

新能源电力系统暂态频率稳定分析与 调频控制方法综述

汪梦军¹, 郭剑波¹, 马士聪^{1*}, 王铁柱¹, 张曦², 罗魁¹, 王国政³

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京市 海淀区 100192;
2. 北京理工大学, 北京市 海淀区 100044; 3. 清华大学, 北京市 海淀区 100084)

Review of Transient Frequency Stability Analysis and Frequency Regulation Control Methods for Renewable Power Systems

WANG Mengjun¹, GUO Jianbo¹, MA Shicong^{1*}, WANG Tiezhu¹, ZHANG Xi², LUO Kui¹, WANG Guozheng³

(1. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China; 2. Beijing Institute of Technology, Haidian District, Beijing 100044, China; 3. Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: Under the "carbon peak and carbon neutrality" strategic goal, China will build a renewable-dominant power system. The moment of inertia and frequency regulating capacity of the renewable-dominant power system are reduced, and the fault disturbance power is increased, which threatens the transient frequency stability. In order to meet the requirements of transient frequency stability, it is necessary to explore new frequency regulation control methods. The current frequency regulation control methods and the analysis models they rely on are difficult to apply to renewable-dominant power systems. In order to better understand the transient frequency stability problem of renewable-dominant power systems and prepare frequency regulation countermeasures, this paper summarizes and prospects the research status of transient frequency stability analysis and frequency regulation control methods. First, the existing transient frequency analysis models are summarized. Then, the research status of frequency regulation control methods is sorted out from the system and plant levels, and the applicable characteristics of different frequency regulation control methods are summarized from the analysis basis. Finally, the characteristic changes of transient frequency stability analysis and frequency regulation control of renewable-dominant power systems and their effects are summarized, and the possible future development ideas are prospected.

KEY WORDS: renewable-dominant power system; transient

frequency stability analysis; frequency regulation control methods; frequency response

摘要: 在“双碳”战略目标下,我国将构建高比例新能源电力系统。高比例新能源电力系统的转动惯量和调频容量降低、故障冲击功率提升,使大电网暂态频率稳定受到威胁。当前的调频控制方法及其所依赖的分析模型难以很好地适用于高比例新能源电力系统。为适应暂态频率稳定要求,需探索新的调频控制方法。为了更好地理解高比例新能源电力系统的暂态频率稳定问题,准备调频应对策略,对暂态频率稳定分析与调频控制方法的研究现状进行综述和展望。首先,归纳现有暂态频率分析模型,然后从系统和厂站2个层面梳理了调频控制方法的研究现状,从分析基础出发归纳不同调频控制方法的适用特性。最后,总结了高比例新能源电力系统暂态频率稳定分析与调频控制的特征变化及其影响,并对未来可能的发展思路进行展望。

关键词: 高比例新能源电力系统; 暂态频率稳定分析; 调频控制方法; 频率响应

0 引言

2020年9月,习总书记在第75届联大讲话中宣布了中国2030年“碳达峰”、2060年“碳中和”的战略目标。能源结构转型是实现“双碳”目标的主要途径,电力行业是实现“双碳”目标的主战场^[1]。2021年3月,中央提出要构建以新能源为主体的新型电力系统^[2]。近年来我国新能源装机规模迅速增加,截至2021年底风光新能源装机容量达到6.4亿kW,是我国的第二大主力电源^[3]。据预测,新能源装机在2060年将达到50亿kW,占比超过

基金项目: 国家电网公司科技项目(5100-202255328A-2-0-YS)。

Science and Technology Project of State Grid Corporation (5100-202255328A-2-0-YS).

60%，新能源电量占比超过55%，逐渐成为电量供应主体^[4]。新能源的快速发展使系统频率安全问题凸显，近年来出现了多起与新能源相关的频率安全事故，如2016年2月8日的南澳电网频率崩溃事故^[5]、2019年8月9日英国因频率降低引起的大停电事故^[6]。在高比例新能源电力场景下，系统频率安全将面临更加严峻的挑战。

对于新能源的渗透，系统频率稳定判据及边界未发生明显改变。判据依然是系统频率能快速恢复到额定频率附近继续运行，不发生频率持续振荡或频率崩溃，也不长期悬浮于某一过高或过低的数值^[7]。大扰动下频率稳定边界包括频率最低点和准稳态频率，应保证发电厂继续安全运行同时留有一定裕度，同时保证与低频减载、机组的过频率保护等相协调^[7]，对于新能源电力系统依然适用。

高比例新能源电力系统的惯量降低、调频备用容量不足和扰动功率提升等新特征，是导致大电网频率稳定问题突出的重要原因。以风电、光伏为主的新能源装机和电量占比逐渐升高，常规同步机组的并网比例被压缩，由同步机提供的旋转惯量相对降低^[8-10]。新能源通过电力电子接口接入电网，不自动参与同步机转子主导的机械-电磁功率的耦合，调频特性由控制策略决定，而常规控制策略的新能源机组不具有惯量响应能力^[11-12]。在现有低比例新能源电力系统中，一次调频控制仍以传统同步机为主^[13]，一方面，调频备用容量随着新能源占比提高而相对降低；另一方面，风电和太阳能发电具有较强的波动性和不确定性^[14]，通常由传统电源提供的备用容量平抑^[15]，传统电源可提供的调频备用容量被进一步压缩。此外，大规模新能源基地电力的远距离输送通过特高压交直流线路实现，单回线路输送容量提高，发生单一线路故障时不平衡功率冲击量变大，系统面临的功率冲击频次和规模提升^[16-18]。系统更可能在安控动作时间之前频率越限，暂态频率稳定问题严重威胁电网安全。

电网频率稳定控制主要由3道防线构成：第1道防线是在事故发生前通过调整一次调频备用、惯量水平等手段调节电网运行方式的预防控制；第2道防线是事件驱动的根据策略表的紧急控制，属于前馈控制；第3道防线是针对极端情况的基于响应驱动的校正控制，以低频减载等为主要形式的反馈控制^[13]。在不考虑触发第3道防线的情况时，若系统实际因发生大规模扰动事件触发了紧急控制，则

由紧急控制在短暂延期内快速切除部分负荷或发电机，使系统承受的扰动降低至一定范围内，再依靠常规调频控制维持系统频率稳定。本文针对大电网暂态频率稳定问题，主要聚焦于第1道防线和传统一次调频时间尺度范围内。

为了降低新能源接入对频率响应性能的影响，国内外相继提出了改善可再生能源频率响应能力的具体指标^[19-22]。西班牙要求提供风电装机1.5%的备用容量，德国要求100MW以上风电场具备2%的一次调频能力，还有一些国家和地区对新能源占比提出了不同的容量限制^[19-20]。我国则明确提出新能源场站应具备一次调频能力和相应指标，在出调频死区后(风电场死区设置在 $\pm 0.03\text{Hz}\sim\pm 0.1\text{Hz}$ ，光伏电站死区设置在 $\pm 0.02\text{Hz}\sim\pm 0.06\text{Hz}$)，新能源场站应根据电网需求具有2%~10%的调差率，频率阶跃扰动试验中，至少应具有向上6%、向下10%运行功率的调频容量，同时规定了滞后时间(风电场2s、光伏电站1s)、上升时间(风电场9s、光伏电站5s)、调节时间(至多15s)和最大调节偏差($\pm 1\%$)^[21-22]。上述指标是针对当前新能源电力系统提出的，可在一定程度上改善频率稳定性，但要求仍较为宽松。

为适应高比例新能源电力系统频率稳定要求，需开发利用新能源更加快速灵活的功率调节能力，探索新的调频控制方法。当前调频控制的研究可分为系统层和厂站层2类：系统层主要依据聚合等效模型研究调频指标；厂站层根据所依赖频率分析模型的不同，主要可以分为3种，分别是基于聚合等效模型、网络-节点模型和人工智能模型的研究。但高比例新能源电力系统惯量的稀释、系统强度的下降，使得故障初期各节点频率表现出的时空分布差异显著^[23-24]，现有基于聚合模型的调频控制无法清晰表达更多新能源加入对系统的影响机理。而其他调频控制方法缺乏综合与系统的分析和探讨，难以在高比例新能源电力系统中直接应用。为了更具系统观和全局观地理解高比例新能源电力系统暂态频率稳定问题，以及准备调频应对策略，本文对暂态频率稳定分析与调频控制方法的研究现状进行综述和展望。

