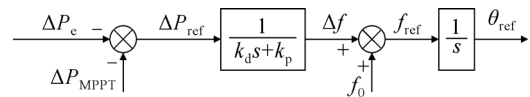


图 7 典型电压源型虚拟惯量控制原理

Fig.7 Voltage source type virtual inertia control principle

对比电流源型与电压源型虚拟惯量控制的特点可知, 两者均需要参与调频的能量来源, 如风电机组的转子动能、光伏逆变器电容的能量等, 在调频时短时调用蕴藏在电源中的能量以阻碍频率的变化, 从而达到参与电网调频目的。从两种控制下新能源所表现的外特性来看, 电流源型虚拟惯量控制的频率信号采集处理存在时延, 且与同步机的惯量响应过程相反, 故属于快速功率响应的范畴; 电压源型虚拟惯量控制的惯量响应特性属于自激发性质, 与同步电源的惯量响应性质类似, 但由于电压源型虚拟惯量设备可调能量较小, 所以其惯量可持续时间较同步电源短^[78]。

此外, 虚拟惯量控制的设计需要考虑新能源机组调频能力差异、变流器的应力安全约束以及对系统自身稳定性的影响等, 尤其在虚拟惯量设备退出调频后将 从电网吸收能量恢复至 MPPT 运行点, 容易导致二次跌落。目前抑制频率二次跌落的主要方法有 3 类: (1)改进退出调频后的能量恢复路径, 如文献[79]借助转矩限制直线来控制风电转子转速的

恢复轨迹, 文献[80]通过设计风电机组时序退出策略抑制二次跌落。(2)整定虚拟惯量控制参数, 优化新能源全阶段调频的“能量吞吐”过程, 文献[81]设计了基于方波惯量的调频路径, 文献[82]设计了非线性变惯量-下垂系数的虚拟惯量控制。(3)借助新能源侧储能的双向功率调节能力, 通过设计快速调频控制^[83]、整定风储或光储调频系数^[84-85]以削减虚拟惯量退出时的透支能量缺额。

4.2 电网侧主动频率支撑控制

大规模新能源通常通过以电力电子器件为核心的传统高压直流(LCC-HVDC)和柔性直流(VSC-HVDC)实现远距离、大容量传输和消纳, 直流输电换流器具备功率柔性调控和过负荷运行能力, 使得电网侧主动频率支撑成为可能。

1) LCC-HVDC 频率控制

LCC-HVDC 常用的参与调频控制方法是采用直流频率限制器(frequency limit controller, FLC)分配直流系统的输电功率, 以削弱系统中存在的短时不平衡功率^[86]。当系统频率偏差超过直流 FLC 的启动死区时, 直流 FLC 通过比例积分控制得到非故障 LCC 换流站附加功率转带指令, 减小发生扰动后造成的电网的功率不平衡量, 从而达到快速参与调频的目的。文献[87]发现 FLC 对中国南方电网的调频作用显著; 文献[88]考虑大功率和连续负荷扰动 2 种运行工况, 设计直流 FLC 参数优化设计方法; 文献[89]基于 R_{\max} 和 Δf_{nadir} 整定 FLC 的死区参数。

2) VSC-HVDC 频率控制

VSC-HVDC 的频率控制主要分为电流源型虚拟惯量、电压源型虚拟惯量和直流电网功率分配 3 类的频率控制方法^[90]。(1)电流源型虚拟惯量控制的控制原理与新能源基本相同, 采用频率比例微分控制计算功率调整量, 其能量来源主要是直流电网电压或者其他异步交流系统, 故在设计控制参数时需关注异步交流系统安全^[91]和直流电压安全^[92], 设计考虑多种扰动影响的鲁棒控制参数^[93]。(2)电压源型虚拟惯量分为下垂控制^[94]、功率同步控制^[95]和虚拟同步机控制^[96]。下垂控制将直流电容作为惯量源, 类比建立电容电压的运动方程, 通过电容电压与电网频率的能量对偶关系实现下垂控制。功率同步控制和虚拟同步机控制的思路是分别从同步响应和同步发电机频率响应的等效环节代替锁相环, 建立 VSC 的相位。(3)直流电网功率分配的控制思路是按照某种原则合理分配多端 VSC 注入功率来缓解交

流系统的不平衡功率, 减缓频率跌落程度。文献[97]考虑异步互联区域调频成本设计了多端 VSC-HVDC 功率分配额; 文献[98]构建了直流电网节点注入功率与交流电网频率之间的灵敏度关系, 采用模型预测控制优化 VSC 的功率; 文献[99]以发电成本、调频成本和 VSC 损耗为优化目标, 设计 VSC 的自适应下垂系数。

4.3 负荷侧主动频率支撑控制

传统被动负荷如温控^[100]、照明^[101]、工业^[102]等可中断负荷的频率响应能力远小于同步电源, 故通过多轮次负荷投切来参与电网第三道防线的频率调控^[103]。随着大量电动汽车等可换流器接口的主动负荷快速发展, 其调频潜能逐渐受到广泛关注^[104]。一些学者研究了电动汽车参与电网一次调频的控制方法, 如文献[105]考虑电动汽车容量差异, 设计基于模型预测控制的集群电动汽车多模式一次调频策略, 文献[106]采用启发式方法优化电动汽车参与一次频率调节市场, 使电动汽车车主的收益最大化。