暂态频率稳定性分析大多集中于系统频率响应的求取，通过某种方式得到系统在扰动和一定控制形式下的频率响应曲线或频率响应特征值，然后根据经验设置判据来判断稳定性^[25]。调频控制则通

过设计具体控制措施,使频率最低点、准稳态频率等频率响应特征值满足稳定边界要求。本文研究框架如图1所示。首先归纳现有频率分析模型,然后从系统和厂站2个层面梳理现有调频控制策略的研究现状。不同控制策略依赖和对应着不同的分析模型,从分析基础出发归纳不同控制策略的适用性。最后总结了高比例新能源电力系统暂态频率稳定分析与调频控制的变化特征及其带来的挑战,并对其未来可能发展思路进行了展望。

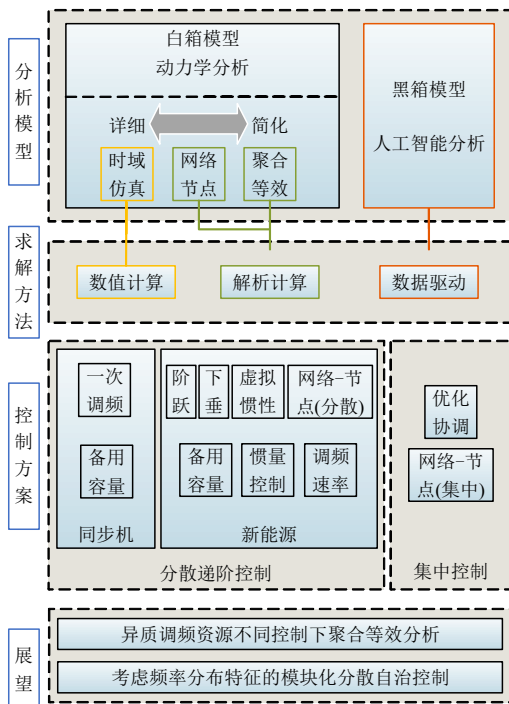


图1 本文研究框架

Fig. 1 Research framework of this paper

1 暂态频率稳定分析模型及方法

暂态频率稳定分析的重点是求解频率响应曲线或频率特征值,求解模型可分为以动力学分析为基础的白箱模型,和以人工智能技术为基础的黑箱模型。

1.1 白箱模型

白箱模型及分析方法可分为基于全状态模型的时域仿真分析法、基于网络-节点模型的分析法和基于聚合等效模型的解析分析法,3种模型均以动力学方程为基础,不同的是模型结构详细程度由详细到简化。

1.1.1 基于全状态模型的时域仿真分析法

时域仿真分析通过在仿真软件中建立详细的设备全状态动态模型,由成熟的数值算法求解微分代数方程组,能反映节点频率时空分布特征,是目

前最为直接和精确的频率响应分析方法,一般作为其他分析模型的重要参考^[26-28]。按研究的时间尺度,可建立全状态机电暂态仿真模型或机电-电磁混合仿真模型。

随着电网规模的扩大和所关心的仿真时间的增长,时域仿真模型计算规模大幅增加,难以在线应用,也使得预想事故分析的时间成本大幅增加。随着新能源发电比例的提高,大量电力电子设备接入交流电网,与交流电网的耦合越来越密切,而传统的机电暂态仿真无法进行换流阀级的详细建模,对于实际系统可能出现的换相失败及其连锁故障等无法精确仿真。为解决这个问题,文献^[29-30]提出了机电-电磁暂态混合仿真的解决方案,传统交流电网部分采用机电暂态仿真,涉及到换流阀装置则采用电磁暂态仿真,通过机电电磁仿真接口协调。但电力电子设备数量众多,电磁暂态建模工作量大,仿真计算复杂度高,为降低工作量和计算量,在不考虑换流阀故障时,可只针对新能源机组的功率控制方式进行建模仿真,并采用简单的单机倍乘法进行新能源场站级建模^[31]。

时域仿真模型优点在于结果直观且精确,缺点在于建模工作量大、计算复杂度高、求解速度较慢。随着新能源占比的提高,其准确性和求解的快速性之间的矛盾越来越显著。一般适用在系统离线分析中,或作为其他分析方法准确性的基础参考。

1.1.2 基于网络-节点模型的分析法

网络-节点模型考虑频率节点分布特性,仅在必要的假设简化下,将系统建模为由电网拓扑代数方程和状态节点微分动力方程组成的高维微分代数方程,求解频率特征量或利用数学方法直接分析频率稳定性。相关的研究较少,通常用于分析控制律已知的系统。根据所用数学方法可分为2类:一类是工作点线性化法;一类是直接利用非线性方法进行分析。

线性化方法将频率动态描述为状态向量增量形式的线性定常微分方程,分析多机系统频率动态过程^[32-34]。正常运行期间预计负载变化很小,引起功角的变化范围也很小,除扰动后短时间内系统响应较剧烈外,大多数时间内系统的响应比较平稳,故线性化的假设是可以接受的^[33],但是在电网受到较大扰动后,暂态过程中系统状态可能会远离平衡点而产生较大偏差^[35]。

非线性分析法保留频率动态描述中的非线性,

利用数学方法直接分析频率稳定性。根据系统的控制律是否需要全局信息，可进一步将非线性法的模型划分为基于集中信息和基于分散信息的两类。基于集中信息的网络-节点模型直接分析法主要用于采用分散优化控制法^[36-39]、状态反馈精确线性化^[40]等设计控制律的系统。基于分散信息的网络-节点模型直接分析法主要用于采用多智能体法^[41-42]、将交互项处理为节点扰动的鲁棒控制^[43]、通过观测器进行补偿的自抗扰控制^[44-45]等设计控制律的系统。

基于网络-节点模型的直接分析法优点在于可以兼顾准确性和快速性，易于扩展；缺点在于未形成广泛认可的统一控制-分析理论体系，缺乏支撑系统频率稳定的指标提取方法、难以为系统频率控制策略的制定提供参考，且以其为分析基础设计的控制方法复杂度通常较高。同步机机械功率控制难以跟踪期望控制输入，对于具有快速调控功率能力的新能源电源来说却可能实现，基于分散信息的网络-节点模型或更适用于新能源高占比系统。

1.1.3 基于聚合等效模型的解析分析法

聚合等效模型基于一致频率假设，舍弃对不同区域频率动态的反映，将同步机和新能源分别聚合，组成单机或多机模型，利用解析算法求解，期望得到频率响应曲线的时域表达。

2 种主要聚合分析模型是平均系统频率(average system frequency, ASF)模型^[46]和系统频率响应(system frequency response, SFR)模型^[47]。ASF 模型仅采用统一频率假设，仍保留了各机组调速系统机械频率的独立响应，将输出机械功率加在一个等值转子上。ASF 模型是一种不完全的聚合模型，具有高阶非线性的特点，需使用逐步积分的方式求解，实用性较为局限。ANDERSEN 提出 SFR 模型时，进一步将固定形式的原动机调速系统聚合等效成一个二阶线性模型，如图 2 所示。SFR 模型降低了系统阶数，增强了其应用于系统分析的实用性。文献[48]详细分析了含同步机异质调速环节电力系统 SFR 模型参数聚合方法。SFR 模型属于线性系统模型，在电力系统频率分析中得到了广泛应用^[49-53]。

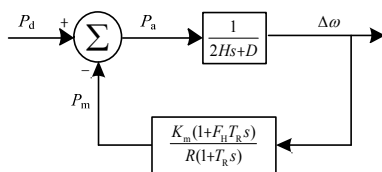


图 2 系统频率响应模型

Fig. 2 System frequency response model

SFR 低阶模型进一步将同步发电机的机械功率调节效果采用一阶惯性环节来近似^[33]，即：

$$\Delta P_m = \frac{-K_G}{1+sT_G} \Delta \omega \tag{1}$$

其中：

$$K_G = k_G \frac{P_{GN}}{\omega_N}$$

式中： K_G 为发电机功频特性系数； P_{GN} 为发电机额定功率； ω_N 为额定频率； T_G 为原动机调速器综合时间常数。

SFR 低阶模型频率动态数学描述为

$$\frac{d\Delta \omega}{dt} = -\frac{1}{T_J} (D\Delta \omega + \frac{K_G}{1+sT_G} \Delta \omega + d) \tag{2}$$

式中： T_J 为转子惯性时间常数； D 为等效阻尼； d 为扰动电磁功率。

新能源电力系统频率分析聚合模型中同步机组主要按照 SFR 模型聚合，惯量、调频系数、调频时间常数及备用容量在正常运行过程中认为不变。新能源机组按照逆变器控制方式划分成电压源型虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)模型或电流源型功率注入模型。前者聚合与分析方法与传统同步机类似；后者在 SFR 模型中对同步机转速即系统频率的影响方式是，通过与同步机机械功率变化量叠加共同抵消不平衡功率，相当于改变了系统的功频特性，其聚合方法需要结合功率控制形式具体分析^[54-60]。文献[61]考虑死区和限幅环节改进了 SFR 模型，但同时加入的非线性环节使时域解析解难以获得。也有研究从基于参数辨识的改进 SFR 模型出发，增加频率动态分析的精度^[62]。

为兼顾节点频率的时空分布特性，文献[63]建立了两机模型，并求解了频率动态的解析解。也有学者提出在简化成多区域交互的基础上，将数学分析与模拟样本的回归方法相结合，用混合解析-数值的方法求解，分析得到了线性不等式形式的稳定性条件^[64-65]。

聚合等效模型优点是计算复杂度低、快速直观、便于提取系统频率稳定指标，但缺点是在高比例新能源电力系统中该模型的准确性会受到较大影响。除面临一致频率假设失效造成的准确性降低的风险外，随着调频资源响应方式的多样化，按原方法聚合等效的准确性也将降低，且当前缺乏更准确的聚合方法研究。可以通过聚合成多机模型来提高分析精度，但同时也使得计算复杂度提高，时域解析解难以获得。高比例新能源电力系统中聚合等

效模型分析准确性和解析计算难度的矛盾显著。主要适用于电气联系紧密、机组调频响应方式相似的系统，或用于系统整体频率变化趋势的分析。

1.2 黑箱模型

以数据驱动法为代表的黑箱模型通过机器学习结构求解，首先基于各种采样或测量技术、或者数值仿真获取大量数据，然后通过人工智能构造映射关系，最后通过特征提取获得有效结论。使用人工智能技术求解的数据驱动法可以脱离复杂物理机理的数学描述，适用于处理特征不明显、关联性强的规模多维数据，可以从数据角度揭示频率问题的关联特性，可以做到良好的非线性函数逼近^[66]。

当前数据驱动法在频率稳定领域取得了不少研究成果，其求解所用的机器学习结构可分为以支持向量机、决策树等为代表的浅层学习结构和以深度信念网络、多层极限学习机等为代表的深度学习结构^[66]。文献[67-68]利用支持向量机实现对频率预测。浅层结构在解决简单或有良好约束的问题中有效，但在特征维数较高时会导致计算量呈指数倍增长的维数灾现象^[66]。深度学习结构通过构建含多层隐含层的人工神经网络模型，可将样本数据特征从原始空间变换到新的特征空间，得到大量具有代表性的特征信息，具有强大的非线性映射能力，能够表征复杂函数，提高预测精度和泛化能力^[69]。文献[70]基于深度信念网络实现了快速准确地对惯性中心频率曲线的预测；在此基础上，文献[71]实现了对频率最大偏移量及其发生时间的预测，并提高了预测精度。文献[69]提出一种基于多层极限学习机的频率安全在线评估方法，并研究提高了预测精度、速度和泛化能力。数据驱动法在高比例新能源电力系统频率分析中仅需要适当调整数据的输入

特征，应用条件相较于传统电力系统没有发生根本性改变，相较于其他方法，其受高比例新能源电力系统改变条件的影响更小。现如今，高比例新能源电力系统中以通信技术和相量测量单元为基础的广域测量系统发展迅速，可以为数据驱动模型提供大量的数据支持^[72]。但由于泛化能力、可解释性问题及模型参数选择和优化问题等限制，数据驱动法在电力系统中尚未得到广泛应用^[66]。

近年来，数据与知识驱动的融合概念被提出，可以增强可解释性、提升实际应用中的效率和性能^[73]，在解决小样本问题，提高频率预测精度方面已取得一定成果^[74]。文献[75]将 SFR 模型和极限学习机模型相结合，提高了频率动态预测的精确性。但当前数据与知识联合驱动方法的应用，主要按照研究人员的经验进行方法选择，并通过场景应用结果说明方法的有效性，缺乏严格的理论证明，也缺乏相关的理论指导数据与知识联合模式的选择优化^[73]。高比例新能源电力系统的复杂度大幅提高，按照经验选择的方法会降低数据与知识联合驱动方法适用性，且优化困难可能导致巨大的优化工作量。

以数据驱动法为代表的黑箱模型可以较好地适应新型电力系统频率分析的大规模非线性特征，但仍存在关键理论和技术问题亟待突破，未来具有较大的应用潜力。在频率稳定领域，当前主要应用于设置预想故障集下的频率稳定预防控制优化，负荷频率控制的离线优化协调控制策略以及频率的紧急控制方面，频率校正控制的在线应用相关研究则相对较少^[66,76]。

表1中总结对比不同暂态频率稳定分析模型的精确度、计算速度、适用场景及在高比例新能源电力系统中受影响的痛点。

表1 暂态频率稳定分析模型及方法对比

Table 1 Comparison of transient frequency stability analysis models and methods

分析模型	时域仿真	网络-节点模型		聚合等效	黑箱模型
		使用集中信息	使用分散信息		
结构详细程度	详细		较详细	简化	—
精确度	精确		较精确	基本精确	与样本相关
求解方法	数值计算		解析	解析	机器学习
求解结果	频率响应曲线		是否稳定	频率响应曲线	频率特征或是否稳定
计算速度	慢		较快	快	快
控制方式兼容性	任意兼容		结合具体控制分析	结合具体控制分析	任意兼容
可否提取系统稳定指标	否	否	否	可	否
模型控制器复杂度	任意	复杂	较复杂	较简单	任意
适用场景	离线分析、验证	规模较小系统	采取一定控制律的系统、高比例新能源系统	电气联系紧密、机组功率响应形式相似	网络拓扑和运行方式不变的系统
痛点	精度与速度的矛盾	实时全局信息难以获取	难以以为系统提供稳定指标	面临聚合精度问题和假设失效问题	自身关键理论和技术问题

由表1可以看出,受状态量大幅增多影响,时域仿真模型精度与求解速度的矛盾加剧,在高比例新能源电力系统中依然适合于离线使用。使用集中信息的网络-节点分析模型则因全局信息实时获取难度增加而受到限制。使用分散信息的网络-节点分析模型较有应用前景,但当前发展不足,缺乏统一标准,难以为系统层的调频控制提供指标参考。聚合等效模型则因调频资源异质化(“调频资源异质化”指逐渐出现具有不同特征的调频资源)、频率节点分布特性面临聚合精度问题和假设失效问题。黑箱模型若随着技术发展能克服自身理论和技术问题,则可以较好地适用于高比例新能源电力系统。