近年来, 有文献深入研究了电动汽车参与电网调频的惯量控制方法, 文献[107]提出构网型负荷的概念, 文献[108]采用虚拟同步机技术使得电动汽车具有与同步发电机类似的惯量和一次调频特性, 文献[109]针对车联网系统设计了一种基于自适应模糊增益的比例-微分-积分控制器, 以提高调频鲁棒性。实际上, 多样化负荷在响应能力和响应速度上存在很大差异, 因此有必要考虑这一因素来设计分配主被动负荷的调频任务^[110], 从而达到更好的系统频率控制效果。

4.4 储能频率控制

储能主要分为能量型和功率型储能 2 类, 以抽水蓄能电站、压缩空气储能为代表的能量型储能能量密度大, 通常用于调峰任务; 以电化学储能为代表的功率型储能通过变流器与电网连接, 因此可以类比新能源和 VSC 设计一次调频^[111]和虚拟惯量控制策略^[112]。文献[113]设计了短路故障场景下储能参与一次调频方法, 文献[114]根据功率扰动、新能源渗透率与频率变化之间的关系, 提出储能虚拟惯量控制的参数整定方法和容量优化配置方法。

事实上, 新型储能的投资和运行成本是制约其调频能力的关键因素, 文献[115]梳理了世界各国关于储能提供调频服务的相关标准, 文献[116]设计了英国输电运营商中关于储能辅助调频服务最大化盈利的调度方法; 文献[117]在保证调频需求的前提

下, 基于在线凸优化理论设计了储能系统分布式调频控制方法; 文献[118]计及频率调节性能、电池老化成本和电荷状态, 提出了电池储能系统参与时前辅助一次和二次调频服务市场的最优竞价策略。

4.5 异质化调频手段的工程应用与技术经济性

目前, 以风光荷储为代表的多样化新型调频手段在全世界范围内已开展一些工程应用。2017年, 南澳大利亚电网扩容 150 MW 构网型储能用于提供惯量响应、一次和二次调频支撑, 并安装 30 MW 电压源型构网储能用于南澳约克半岛孤网的主动惯量支撑^[119-120]。2020年, 英国苏格兰电力可再生能源公司采用 69 MW 基于虚拟同步机技术的风电场完成黑启动测试^[121]。在我国, 张北风光储示范电站建成采用虚拟同步发电机技术的新能源电站共 150 MW^[122], 并且在配电网及微电网领域里也有示范应用, 如天津中新营业厅光储荷微网项目、诸暨市兆山电器屋顶光伏项目以及重庆巫溪光伏项目等实际工程应用^[123]。由此看出新型调频技术目前处于初步示范应用状态, 应用规模不大。

多样化异质设备参与调频的技术经济性主要考量设备的建设投资成本、运行成本以及调频辅助服务成本等指标。风光荷储等新型调频设备在建设投资成本、运行成本方面差异较大, 故在投资回报收益约束下直接影响了其辅助调频服务成本。目前, 一些欧美国家已经开展了电流源型与电压源型设备的惯量、快速频率响应以及一次调频服务^[119], 我国相关市场机制正处于初步发展阶段, 如何打好多样化调频设备的“组合拳”, 更大限度激发设备参与辅助调频服务的积极性, 实现多方位收益最大化, 是未来需要关注和解决的问题。

5 未来研究趋势与展望

国内外学术界已在频率响应特性建模、频率稳定机理分析与评估方法、频率控制技术研究方面取得了一定的进展, 但总体上对含高比例新能源的电力系统频率稳定的认识不够深入、全面, 在频率稳定评估方面处于初步研究阶段, 相关的分析理论体系不够完整。针对现有研究成果的特点与不足, 给出 3 个方面的研究建议。

5.1 兼顾精度与工程实用化的通用频率响应特性建模方法

多样化的异质化调频资源的结构和参数差异化明显、时间尺度跨度大, 尤其电力电子设备的控

制环节复杂、阶数高、非线性强, 对系统的频率响应特性建模的可扩展性带来了重大挑战。对于系统全局频率响应模型, 以集中质量块的 SFR 建模方法为主框架, 采用数据驱动或回归方法, 近似描述电力电子设备的统一频率响应模型, 降低建模的复杂度和求解难度。对于节点的频率响应模型, 建立数据-物理融合的频率响应模型; 结合系统全局频率响应模型, 采用数据驱动的人工智能方法划分频率响应模式区域, 辨识系统的惯量中心位置和区域惯量中心位置; 基于网络节点导纳方程和动态等值方法, 建立系统全局-区域、区域-节点之间的频率灵敏度关系, 以此构建数据物理融合的节点频率相依模型, 借助系统惯量中心的 PMU 量测数据便可计算获得节点频率响应。

5.2 统筹整体与局部频率稳定的评估方法

系统的频率稳定性与元件运行工况、控制参数、控制间交互耦合紧密程度等多因素有关。现有研究主要将研究重点聚焦于暂态频率安全性方面, 系统的频率安全性要结合频率时空特性和异质化调频设备的频率穿越要求, 设计兼顾全局频率安全与节点频率安全的多维综合评估指标。

目前对频率稳定性态势评估的认识较少, 电压源型和电流源型控制的引入对系统频率稳定性影响机理尚不清晰。总体上, 可借鉴时域/稳定分析方法建立含多类型电力电子设备的系统状态空间模型或幅相动力学方程, 通过模式与模态分析方法评估参数对系统的频率振荡模式的影响, 筛选频率振荡因子的主导特征参数。同时, 对于大规模电力系统可能存在状态空间阶数高、求解慢、易奇异等特点, 可采用借鉴现在人工智能、云计算的新技术数据实时感知系统的频率振荡模式。

5.3 集中-分散结合的全过程多主体协同控制方法

在系统层面, 考虑到调频资源的空间分散性、支撑能力差异、支撑代价差异、系统运行质量等因素, 建立健全系统的辅助调频服务市场机制, 构建计及频率稳定约束的多目标优化模型来进一步确定多主体的调频份额, 设计满足系统全局频率安全的多主体集中调频控制策略; 在设备层面, 尤其针对新能源场群而言, 主要考虑设备单元的可调频能力、安全性、调频寿命以及调频工作量, 设计满足系统调频份额任务和节点频率稳定的分散自律控制, 如考虑上述因素的频率灵敏度下垂控制。根据基于集中-分散结合的频率协同控制策略可确定多不确定

性因素下预防控制框架的方式安排、参数整定、调频备用预留量、负荷多轮次减载设定值等,快速响应紧急控制框架下的调频份额分配,促进事后系统的频率恢复速度,从而充分挖掘多类型设备在源、网、需各环节的控制潜力,全过程提升电网整体和局部的频率稳定性。

6 结论

高比例可再生能源接入电力系统的惯量水平低、调频能力差等特性导致频率稳定问题日益凸显。本文首先总结了现有关于频率稳定性的定义,从典型系统的频率响应过程出发,归纳了国内外学者在系统频率响应特性建模、机理评估、调频控制3个方面的研究进展,并且对比分析了现有方法的适用性。总体上,现有对频率稳定理论体系的认识不够深刻、系统、全面,尤其在频率稳定性评估、节点频率分析与评估方面处于初步研究阶段。为此,本文在已有研究基础上展望了需要完善的研究领域和潜在实用的技术路径,以期频率稳定研究领域的学者提供后续研究建议和参考,深化提升对含高比例新能源的电力系统频率稳定的认知水平。

参考文献 References

- [1] RATNAM K S, PALANISAMY K, YANG G Y. Future low-inertia power systems: requirements, issues, and solutions-a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 124: 109773.
- [2] 国家能源局. 新型电力系统发展蓝皮书[M]. 北京: 中国电力出版社, 2023.
National Energy Administration. Blue book on the development of new power systems[M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2023.
- [3] 国家能源局. 国家能源局发布 1~8 月份全国电力工业统计数据[EB/OL]. 2023[2023-10-20]. https://www.nea.gov.cn/2023-09/19/c_1310742036.htm.
National Energy Administration. National energy bureau releases national electric power industry statistics for January to August[EB/OL]. 2023[2023-10-20]. https://www.nea.gov.cn/2023-09/19/c_1310742036.htm.
- [4] 汪梦军, 郭剑波, 马士聪, 等. 新能源电力系统暂态频率稳定分析与调频控制方法综述[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(5): 1672-1693.
WANG Mengjun, GUO Jianbo, MA Shicong, et al. Review of transient frequency stability analysis and frequency regulation control methods for renewable power systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(5): 1672-1693.
- [5] 肖亮, 陈亦平, 伍阳阳, 等. 风电场快速调频技术的工程实践及关键参数取值[J]. *高电压技术*, 2023, 49(6): 2536-2545.
XIAO Liang, CHEN Yiping, WU Yangyang, et al. Engineering practice and key parameter selection for fast frequency regulation technology of wind farms[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(6): 2536-2545.
- [6] 屠竞哲, 何剑, 安学民, 等. 巴基斯坦“2023.1.23”大停电事故分析及启示[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(14): 5319-5328.
TU Jingzhe, HE Jian, AN Xuemin, et al. Analysis and lessons of Pakistan blackout event on January 23, 2023[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(14): 5319-5328.
- [7] 李兆伟, 吴雪莲, 庄侃沁, 等. “9-19”锦苏直流双极闭锁事故华东电网频率特性分析及思考[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(7): 149-155.
LI Zhaowei, WU Xuelian, ZHUANG Kanqin, et al. Analysis and reflection on frequency characteristics of east china grid after bipolar locking of “9-19” Jinping Sunan DC transmission line[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(7): 149-155.
- [8] 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.
- [9] 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): 6183-6191.
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): 6183-6191.
- [10] 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): 1-24.
ZHANG Ziyang, ZHANG Ning, DU Ershun, et al. Review and countermeasures on frequency security issues of power systems with high shares of renewables and power electronics[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(1): 1-24.
- [11] 符杨, 张语涵, 田书欣, 等. 基于混合量测的新能源电力系统动态频率预测方法[J/OL]. *中国电机工程学报*, 2023: 1-12 [2023-10-29]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.222723>.
FU Yang, ZHANG Yuhuan, TIAN Shuxin, et al. Dynamic frequency prediction based on mixed measurement for new energy power system[J/OL]. *Proceedings of the CSEE*, 2023: 1-12[2023-10-29]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.222723>.
- [12] MILANO F, MANJAVACAS Á O. Frequency variations in power systems: modeling, state estimation and control[M]. Hoboken, USA: Wiley-IEEE Press, 2020.
- [13] HATZIARGYRIOU N, MILANOVIĆ J, RAHMANN C, et al. Stability definitions and characterization of dynamic behavior in systems with high penetration of power electronic interfaced technologies[R]. Piscataway, USA: IEEE, 2020.
- [14] ANDERSON P M, MIRHEYDAR M. A low-order system frequency response model[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1990, 5(3): 720-729.
- [15] SHI Q X, LI F X, CUI H T. Analytical method to aggregate multi-machine SFR model with applications in power system dynamic studies[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(6): 6355-6367.
- [16] YAN K F, LI G Q, ZHANG R F, et al. Frequency control and optimal operation of low-inertia power systems with HVDC and renewable energy: a review[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2024, 39(2): 429-4295.
- [17] YE H, PEI W, QI Z P. Analytical modeling of inertial and droop responses from a wind farm for short-term frequency regulation in power systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(5): 3414-3423.