2 调频控制方法

本文主要聚焦大电网在传统一次调频作用的较短时间尺度内的控制方法。值得注意的是,风电和光伏大规模接入系统引起的频率问题特征差异较大;且系统调频资源还包括参与频率响应的需求侧灵活性资源、储能资源等,它们具有不同的资源特性;但它们参与调频本质上仍是按照一定调频策略进行,由于本文主要关注的是功率控制策略,故下文未对它们做明显区分。

传统大电网的调频控制结构是发电厂站采用分散反馈控制、系统层采用关键指标控制的分散递阶控制结构。发电厂站的调频控制是基于本地频率响应的分散自治反馈控制。系统层的控制则采取控制一次调频备用容量在一定范围内的集中分析控制方式。本文延续大电网分散递阶控制的思路,自上而下地总结当前从系统层到厂站层的调频控制策略。首先,分析系统层调频控制策略主要考虑因素,然后梳理厂站层的主要调频控制方法,根据所依赖的分析模型对比考察不同方法的适用特性,归纳厂站层调频控制策略对系统层调频控制策略制定的影响和价值。

系统层面的调频控制指的是系统调度控制,用以指导规划分析、机组安排和调度运行,由系统下达控制指令。厂站层面的控制指的是底层厂站具体的运行控制,是厂站调频的实现方式,由厂站做出控制决策。根据控制策略的制定是否需要收集全局信息,可分为集中控制和分散控制。

2.1 系统层调频控制方法

系统层调频控制往往采取频率安全评估的思路,考察一定扰动下频率偏移最大值和准稳态值是

否超出人为给定的门槛值。在制定常规调频控制策略时,主要采取聚合等效模型分析频率动态,得到备用容量充足假设下的频率稳定性的量化指标体系,以配置备用容量和控制量化指标为主要手段。

2.1.1 传统的系统层调频控制方法

假设备用容量充足,在给出系统受扰功率 $d=\Delta P_{L0}$ 后,基于简化低阶SFR模型,可解出频率的时域表达式^[33]:

$$\Delta\omega(t) = -\frac{\Delta P_{L0}}{D+K_G} [1 - 2A_m e^{-\alpha t} \cos(\Omega t + \varphi)] \quad (3)$$

$$\text{式中: } \alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{T_G} + \frac{D}{T_J} \right); \Omega = \sqrt{\frac{D+K_G}{T_G T_J} - \alpha^2}; A_m = \frac{1}{2\Omega T_J} \cdot \sqrt{(D+K_G)K_G}; \varphi = \arctan\left[\frac{1}{\Omega} \left(\frac{D+K_G}{T_J} - \alpha \right)\right]。$$

根据式(3)可得到准稳态频率的值为

$$\Delta\omega_\infty = -\frac{\Delta P_{L0}}{D+K_G} \quad (4)$$

频率最低点时刻为

$$t_m = \frac{1}{\Omega} \arctan\left(\frac{2T_J T_G \Omega}{DT_G - T_J}\right) \quad (5)$$

将式(5)代入式(3)即可求得最大频降 $\Delta\omega_{\max}$,可用于快速分析频率安全。最大频降与系统阻尼 D 、发电机功频特性系数 K_G 、转子惯性时间常数 T_J 和原动机调速器的综合时间常数 T_G 这4个参数有关,当 D 、 K_G 增大或 T_J 、 T_G 减小时最大频降将减小。准稳态频率与 D 和 K_G 这2者的和成反比。

SFR简化分析中,系统的频率特征仅与系统阻尼 D 、发电机功频特性系数 K_G 、转子惯性时间常数 T_J 和原动机调速器的综合时间常数 T_G 这4个参数有关。由于阻尼是系统的性质,故备用容量充足的情况下可以由 K_G 、 T_J 和 T_G 组成频率稳定性的量化指标体系,即频率稳定性水平体现在系统总惯量、调频系数和调频时间常数上。系统总惯量由开机方式决定,且调频系数和调频时间常数在初始整定后便认为不再改变,因此系统正常运行情况下,决定频率关键特征的指标均为定值。故在备用容量充足的前提下,系统频率特征量与故障功率是线性关系。

同步机调速系数和调速系统时间常数基本固定,在频率安全范围划定后,因系统的惯性时间常数与同步机的调速系统时间常数相当,故调速系统改变的机械功率来得及在频率偏差超出稳定范围之前抵消扰动功率,可以将最大频率偏差限制在安全范围内。所以,根据准稳态频率留取系统备用容量,

成为了传统电力系统频率控制策略制定中的重要环节。在频率稳定控制架构下，系统承受扰动范围有限，同步机机械能量的变化范围有限，系统层的频率控制一般只需机组备用容量满足一定的裕度要求即可，一般留取为同步机额定容量的6%即可。

2.1.2 新能源电力系统的系统层调频控制研究

当前新能源电力系统的系统层常规调频控制策略研究的主要思路是，将具体控制策略聚合等效出系统阻尼、功频特性系数、惯性时间常数和机械功率的综合时间常数进行分析，使频率最低点等特征值满足频率稳定要求。

在如图3所示由单同步机和单新能源向负荷供电的聚合等效系统中进行频率响应分析，以同步机容量为基准容量，新能源占比为 k ，负荷为 $1/(1-k)$ ，同步机采用式(1)描述的SFR低阶模型，设置 $k_G=20$ ， $T_G=10$ ， $D=3$ ， $T_J=6$ ；新能源采取下垂控制，设置下垂比例和响应时间常数分别为-20和1.5，忽略新能源阻尼。假设调节功率充足，在系统受到电磁功率扰动为 $0.1/(1-k)$ 时，可画出如图4所示的不同新能源占比下的系统频率响应曲线。

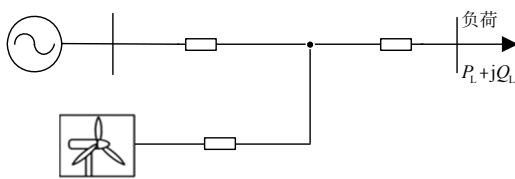


图3 单同步机单新能源系统

Fig. 3 Stand-alone power system with single renewable energy generator

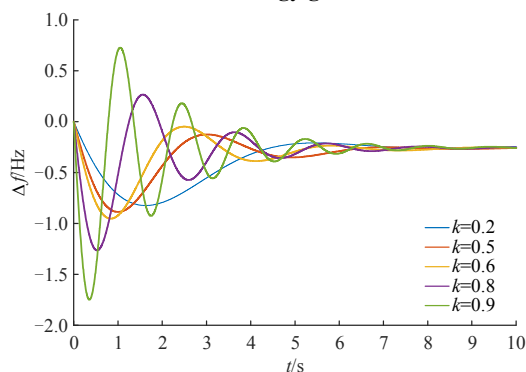


图4 不同新能源占比下的系统频率响应曲线

Fig. 4 System frequency response curves under different proportions of renewable energy

由图4可以看出，在新能源占比超过80%时，暂态频率最低点已超出1.2Hz，不再满足稳定要求。在调频系数和调频时间常数固定的条件下，系统惯量降低到一定程度后，即使备用充足，也无法保证暂态过程中的安全性^[77]。电流源型调频资源的功率

调节具有响应快速性，允许异质化的控制策略（“异质化的控制策略”指逐渐出现的具有不同特征的控制策略）。除备用容量外，高比例新能源电力系统控制策略的制定还需考虑功频特性系数、惯性时间常数和机械功率的综合时间常数等等效参数之间的配合关系，因而更为复杂。

在备用的留取方面，新能源与同步机按照容量百分比留取备用的方式不同。为适应新能源和负荷的波动性，且兼顾新能源的消纳水平，文献[78]提出一种基于风电动态减载率的优化模型。文献[79]提出一种日前一日内两阶段多备用资源鲁棒优化模型，提升电力系统运行灵活性的同时促进风电消纳。文献[39]提出一种基于频率稳定约束最优潮流模型的发电再调度方法，以保证突发事件后的动态频率稳定性，并产生更经济的调度和一次调频备用容量分配。新能源备用留取策略多考虑经济性进行优化求解，往往需要特定的场景和运行方式，无法必然保证运行方式灵活多变的大电网暂态频率安全。