- [18] 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.
- [19] KHAZAEI J, TU Z H, LIU W X. Small-signal modeling and analysis of virtual inertia-based PV systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(2): 1129-1138.
- [20] QUAN X J, YU R Y, ZHAO X, et al. Photovoltaic synchronous generator: architecture and control strategy for a grid-forming PV energy system[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 936-948.
- [21] 李鲁阳, 王方政, 陈磊, 等. 双馈风机对电网频率扰动的动态响应建模与分析[J/OL]. 电力系统自动化, 2023: 1-12. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20230525.1743.006.html>.
- LI Luyang, WANG Fangzheng, CHEN Lei, et al. Modeling and analysis of dynamic response to frequency disturbance in power grid for doubly-fed wind turbine[J/OL]. Automation of Electric Power Systems, 2023: 1-12. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20230525.1743.006.html>.
- [22] 李国庆, 刘先超, 姜涛, 等. 考虑转子磁链-电流环控制动态的虚拟惯量 DFIG 功频响应特性建模[J]. 电网技术, 2023, 47(12): 4897-4905.
- LI Guoqing, LIU Xianchao, JIANG Tao, et al. Active power-frequency response modeling of doubly-fed induction generator with virtual inertia control considering rotor flux-current loop control dynamics[J]. Power System Technology, 2023, 47(12): 4897-4905.
- [23] 戚陈陈, 陈鹏伟, 陈新, 等. 分散式风电高渗透率接入直流受端电网频率特性建模与分析[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2161-2170.
- QI Chenchen, CHEN Pengwei, CHEN Xin, et al. Modeling and analyzing for frequency characteristics of distributed wind power with high proportional participation in dc receiving power grid[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2161-2170.
- [24] 张英敏, 彭泽峰, 彭乔, 等. 预测新能源接入电网受扰后频率最低点的通用 ASF 模型[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1788-1797.
- ZHANG Yingmin, PENG Zefeng, PENG Qiao, et al. Generic ASF model of new-energy-integrated power grid for frequency nadir estimation under disturbance[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1788-1797.
- [25] 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.
- [26] 周海强, 鲁锦文, 薛峰, 等. 计及风电综合惯性控制的电力系统扩展频率响应模型[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(8): 198-205.
- ZHOU Haiqiang, LU Jinwen, XUE Feng, et al. Extended frequency response model for power system considering wind power synthetic inertia control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(8): 198-205.
- [27] 刘灏, 商峻, 毕天姝, 等. 基于实测数据的电网频率信号特征分析与提取方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(10): 135-144.
- LIU Hao, SHANG Jun, BI Tianshu, et al. Feature analysis and extraction method of power grid frequency signal based on measured data[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(10): 135-144.
- [28] 赵峰, 朱齐. 一种基于时空频率感知的深度图像去模糊方法: CN116993623A[P]. 2023-11-03.
- ZHAO Feng, ZHU Qi. A depth image deblurring method based on spatio-temporal frequency perception: CN116993623A[P]. 2023-11-03.
- [29] 仇怡超, 闻达, 王晓茹, 等. 基于深度置信网络的电力系统扰动后频率曲线预测[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(17): 5095-5104.
- ZHANG Yichao, WEN Da, WANG Xiaoru, et al. A method of frequency curve prediction based on deep belief network of post-disturbance power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(17): 5095-5104.
- [30] LI H R, LI C G, LIU Y T. Maximum frequency deviation assessment with clustering based on metric learning[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 120: 105980.
- [31] 赵荣臻, 文云峰, 叶希, 等. 基于改进堆栈降噪自动编码器的理想事故频率指标评估方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(14): 4081-4092.
- ZHAO Rongzhen, WEN Yunfeng, YE Xi, et al. Research on frequency indicators evaluation of disturbance events based on improved stacked denoising autoencoders[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(14): 4081-4092.
- [32] 赵冬梅, 郑亚锐, 谢家康, 等. 基于轻量级梯度提升机和生成对抗网络的含风电电力系统频率稳定评估[J]. 电网技术, 2022, 46(8): 3181-3190.
- ZHAO Dongmei, ZHENG Yarui, XIE Jiakang, et al. Frequency stability evaluation of power system containing wind power based on light gradient boosting machine and generative adversarial network[J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 3181-3190.
- [33] 王彦博, 吴俊勇, 季佳仲, 等. 基于深度残差收缩网络的电力系统暂态频率安全集成评估[J]. 电网技术, 2023, 47(2): 482-492.
- WANG Yanbo, WU Junyong, JI Jiashen, et al. Integrated assessment of power system transient frequency security based on deep residual shrinkage network[J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 482-492.
- [34] LEKSHMI J D, RATHER Z H, PAL B C. Online estimation of disturbance size and frequency nadir prediction in renewable energy integrated power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(1): 1126-1137.
- [35] 张怡, 张恒旭, 李常刚, 等. 深度学习在电力系统频率分析与控制中的应用综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(10): 3392-3406.
- ZHANG Yi, ZHANG Hengxu, LI Changgang, et al. Review on deep learning applications in power system frequency analysis and control[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(10): 3392-3406.
- [36] MILANO F, ORTEGA Á. Frequency divider[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2): 1493-1501.
- [37] TAN B D, ZHAO J B, DUAN N, et al. Distributed frequency divider for power system bus frequency online estimation considering virtual inertia from DFIG[J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2022, 12(1): 161-171.
- [38] GOLPÍRA H, MESSINA A R. A center-of-gravity-based approach to estimate slow power and frequency variations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 1026-1035.
- [39] SHEN J K, LI W D, LIU L, et al. Frequency response model and its closed-form solution of two-machine equivalent power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(3): 2162-2173.
- [40] WANG X X, LI W D, SHEN J K, et al. A three-machine equivalent system frequency response model and its closed-form solution[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 142: 108344.
- [41] 陈可欣, 辛焕海, 高晖胜, 等. 计及多模态分量的新能源电力系统节点频率分析方法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(10): 136-144.
- CHEN Kexin, XIN Huanhai, GAO Huisheng, et al. Nodal frequency analysis method for renewable energy power system considering multimodal components[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(10): 136-144.
- [42] WANG T Z, MA S C, WANG S S, et al. Modal analysis-based analyt-

- ical method for frequency estimation during inertia response stage of power systems[J]. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 2023, 13(3): 692-701.
- [43] 黄萌, 凌扬坚, 耿华, 等. 功率同步控制的构网型变流器多机交互分析与稳定控制研究综述[J]. *高电压技术*, 2023, 49(11): 4571-4583.
HUANG Meng, LING Yangjian, GENG Hua, et al. An overview on multi-VSCs interaction analysis and stability controls of grid-forming converters with power synchronization control[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(11): 4571-4583.
- [44] MONDAL D, CHAKRABARTI A, SENGUPTA A. Power system small signal stability analysis and control[M]. USA: Academic Press, 2020.
- [45] LIU J, YAO W, WEN J Y, et al. Impact of power grid strength and PLL parameters on stability of grid-connected DFIG wind farm[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(1): 545-557.
- [46] MARKOVIC U, STANOJEV O, ARISTIDOU P, et al. Understanding small-signal stability of low-inertia systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(5): 3997-4017.
- [47] 曾德银, 姚骏, 张田, 等. 虚拟同步发电机多机并联系统的频率小信号稳定性分析研究[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(7): 2048-2061.
ZENG Deyin, YAO Jun, ZHANG Tian, et al. Research on frequency small-signal stability analysis of multi-parallel virtual synchronous generator-based system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(7): 2048-2061.
- [48] ZHANG M Q, YUAN X M, HU J B. Inertia and primary frequency provisions of PLL-synchronized VSC HVDC when attached to islanded AC system[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(4): 4179-4188.
- [49] YING J, YUAN X M, HU J B, et al. Impact of inertia control of DFIG-based WT on electromechanical oscillation damping of SG[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(3): 3450-3459.
- [50] LI C, YANG Y Q, MIJATOVIC N, et al. Frequency stability assessment of grid-forming VSG in framework of MPME with feedforward decoupling control strategy[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(7): 6903-6913.
- [51] 陈锦洲, 段荣华, 陈磊, 等. 电力系统调频控制相关的频率振荡问题[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(18): 82-87.
CHEN Jinzhou, DUAN Ronghua, CHEN Lei, et al. Frequency oscillation related to frequency regulation control of power system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(18): 82-87.
- [52] 黄林彬, 辛焕海, 黄伟, 等. 含虚拟惯量的电力系统频率响应特性定量分析方法[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(8): 31-38.
HUANG Linbin, XIN Huanhai, HUANG Wei, et al. Quantified analysis method of frequency response characteristics for power systems with virtual inertia[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(8): 31-38.
- [53] CHEN S M, SUN Y, HAN H, et al. Dynamic frequency performance analysis and improvement for parallel VSG systems considering virtual inertia and damping coefficient[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2023, 11(1): 478-489.
- [54] 李威, 朱玲, 祁晓婧, 等. 新能源自同步电压源接入电力系统频率特性分析[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(17): 38-46.
LI Wei, ZHU Ling, QI Xiaojing, et al. Frequency characteristic analysis for power system with integration of renewable energy by self-synchronous voltage source[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(17): 38-46.
- [55] 秦爽, 陈磊, 李凯斌, 等. 频率振荡模式与角功率振荡模式本质区别探讨[J]. *东北电力技术*, 2022, 43(11): 1-6.
- QIN Shuang, CHEN Lei, LI Kaibin, et al. Discussion on essential difference between frequency oscillation mode and rotor angle oscillation mode[J]. *Northeast Electric Power Technology*, 2022, 43(11): 1-6.
- [56] 谢宇峥, 杨高才, 侯彦若, 等. 考虑储能惯量支撑的电力系统的频率安全稳定判定方法: CN114759584B[P]. 2023-05-26.
XIE Yuzheng, YANG Gaocai, HOU Yanruo, et al. Frequency security stabilization determination method for power systems considering storage inertia support: CN114759584B[P]. 2023-05-26.
- [57] EirGrid. Incorporation of MPID 229 RoCoF modification approved in principle by CRU (2014)[EB/OL]. 2023[2023-10-20]. https://www.eirgridgroup.com/site-files/library/EirGrid/MPID229a_Recommendation_Paper.pdf.
- [58] Fingrid. Grid code specifications for power generating facilities VJV2018[EB/OL]. 2018[2023-10-20]. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/en/customers/grid-connection/grid-code-specification-s-for-power-generating-facilities-vjv2018-.pdf>.
- [59] Energy Network Association. Requirements for the connection of fully type tested micro-generators (up to and including 16 A per phase) in parallel with public low voltage distribution networks on or after 27 April 2019[EB/OL]. 2021[2023-10-20]. <https://www.nienetworks.co.uk/about-us/distribution-code/erec-g98-ni>.
- [60] North American Electric Reliability Corporation. Frequency response and frequency bias setting[EB/OL]. 2020[2023-10-20]. <https://www.nerc.com/pa/Stand/Reliability%20Standards/BAL-003-2.pdf>.
- [61] Australian Energy Market Operator. Inertia requirements methodology inertia requirements & shortfalls[EB/OL]. 2018[2023-10-20]. https://www.aemo.com.au/-/media/files/electricity/nem/security_and_reliability/system-security-market-frameworks-review/2018/inertia_requirements_methodology_published.pdf.
- [62] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 风电场接入电力系统技术规定 第1部分: 陆上风电: GB/T 19963.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical specification for connecting wind farm to power system—part 1: on shore wind power: GB/T 19963.1—2021[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2021.
- [63] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 光伏电站接入电力系统技术规定: GB/T 19964—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical requirements for connecting photovoltaic power station to power system: GB/T 19964—2012[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2013.
- [64] 徐泰山, 薛禹胜. 暂态频率偏移可接受性的定量分析[J]. *电力系统自动化*, 2002, 26(19): 7-10.
XU Taishan, XUE Yusheng. Quantitative assessments of transient frequency deviation acceptability[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2002, 26(19): 7-10.
- [65] ZHANG H X, LI C G, LIU Y T. Quantitative frequency security assessment method considering cumulative effect and its applications in frequency control[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2015, 65: 12-20.
- [66] LARBI E S. Evaluation of key performance indices for frequency quality: a method for evaluating frequency stability in the Nordic power system[D]. Stockholm, Sverige: KTH Royal Institute of Tech-