从惯性时间常数角度研究系统层调频控制策略的文献较多，主要从系统惯量评估^[56,80-82]、频率稳定约束下临界惯量计算^[83-86]这2个方面展开。部分文献以聚合分析模型为基础，从功频特性系数方面进行了研究^[58,87]。当前的研究往往以研究单一惯量或惯量和功频系数协调对频率稳定控制的作用居多，在其他指标不变的假设下进行。虽然可以较直观地得到相关因素的影响效果，但从全参数配合的角度进行系统频率稳定的综合研究尚缺。且鲜有学者研究机械功率的综合时间常数这一因素，没有较好地利用电流源型资源调频的灵活性和快速性改善系统频率系统响应特性。

少量文献探索了新能源电力系统频率稳定性新的性能指标。文献[88]介绍了逆变器高占比电力系统的频率稳定关键性能指标的概念，将系统动能、总发电量等关键系统变量的变化映射到频率变化率和频率最低点等频率性能的变化上，通过离线仿真的方法求解该指标，用以估计频率性能的变化。文献[89]提出了百分比形式的频率安全指标，以指定与不安全(0%)、安全(100%)和绝对安全(200%)条件的相对距离。目前，新的性能指标依然从关键频率特征值提取，对调频资源功率控制灵活响应的包容性未知，探索工作尚处于起步阶段，尚未形成广泛认可的标准体系。

2.2 厂站层调频控制方法

传统厂站层控制主要指同步机组的惯量响应和一次调频控制，是基于本地量的分散反馈控制。同步机组具有相似的功率控制形式，对聚合等效分析模型契合度较好，控制参数的整定一般基于聚合等效的频率分析。而新能源厂站的具体功率控制形式多样，本节对其进行梳理，以明晰如何建立其与系统层的联系。

近年来，随着新能源占比不断增多，新能源厂站参与调频响应的控制策略的研究成果十分丰富。按照功率输出的控制方式，可分为电压源型厂站和电流源型厂站两大类，前者主要指由采用 VSG 技术的新能源机组组成的厂站，后者主要包括采用电流源型逆变器控制技术的新能源厂站、储能电站与部分可控直流换流站等，在一定假设下通常可按照功率注入模型处理。

2.2.1 电压源型厂站

VSG 基本原理是在并网变流器控制中引入同步机转子运动方程及电磁暂态方程，使其模拟同步机的电压源特性^[90-91]。VSG 调频效果整体上和同步机相似，可提供惯量，可参与故障瞬间的扰动功率分配，自然应激支撑频率^[92]。VSG 可提供一次调频，但需要对应一次调频能力预留功率备用。VSG 调频能量来源包括储能单元和风机转子动能，为防止故障瞬间较大的不平衡转矩造成机械冲击，目前风电 VSG 均加装一阶惯性环节进行缓冲，实际上是模拟了一次调频启动较慢的特征^[92-94]。

以 VSG 为基础的控制策略研究集中于参数和性能优化方面。文献[95]提出一种考虑机组间调频能力差异的功率协调虚拟惯量控制方案，在充分发挥机组调频能力的同时避免二次跌落。文献[96]提出一种适用于配电网的根据输出频率自适应改变惯性的控制策略，以解决固定惯量常数带来的输出平稳性与动态响应速度难以兼顾的问题。文献[93]深入分析了 VSG 的惯量支撑功能及物理意义，辨析了 VSG 惯量支撑功能与一次调频功能的定位区分，最后指出，系统更需要 VSG 的一次调频功率的持续支援作用。

当前电压源型厂站的功率输出模式模仿同步机的 2 阶方程，可以较好地适用于聚合等效分析模型，为系统层面的控制提供参考指标，但由于 VSG 算法的复杂性，振荡问题难以解决，实践较为受限^[97-99]，且固化的功率输出模式不能充分发挥新能源功率

控制的灵活性，难以进行快速调频功率支撑。

2.2.2 电流源型厂站

因 VSG 的实际应用受限，目前系统层的调频控制研究多以电流源型逆变器控制技术为基础。电流源型厂站参与调频，是通过改进逆变器有功控制环节，通过改变有功出力参考值，快速响应系统频率变化^[92]，输出功率控制形式灵活，可以在较短时间内为系统提供调频能量。

基于黑箱分析模型的控制策略需要边界确定的封闭环境以及具有一定的容错性条件，在系统网络拓扑和运行方式发生改变后，训练得到的预测和控制模型将面临失效风险^[100-101]，相关研究较少涉及大电网电流源快速响应的控制方面。电流源型厂站的调频控制方法一般基于白箱模型分析，常见控制形式有基于聚合等效频率分析模型的功率阶跃控制、虚拟惯性控制、下垂控制、综合惯性控制和厂站间协调与优化控制，基于网络-节点频率分析模型的使用集中信息和使用分散信息的调频控制。

1) 功率阶跃控制。

文献[102]提出了短时功率超发控制，其原理为在频率下降时，阶跃式地增加额外的有功参考信号并持续一定时间，通过释放风机转子动能短时增加有功输出，当风机转速下降到一定程度时(一般为 0.7pu)时阶跃式降低有功参考信号，吸收风能和电网有功来恢复转速。这种方法响应速度快，但在转速恢复时间可能造成系统频率二次跌落，需经过参数的优化配合才能较好地发挥效果^[103]。

功率阶跃控制方法一般基于聚合等效模型分析，可迅速支撑频率，但在应用到全网时，控制参数的优化与整定将是一个复杂的课题。

2) 虚拟惯性控制。

虚拟惯性控制是在逆变器有功控制部分引入和频率变化率相关的有功参考信号，建立输出功率和频率的控制关系，使功率能响应频率变化^[103]。有功参考信号为

$$\Delta P = -K_f \frac{df}{dt} \quad (6)$$

式中 K_f 为比例系数。

虚拟惯性控制主要适用于抑制频率快速变化。对于风电场，在造成风机转子减速后，调节能力就会受到影响，调节时间一般不超过 6s^[104]。之后，由于最大功率跟踪模块的作用，转子会吸收有功以恢复转速，易发生频率二次跌落。但此问题可以通

过适当的协调策略被抑制^[95,105-107]。此外,文献[108]将自适应模糊控制策略引入虚拟惯性控制中,在控制频率偏差方面也取得了较好效果。为应对常规锁相环频率信号微分计算的谐波放大问题,需增加一阶低通滤波器环节,但这一环节的延时会影响虚拟惯性的响应速度,文献[109]提出利用二阶广义积分器—锁相环检测电网频率微分信号,避免了频率微分运算,但检测的频率微分信号易被电网电压干扰。鉴于此,文献[110]提出了基于二阶广义积分器—锁相环的4种改进方案,对储能变换器的虚拟惯量响应性能进行了优化。

虚拟惯性控制是基于本地信息的分散反馈控制形式,可分散应用到全网,可迅速支撑频率,避免较大的频率变化率,但存在响应速度和频率微分信号干扰问题导致的准确度之间的矛盾。

3) 下垂控制。

下垂控制的基本原理是模拟同步发电机一次调频的功频静态特性,将正比于频率偏差的有功变化信号引入到有功功率参考值中,也称比例控制、斜率控制^[111],即

$$\Delta P = -\frac{1}{R} \Delta f \quad (7)$$

式中 R 为常数。

下垂控制引入的是频率偏差信号,是有差控制,能对频率最低点进行较好支撑,但功率支撑速度相对于虚拟惯性较慢。文献[54]将以下垂形式控制的直流频率限制器应用于光伏高渗透率电网。文献[112]提出了以下垂控制为例的光伏快速功率响应支撑系统频率的方法。文献[16,113-115]通过修改新能源电站功率控制逻辑完成下垂控制,证明了新能源电站可参与电网快速频率响应,且响应特性优于火电。新能源采取快速频率响应模式,在频率变化时快速升降功率,实际效果等效于调频系数灵活可控、时间常数小于同步机的一次调频,属于本地反馈量的分散控制。目前可以做到响应滞后时间低于2s,响应时间低于12s,调节时间低于15s^[16,116]。实际功率响应一般伴随着一阶惯性环节,主要因为频率检测延时和控制延时等。随着系统惯量的降低,控制系数需要与响应速度参数相配合才能发挥调频控制作用。在响应速度固定的情况下,下垂控制的系数需要非线性增大才能保证安全;反之,若下垂系数不变,响应速度需要非线性缩小才可能保证安全。

同时,下垂控制的控制效果与新能源机组运行状态紧密相关。风场控制效果受风速影响显著,固定系数下垂控制不能充分发挥风场调频能力。为此,有学者提出了根据高、中、低风速采取不同的方式整定下垂控制参数的方案^[117]。还有研究提出与减载水平结合的变下垂控制策略^[118-119]。文献[120]提出一种使用灵活的功率点跟踪的分布式光伏逆变器下垂控制策略。部分文献为改善频率特性,提出了自适应的下垂策略。文献[121]基于描述函数的非线性奈奎斯特稳定性判据,研究给出了常规电源和光伏电站的调频增益稳定范围。文献[122]在混合多馈入交直流系统中,提出一种协调下垂的分散式紧急频率控制策略。文献[123]针对多端高压直流系统中的电压源变流器提出一种自适应非线性下垂控制策略,可同时提高一次调频响应特性和暂态稳定性。文献[124]基于单机系统分析,提出了基于频率安全轨迹规划的自适应下垂控制策略,与难以评估的系统干扰和惯性/阻尼脱钩,保证频率稳定性。

下垂控制是基于本地信息的分散反馈控制形式,控制实现简单,可分散应用到全网,可避免较大的频率最低点。下垂控制功率输出通常可表达为一定时间常数下的惯性环节,响应时间一般在秒级以上,固定参数的下垂控制难以充分发挥新能源的调频能力。

4) 综合惯性控制。

综合惯性控制即虚拟惯性控制和下垂控制的结合,使有功功率既可以快速响应频率变化率,又可以对频率最低点具有支撑效果,文献[125-127]对该方法进行了实现,具有较好调频效果。文献[128-132]分别针对不同场景,提出了具有一定改进效果的综合控制策略的设计实现方法。

综合惯量控制是与同步机相似的控制形式,固化了新能源功率输出模式,此思路与新能源可用调频能量有限、功率控制灵活的特性不匹配,新能源功率快速可调的灵活性可进一步开发,更优的调频控制方法有待探索。

5) 协调与优化控制。

目前,电流源型厂站调频控制的协调一般为了配合同步机主导的调频体系,提升安全性。调频优化控制方面的研究按照优化目标,基本可划分为提升频率动态品质、充分发挥调频能力、提升系统频率稳定性3个方面。

协调控制一般通过设计新能源厂站的控制策略,使其辅助同步机或与同步机配合,提升电网安全性。文献[133-134]通过建立通信,设计了风电为辅、同步机兜底的一次调频联合控制系统。文献[135]提出了分布式调频资源协同参与电网一次调频的控制方法。文献[136]建立了考虑非线性约束的包含大规模风电集群及传统电源的多区互联系统频率响应模型,提出分布式模型预测控制策略指导区域内风场的控制,能够根据电网全局状态信息及风电预测信息实现与传统电源的协调配合。文献[137]提出一种光储系统参与电网调频/调峰的协调控制策略。文献[116]按照“调频权责明晰、各类型机组协同配合”的总体思路,构建了多调频资源协调控制的快速频率响应参数设置方案,较好统筹了各类型电源的快速调频能力。

提升频率动态品质的优化控制主要以风电避免频率二次跌落的研究为主。文献[138]提出一种多时间尺度协调优化策略,以解决系统等效惯量不足及模拟惯性导致二次频率跌落的问题。文献[139-140]从控制方法的角度入手,实现了提高防止频率二次跌落的目标。文献[107,141]通过设计不同空间的风电机组协调控制,使频率具有更优越的动态品质。

充分发挥调频能力的优化控制主要包括充分利用具有不同调频能力的设备和降低设备减载率的优化研究。文献[95]提出一种考虑不同风速区的风电场虚拟惯量协同控制策略,充分发挥各机组调频能力。文献[142]提出一种根据减载量调整风电下垂系数的减载功率优化分配方案,在平均风速较低的情况下具有明显优势。文献[143]采用变减载系数,对下垂环节进行变系数处理,以减少因双馈风机限功率运行造成的弃风。

部分研究为厂站控制设置的优化目标为电网频率指标,尝试提升系统频率稳定性。文献[144]设计了多端直流互联系统频率稳定分布式协调控制策略,以减小各互联电网频率偏差。文献[145]提出一种可保证频率稳定性同时兼顾电网安全约束的新能源一次调频参数设置方法。文献[146]提出了解决风机何时参与系统调频以及需要参与多长时间调频问题的智能方法建模和求解思路。文献[147]使用模型预测控制框架设计了实现低惯量电力系统频率稳定性的逆变器功率控制策略。文献[148-149]对新能源控制形式跳出传统同步机控

制框架做了初步尝试,提出一种以频率最低点为优化目标的利用转子动能的风机辅助调频策略。文献[38]使用非线性网络保持模型,设计了分布式的频率优化控制。

以上协调与优化控制做出控制决策的相关分析过程虽需使用到全局信息,但只是将相关信息作为优化协调的参数或限制条件,优化某些特定的目标,其控制指令由厂站给出,因此属于厂站层控制方法。现有相关研究的分析或是基于全网新能源的整体聚合调频特性,没有涉及不同位置、环境因素等对新能源调频效果的影响;或是基于全局信息的集中优化求解;或是要求网络保持不变,在高比例新能源电力系统中的适用性受限。

6) 基于网络-节点频率分析模型使用集中信息的厂站调频控制。

文献[36]提出一种基于扰动观测器的分布式调频控制方法,采用扩展卡尔曼滤波器作为观测器来估计包括总干扰在内的系统动态状态,基于最小状态估计误差和状态跟踪误差能量设计优化控制器,所提方法在数学上对参数和非参数不确定性具有鲁棒性,可实现频率稳定要求。文献[37]提出一种新颖的分布式分散固定时间频率优化和励磁控制框架,通过基于固定时间达到一致的分布式频率优化控制和固定时间分散式励磁控制实现,对通信故障具有鲁棒性,但其控制器的设计需电网的全局信息,且只适用于结构保持不变的系统。

基于网络-节点频率分析模型的使用集中信息的厂站调频控制,控制器的设计往往需要全局信息或依赖保网模型的全局网络信息,而未来高比例新能源电力系统状态量大幅增多,且新能源的波动性可能导致网络模型变化,影响该方法的适用性。

7) 基于网络-节点频率分析模型的使用分散信息的厂站调频控制。

文献[41]提出将基于多智能体系统的自律分散控制应用于高压大容量交直流混合电网中,降低了通信要求,具有自治性和自主性的特点。文献[42]提出了一种分布式有限时间调频控制框架,充分利用本地信息,对通信延迟没有限制。文献[43]构建了一种新的 H_∞ HVDC 分布式静态输出反馈控制器方案,使用最近电源区域的本地测量和来自相关子系统的信息,实现了减小不同区域间频率差异的鲁棒分布式 HVDC 控制。文献[44]将滑模控制引入互联电力系统,利用广义扩展状态观测器和分数阶滑

模控制,实现了考虑超导储能和风场模型辅助调频策略下通过控制发电机组的调速器来最小化频率偏差。文献[45]提出一种由在线频率特性估计器和在线优化控制器组成的无模型储能系统控制方案,以实现在大扰动下灵活自适应的系统频率支撑,该方法无需电力系统参数,根据局部信息即可实现即插即用,并表现出对不同运行条件更强的适应性。

基于网络-节点频率分析模型的使用分散信息的厂站调频控制具有可扩展性,控制器的设计所需信息较少,可以兼顾快速性和准确性,但对控制器要求较高,且实现方法不一。目前仅应用于理论分析,难以为系统层面的调频控制提供参考指标,但该控制形式具有应用于高比例新能源电力系统的潜力。