- nology, 2023.
- [67] GAO H S, XIN H H, HUANG L B, et al. Common-mode frequency in converter-integrated power systems: definition, analysis, and quantitative evaluation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2022, 37(6): 4846-4860.
- [68] 张雯欣, 吴琛, 黄伟, 等. 考虑频率二次跌落系统频率特征评估及风电调频参数整定[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(8): 11-19. ZHANG Wenxin, WU Chen, HUANG Wei, et al. Evaluation of system frequency characteristic and parameter setting of frequency regulation for wind power considering secondary frequency drop[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(8): 11-19.
- [69] 马宁嘉, 谢小荣, 孙谊楠, 等. 新能源电力系统频率时空分布特性分析[J]. *高电压技术*, 2023, 50(1): 406-413. MA Ningjia, XIE Xiaorong, SUN Yiqian, et al. Analysis of frequency space-time distribution characteristics of power systems with renewables[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 50(1): 406-413.
- [70] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电力系统网源协调技术导则: GB/T 40594—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021. State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical guide for power grid and source coordination: GB/T 40594—2021[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2021.
- [71] 王琦, 郭钰锋, 万杰, 等. 适用于高风电渗透率电力系统的火电机组一次调频策略[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(4): 974-984. WANG Qi, GUO Yufeng, WAN Jie, et al. Primary frequency regulation strategy of thermal units for a power system with high penetration wind power[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(4): 974-984.
- [72] 李世明, 李波, 郭文鑫, 等. 高比例水电孤网的振荡抑制与快速调频协调策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(4): 118-124. LI Shiming, LI Bo, GUO Wenxin, et al. Coordination strategy of oscillation suppression and fast frequency modulation in a high hydropower proportion isolated network[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(4): 118-124.
- [73] LI S H, WANG M. A novel model of the lower active power limit (LAPL) of DFIG under overspeed mode[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 125: 106439.
- [74] 盛举, 贾庆岩, 孙建军, 等. 基于多尺度形态学滤波的火电机组一次调频控制方法[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(2): 194-200. SHENG Ju, JIA Qingyan, SUN Jianjun, et al. Primary frequency regulation control method of thermal power unit based on multi-scale morphological filter[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(2): 194-200.
- [75] LI Z W, CHENG Z P, SI J K, et al. Adaptive power point tracking control of PV system for primary frequency regulation of AC microgrid with high PV integration[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(4): 3129-3141.
- [76] ABOUZEID S I, GUO Y F, ZHANG H C, et al. Improvements in primary frequency regulation of the grid-connected variable speed wind turbine[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2019, 13(3): 491-499.
- [77] 张祥宇, 金召展, 付媛, 等. 基于频率变化极值时间的风电虚拟惯量约束与支撑控制[J]. *高电压技术*, 2023, 49(6): 2491-2504. ZHANG Xiangyu, JIN Zhaozhan, FU Yuan, et al. Virtual inertia constrain and support control of wind turbines based on variable frequency limit time[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(6): 2491-2504.
- [78] 闵勇, 陈磊, 刘瑞涛, 等. 电力系统频率动态中惯量与惯量响应特性辨析[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(3): 855-867. MIN Yong, CHEN Lei, LIU Ruikuo, et al. Analysis on characteristics of inertia and inertial response in power system frequency dynamics[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(3): 855-867.
- [79] NIE Y H, LIU J T, GAO L, et al. Nonlinear rotor kinetic energy control strategy of DFIG-based wind turbine participating in grid frequency regulation[J]. *Electric Power Systems Research*, 2023, 223: 109678.
- [80] CONROY J F, WATSON R. Frequency response capability of full converter wind turbine generators in comparison to conventional generation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2008, 23(2): 649-656.
- [81] GUO Y C, BAO W Y, DING L, et al. Analytically derived fixed termination time for stepwise inertial control of wind turbines—part II: Application strategy[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 121: 106106.
- [82] LIU B, ZHAO J B, HUANG Q, et al. Nonlinear virtual inertia control of WTGs for enhancing primary frequency response and suppressing drivetrain torsional oscillations[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(5): 4102-4113.
- [83] 颜湘武, 王德胜, 杨琳琳, 等. 直驱风机惯量支撑与一次调频协调控制策略[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(15): 3282-3292. YAN Xiangwu, WANG Desheng, YANG Linlin, et al. Coordinated control strategy of inertia support and primary frequency regulation of PMSG[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(15): 3282-3292.
- [84] REHMAN H U, YAN X W, ABDELBAKY M A, et al. An advanced virtual synchronous generator control technique for frequency regulation of grid-connected PV system[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 125: 106440.
- [85] 唐飞, 元君锋, 谢家锐, 等. 避免频率二次跌落的风储联合调频控制策略[J/OL]. *中国电机工程学报*, 2023: 1-14[2023-10-12]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.223394>. TANG Fei, YUAN Junfeng, XIE Jiarui, et al. Coordinated control strategy of wind turbine generator and energy storage equipment to avoid frequency secondary drop[J/OL]. *Proceedings of the CSEE*, 2023: 1-14 [2023-10-12]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.223394>.
- [86] 陈厚合, 于浩田, 刘先超, 等. 大规模风电经 LCC-HVDC 送出的送端电网频率协同控制策略[J]. *电力自动化设备*, 2023, 43(9): 210-217. CHEN Houhe, YU Haotian, LIU Xianchao, et al. Frequency cooperative control strategy of sending-end power grid with large-scale wind power sent out by LCC-HVDC[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(9): 210-217.
- [87] RAO H, WU W, MAO T, et al. Frequency control at the power sending side for HVDC asynchronous interconnections between Yunnan power grid and the rest of CSG[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2021, 7(1): 105-113.
- [88] 王渝红, 朱杰, 曾琦, 等. 直流频率限制控制器参数多目标双层优化设计方法[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(9): 189-196, 224. WANG Yuhong, ZHU Jie, ZENG Qi, et al. Multi-objective bi-level optimization design method of DC frequency limiting controller parameters[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(9): 189-196, 224.
- [89] ZHANG H B, WEI K, WEI Y T, et al. Emergency power control strategy of HVDC FLC based on modified SFR model in islanded HVDC sending system[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022, 142: 108314.
- [90] 姚伟, 熊永新, 姚雅涵, 等. 海上风电柔直并网系统调频控制综述[J]. *高电压技术*, 2021, 47(10): 3397-3413. YAO Wei, XIONG Yongxin, YAO Yahan, et al. Review of voltage