表2基于不同分析模型对2.2.2节所述的7种电流源型厂站调频控制方法进行了归纳,比较了其对于全局信息的需求、在大电网频率稳定分析中使用的分析模型,以及对系统调频控制能提供的价值。

表2 电流源型设备功率控制策略归纳比较

Table 2 Summarization and comparison of power control strategies for current source devices

控制方法	1)~4), 5) (部分)	5) (部分), 6)	7)
是否依赖全局信息	—	是	否
适用特性	较为实用,可分散扩展	实用性较弱	具有潜力
在大电网频率稳定分析中使用的分析模型	聚合等效模型	网络-节点集中模型	网络-节点分散模型
对系统层面控制策略的价值	可提供有价值的参考指标,但聚合准确性受损	有待控制标准成型后进行研究	有待控制标准成型后进行研究

由表2可以看出,前4种厂站调频控制方法可根据本地信息进行分散实现,具有可扩展性,一般较为实用;在分析大电网频率稳定性时一般对其进行聚合,使用聚合等效模型分析;可对系统层调频控制决策提供有价值的参考指标。但其对提升系统频率稳定性的效果均与所基于的聚合等效分析模型准确性密切相关,可从提高其聚合准确度的角度去改善其有效性。基于使用集中信息的网络-节点分析模型的厂站调频控制方法,因依赖全局信息和缺乏提供系统指标的能力而实用性较弱。基于使用分散信息的网络-节点分析模型的厂站调频控制方法,暂时缺乏对系统层控制提供参考指标的能力,但可扩展性强,具有较大的应用潜力。协调与优化

调频控制下系统的频率稳定性分析或者基于聚合等效模型,或者基于使用集中信息的网络-节点模型,特点与前述类似。

3 高比例新能源电力系统暂态频率稳定分析与调频控制的挑战与研究展望

在“双碳”目标的驱动下,我国提出要构建新型电力系统,即以交流同步机制运行、周边煤电支撑风光基地的高比例新能源电力系统。高比例新能源系统将出现新的特征,使暂态频率安全稳定问题越来越凸显。当前关于暂态频率稳定分析与调频控制方法的研究,已取得一系列进展,但多以传统分析模型与调频控制方法为基础,对高比例新能源电力系统新特征的适用性降低,尚未形成新的成熟与完善的系统理论和方法体系。下面首先总结提炼高比例新能源电力系统频率分析模型与调频控制的变化特征和其带来的挑战,并对未来可能的发展思路进行了2点展望。

3.1 暂态频率稳定分析与调频控制面临的挑战

每种调频控制均以某种频率稳定分析模型为基础。而暂态频率稳定性分析往往采用评估在一定控制形式下,一定扰动发生后的频率最低点、准稳态频率等频率特征值是否在稳定边界内的方法实现^[25],所分析问题的本质是微分方程所描述的动态问题^[150]。从描述频率动态的微分方程出发,可得到高比例新能源电力系统在暂态频率稳定分析与调频控制主要面临以下4个方面的挑战。

1) 相对于同步机,新能源机组功率小,提供同等发电量所需的新能源机组数量远多于同步机数量,这将导致系统频率分析中动态节点数量的大幅增多。新能源发电节点的控制环节复杂,阶数高、多为非线性环节,会大幅增加了描述系统频率动态过程所需状态量的维度和非线性因素,导致所需微分方程的数量和复杂度大幅增加,对频率稳定分析产生重要影响。具体表现为,使时域仿真法的模型搭建工作量和计算时间大幅提高,使基于网络-节点模型的分析法的网络阶数更多、节点模型复杂度更高;非线性环节不具有齐次性和可叠加性,聚合等效模型使用时势必要进行近似,影响其准确性;黑箱模型会因新能源机组的大幅增加而更难以集中准确获取系统的全状态数据信息,且系统拓扑及运行方式变化的可能性更大使其训练结果的失效风险增加。控制量大幅增多,则增加了集中控制

的输出通信负担。

2) 新能源机组由于功率控制的灵活性, 其参与调频的控制策略多样化, 机械功率响应形式与同步机不完全一致, 功率控制模式尚未形成一致的成熟标准。调频资源功率响应的异质化, 使描述频率动态的微分方程形式不统一, 使对调频功率进行聚合等效的准确性降低, 也影响时域仿真和网络-节点模型的建模和求解难度; 同时, 使厂站调频控制方法更难以对系统控制决策提供有价值的信息。

3) 因区域资源禀赋差异和系统惯量下降、惯量的电气空间分布差异化增加, 不同区域的电网频率在暂态过程呈现显著差异, 频率将不得不以多维向量的形式描述。这将提高求解频率特征值的难度, 影响频率稳定性的判定难度和分析结论的表达。同时导致不同区域调频资源的响应过程产生较大差异, 进一步加剧调频资源功率响应的异质化。

4) 系统惯性时间常数下降, 暂态过程加快、时间尺度缩短, 与同步机调速器时间常数失配, 甚至逐渐接近紧急控制的时间延迟, 多时间尺度耦合特性复杂。系统惯量降低到一定程度后, 即使备用充足, 调频系数和调频时间常数固定的同步机调频体系下的机械功率来不及补偿故障功率, 频率最低点更大且到来时间更早, 系统动态频率面临超限风险。因此除备用容量外, 高比例新能源电力系统还需考虑变调频系数、变调频时间常数的控制策略, 考虑它们与惯量等等效参数之间的配合关系, 因而更为复杂。

3.2 研究展望

3.2.1 异质调频资源的聚合等效分析

当前新能源电力系统中厂站层调频控制方法的研究, 仍以模拟惯量响应加一次调频的同步机控制体系的参数优化设计研究为主, 出现了不同形式和参数的控制策略。调频资源的多样化和频率响应的时空分布特性, 进一步增强了调频功率响应的异质化特性。从系统频率稳定控制的角度出发, 需将上述异质化的厂站调频效果聚合等效, 求解频率响应曲线和频率特征值, 提取用于频率稳定评估的低维指标体系。目前对厂站的异质化调频响应进行综合评估的准确有效方法缺乏, 有待深入研究。

高比例新能源电力系统的设备数量将大幅增多, 描述频率动态的微分方程数量及阶数和复杂度均大幅增加, 若仅从数学的角度出发进行等效聚合, 工作量和计算量均成为难题。电力系统数字化、

信息化、智能化进程加快, 为建设频率稳定智慧分析系统提供了一定支撑。数据驱动的思想, 可以很好的契合高比例新能源电力系统频率动态方程组复杂度提高的场景。该方法的解释性问题难以解决, 或可从模型驱动和数据驱动结合的角度出发, 对异质化调频资源响应下的综合效果进行等效聚合, 兼顾可解释性和高维计算的快速准确性。

3.2.2 考虑频率时空分布的模块化分散自治控制

新能源发电空间分布广、单体数量大、控制层级多、运行复杂, 高比例新能源电力系统的频率稳定问题涉及多时空尺度、多层次、多系统耦合, 运行与控制及其复杂。为规避集中控制的巨大通信负担及单点失效导致崩溃的风险, 可考虑对系统进行分层分区, 对底层单元进行结构化和规则化处理、使用基于本地信息和具有可扩展性的分散控制律, 并通过递阶控制结构以实现其在大电网内的协同, 从而保证系统的频率稳定。

电流源型调频资源响应的快速性和灵活性, 催生了不同的研究声音, 探索跳出模拟同步机调频思路的厂站层控制新方法, 其中基于分散信息的控制更适用于模块化和结构化的递阶控制结构。后续研究或可从分散控制的思路出发, 研究设备基于本地信息的分散自治控制策略, 并从控制规律中发现提取可用于衡量系统频率稳定水平的关键指标, 用于指导系统调频控制策略的制定。