- source converter-based high voltage direct current integrated offshore wind farm on providing frequency support control[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(10): 3397-3413.
- [91] LANGWASSER M, DE CARNE G, LISERRE M, et al. Primary frequency regulation using HVDC terminals controlling voltage dependent loads[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2020, 36(2): 710-720.
- [92] 江守其, 李国庆, 辛业春, 等. 提升柔性直流电网盈余功率消纳能力的协调控制策略[J]. *高电压技术*, 2021, 47(12): 4471-4482.
JIANG Shouqi, LI Guoqing, XIN Yechun, et al. Coordinated control strategies to enhance the capability of surplus power consumption for DC grid[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(12): 4471-4482.
- [93] WANG W Y, CAO Y J, JIANG L, et al. A perturbation observer-based fast frequency support control for low-inertia power grids through VSC-HVDC systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2024, 39(2): 2461-2474.
- [94] GU M C, MEEGAHAPOLA L, WONG K L. Coordinated voltage and frequency control in hybrid AC/MT-HVDC power grids for stability improvement[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(1): 635-647.
- [95] SUN T T, HUANG J J. Improved dynamic power flow model with frequency regulation by DFIG integrated through VSC-HVDC considering governor delay of SG[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(11): 5447.
- [96] LEON A E, MAURICIO J M. Virtual synchronous generator for VSC-HVDC stations with DC voltage control[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, 38(1): 728-738.
- [97] JIA Y B, MENG K, SUN C Y, et al. Economic-driven frequency regulation in multi-terminal HVDC systems: a cooperative distributed approach[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(3): 2245-2255.
- [98] ZHAO H R, LIN Z W, WU Q W, et al. Model predictive control based coordinated control of multi-terminal HVDC for enhanced frequency oscillation damping[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 123: 106328.
- [99] AMBIA M N, MENG K, XIAO W D, et al. Adaptive droop control of multi-terminal HVDC network for frequency regulation and power sharing[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(1): 566-578.
- [100] SHI Q X, LI F X, LIU G X, et al. Thermostatic load control for system frequency regulation considering daily demand profile and progressive recovery[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(6): 6259-6270.
- [101] LIU J Y, ZHANG W, LIU Y T. Primary frequency response from the control of LED lighting loads in commercial buildings[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 8(6): 2880-2889.
- [102] 聂世豪, 陈磊, 闵勇, 等. 工业负荷参与一次调频潜力与特性分析[J]. *电网技术*, 2023, 47(10): 3994-4004.
NIE Shihao, CHEN Lei, MIN Yong, et al. Potential and characteristic analysis on participation of industrial load in primary frequency regulation[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(10): 3994-4004.
- [103] 秦川, 任伟, 江叶峰, 等. 频率安全分段控制下轮次切负荷协调优化策略[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(7): 261-268.
QIN Chuan, REN Wei, JIANG Yefeng, et al. Coordinated optimization strategy of wheel load shedding under frequency safety subsection control[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(7): 261-268.
- [104] KARBOUJ H, RATHER Z H, FLYNN D, et al. Non-synchronous fast frequency reserves in renewable energy integrated power systems: a critical review[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2019, 106: 488-501.
- [105] WANG M S, MU Y F, LI F X, et al. State space model of aggregated electric vehicles for frequency regulation[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 11(2): 981-994.
- [106] ARIAS N B, HASHEMI S, ANDERSEN P B, et al. Assessment of economic benefits for EV owners participating in the primary frequency regulation markets[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 120: 105985.
- [107] GOMIS-BELLMUNT O, TAVAKOLI S D, LACERDA V A, et al. Grid-forming loads: can the loads be in charge of forming the grid in modern power systems?[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 14(2): 1042-1055.
- [108] 苏粟, 李家浩, 李泽宁, 等. 考虑用户需求的电动汽车虚拟同步机辅助调频控制策略[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(11): 40-47.
SU Su, LI Jiahao, LI Zening, et al. Auxiliary frequency regulation control strategy based on virtual synchronous machine for electric vehicles considering user demand[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(11): 40-47.
- [109] RAZMI P, RAHIMI T, SABAHI K, et al. Adaptive fuzzy gain scheduling PID controller for frequency regulation in modern power system[J/OL]. *IET Renewable Power Generation*, 2022: 1-16. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12569>.
- [110] MAVALIZADEH H, ESPINOSA L A D, ALMASSALKHI M R. Improving frequency response with synthetic damping available from fleets of distributed energy resources[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2024, 39(2): 4498-4509.
- [111] 王育飞, 杨铭诚, 薛花, 等. 计及SOC的电池储能系统一次调频自适应综合控制策略[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(10): 192-198, 219.
WANG Yufei, YANG Mingcheng, XUE Hua, et al. Self-adaptive integrated control strategy of battery energy storage system considering SOC for primary frequency regulation[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(10): 192-198, 219.
- [112] YOO Y, JUNG S, JANG G. Dynamic inertia response support by energy storage system with renewable energy integration substation[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2020, 8(2): 260-266.
- [113] WANG Q S, YANG P F, BUJA G. Design and analysis on different functions of battery energy storage system for thermal power units frequency regulation[J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 11981-11991.
- [114] LIU H B, ZHANG C, PENG X Y, et al. Configuration of an energy storage system for primary frequency reserve and inertia response of the power grid[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 41965-41975.
- [115] MENG L X, ZAFAR J, KHADEM S K, et al. Fast frequency response from energy storage systems—a review of grid standards, projects and technical issues[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(2): 1566-1581.
- [116] GUNDOGDU B M, GLADWIN D T, NEJAD S, et al. Scheduling of grid-tied battery energy storage system participating in frequency response services and energy arbitrage[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2019, 13(14): 2930-2941.
- [117] ZHAO T Q, PARISIO A, MILANOVIĆ J V. Distributed control of battery energy storage systems for improved frequency regulation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(5): 3729-3738.
- [118] MA Y X, HU Z C, SONG Y H. Hour-ahead optimization strategy for shared energy storage of renewable energy power stations to provide frequency regulation service[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2022, 13(4): 2331-2342.

- [119] 曹 炜, 钦焕乘, 陆建忠, 等. 新型电力系统下虚拟同步机的定位和应用前景展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(4): 190-207.
CAO Wei, QIN Huancheng, LU Jianzhong, et al. Orientation and application prospect of virtual synchronous generator in new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(4): 190-207.
- [120] CHEREVATSKIY S, SPROUL S, ZABIHI S, et al. Grid forming energy storage system addresses challenges of grids with high penetration of renewables[EB/OL]. (2021-02-24)[2023-12-08]. <https://www.electranet.com.au/wp-content/uploads/2021/02/CIGRE48-Grid-Forming-BESS-Case-Study-August-2020.pdf>.
- [121] AL KEZ D, FOLEY A M, AHMED F, et al. Overview of frequency control techniques in power systems with high inverter-based resources: challenges and mitigation measures[J]. IET Smart Grid, 2023, 6(5): 447-469.
- [122] 葛 俊, 宋 鹏, 刘汉民, 等. 新能源场站虚拟同步发电机技术研究及示范应用[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(1): 39-47.
GE Jun, SONG Peng, LIU Hanmin, et al. Research and demonstration application of virtual synchronous generator technology in renewable energy power station[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(1): 39-47.
- [123] 刘国宇, 蔺圣杰, 吴 鸣, 等. 虚拟同步机示范工程综述[J]. 供用电, 2019, 36(4): 37-42.
LIU Guoyu, LIN Shengjie, WU Ming, et al. Summary of virtual

synchronous machine technology demonstration project[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(4): 37-42.



LI Guoqing
Ph.D., Professor

李国庆

1963—, 男, 博士, 教授, 博导
主要从事电力系统安全性分析与控制、电力系统继电保护和柔性直流输电技术等领域的研究
E-mail: lgq@neepu.edu.cn



LIU Xianchao
Ph.D. candidate
Corresponding author

刘先超(通信作者)

1995—, 男, 博士生
主要从事电力系统稳定分析与控制方面的研究
E-mail: liuxianchao2017@aliyun.com

收稿日期 2023-11-20 修回日期 2023-12-19 编辑 程子丰