一种可能的厂站分散调频控制方法的思路是基于不变集思想, 将厂站节点频率控制在频率安全的集合内。针对未来系统中海量新能源的特点, 或可采取部分聚合的思路进行模块化分散自治控制。

4 结语

“双碳”目标下, 我国电力系统将逐渐发展为高比例新能源电力系统。本文首先归纳现有暂态频率分析模型, 然后从系统和厂站2个层面梳理调频控制方法的研究现状, 并从分析基础出发归纳不同控制方法的适用性。最后总结高比例新能源电力系统暂态频率稳定分析与调频控制的特征变化和其带来的挑战, 并对未来可能发展思路进行了展望。希望本文能为高比例新能源电力系统暂态频率稳定分析与调频控制方法的改进提供有益参考。

参考文献

- [1] Goldman Sachs. Carbonomics: China Net Zero: The clean tech revolution[R]. The Goldman Sachs Group, Inc.,

- 2021.
- [2] 央视网. 习近平主持召开中央财经委员会第九次会议强调 推动平台经济规范健康持续发展 把碳达峰碳中和纳入生态文明建设整体布局[EB/OL]. <https://news.cctv.com/2021/03/15/ARTIFUhtqyI0GxogiEDWyY28210315.shtml>.
CCTV Network. Xi Jinping presided over the 9th meeting of the central financial and economic commission, emphasizing: promote the healthy and sustainable development of the platform economy, and incorporate carbon peak and carbon neutrality into the overall layout of ecological civilization construction[EB/OL]. <https://news.cctv.com/2021/03/15/ARTIFUhtqyI0GxogiEDWyY28210315.shtml>.
- [3] 中国电力企业联合会. 2021-2022 年度全国电力供需形势分析预测报告[R]. 北京: 中国电力企业联合会, 2022. China Electricity Council. 2021-2022 national power supply and demand situation analysis and forecast report [R]. Beijing: China Electricity Council, 2022.
- [4] 辛保安, 陈梅, 赵鹏, 等. 碳中和目标下考虑供电安全约束的我国煤电退减路径研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(19): 6919-6930.
XIN Bao'an, CHEN Mei, ZHAO Peng, et al. Research on coal power generation reduction path considering power supply adequacy constraints under carbon neutrality target in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 6919-6930(in Chinese).
- [5] 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(in Chinese).
- [6] 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(in Chinese).
- [7] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电力系统安全稳定计算规范: GB/T 40581—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
State Administration of Market Supervision and Administration of the People's Republic of China, Standardization Administration. Calculation specification for power system security and stability: GB/T 40581—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022(in Chinese).
- [8] 常焯骥, 刘娆, 巴宇, 等. 新能源高占比的特高压电网频率控制模式及性能评价[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 621-629.
CHANG Yekui, LIU Rao, BA Yu, et al. Frequency control mode and performance assessment in UHV Grid with high proportion of renewable energy resources[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 621-629(in Chinese).
- [9] 陈国平, 李明节, 许涛, 等. 关于新能源发展的技术瓶颈研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 20-26.
CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Study on technical bottleneck of new energy development[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 20-26(in Chinese).
- [10] EFTEKHARNEJAD S, VITTAL V, HEYDT G T, et al. Small signal stability assessment of power systems with increased penetration of photovoltaic generation: a case study[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(4): 960-967.
- [11] LIU Y, JIANG L, WU Q H, et al. Frequency control of DFIG-based wind power penetrated power systems using switching angle controller and AGC[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2): 1553-1567.
- [12] 唐西胜, 苗福丰, 齐智平, 等. 风力发电的调频技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4304-4314.
TANG Xisheng, MIAO Fufeng, QI Zhiping, et al. Survey on frequency control of wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4304-4314(in Chinese).
- [13] 曹永吉. 大功率缺额事故下电力系统频率稳定控制策略研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
CAO Yongji. Research on power system frequency stability control strategies under major disturbance[D]. Ji'nan: Shandong University, 2020(in Chinese).
- [14] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-8.
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-8(in Chinese).
- [15] 康重庆, 姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 1-10.
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power

- systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 1-10(in Chinese).
- [16] 马晓伟, 徐海超, 刘鑫, 等. 适用于西北送端大电网新能源场站快速频率响应功能的入网试验方法[J]. 电网技术, 2020, 44(4): 1384-1391.
MA Xiaowei, XU Haichao, LIU Xin, et al. A test method for fast frequency response function of renewable energy stations in northwest power grid[J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1384-1391(in Chinese).
- [17] YOU Shutang, LIU Yong, TAN Jin, et al. Comparative assessment of tactics to improve primary frequency response without curtailing solar output in high photovoltaic interconnection grids[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(2): 718-728.
- [18] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 985-991.
LI Mingjie. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 985-991(in Chinese).
- [19] 樊肖杰, 迟永宁, 马士聪, 等. 大规模海上风电接入电网关键技术与技术标准的研究及应用[J]. 电网技术, 2022, 46(8): 2859-2870.
FAN Xiaojie, CHI Yongning, MA Shicong, et al. Research and application of key technologies and technical standards for large-scale offshore wind farms connecting to power grid[J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 2859-2870(in Chinese).
- [20] 戴慧珠, 迟永宁. 国内外风电并网标准比较研究[J]. 中国电力, 2012, 45(10): 1-6, 11.
DAI Huizhu, CHI Yongning. Comparison study on grid codes for connecting wind farm into power system[J]. Electric Power, 2012, 45(10): 1-6, 11(in Chinese).
- [21] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电力系统安全稳定导则: GB 38755—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
State Administration of Market Supervision and Administration of the People's Republic of China, Standardization Administration. Code on security and stability for power system: GB 38755—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019(in Chinese).
- [22] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 并网电源一次调频技术规定及试验导则: GB/T 40595—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
State Administration of Market Supervision and Administration of the People's Republic of China, Standardization Administration. Guide for technology and test on primary frequency control of grid-connected power resource: GB/T 40595—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021(in Chinese).
- [23] 魏蒙希, 马宁宁, 王德林, 等. 基于时间差定位法的电力系统扰动源定位[J]. 中国电力, 2019, 52(12): 62-70.
WEI Mengxi, MA Ningning, WANG Delin, et al. Disturbance source location in power systems based on time difference of arrival[J]. Electric Power, 2019, 52(12): 62-70(in Chinese).
- [24] 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.
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(in Chinese).
- [25] 谢宇峥. 大范围频率偏移场景下电力系统频率稳定机理及协调控制[D]. 济南: 山东大学, 2021.
XIE Yuzheng. Power system frequency stability mechanism and coordination control with large frequency deviation scenario[D]. Ji'nan: Shandong University, 2021(in Chinese).
- [26] 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(in Chinese).
- [27] 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): 211-222.
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): 211-222(in Chinese).
- [28] 张程铭, 柳璐, 程浩忠, 等. 考虑频率安全的电力系统规划与运行优化研究综述与展望[J]. 电网技术, 2022, 46(1): 250-264.
ZHANG Chengming, LIU Lu, CHENG Haozhong, et al. Review and prospects of planning and operation optimization for electrical power systems considering frequency security[J]. Power System Technology, 2022, 46(1): 250-264(in Chinese).
- [29] 陈绪江, 张星, 田芳, 等. 含大量电磁直流模型的机电-电磁暂态混合仿真技术研究[J]. 电网技术, 2020, 44(4): 1203-1210.

- CHEN Xujiang, ZHANG Xing, TIAN Fang, et al. Electromechanical-electromagnetic hybrid simulation technology with large number of electromagnetic HVDC models[J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1203-1210(in Chinese).
- [30] 刘洪波, 边娣, 孙黎, 等. 交直流混联系统机电—电磁暂态混合仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 39-47.
- LIU Hongbo, BIAN Di, SUN Li, et al. Electromechanical transient-electromagnetic transient hybrid simulation of AC/DC hybrid system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 39-47(in Chinese).
- [31] DREIDY M, MOKHLIS H, MEKHILEF S. Inertia response and frequency control techniques for renewable energy sources: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 69: 144-155.
- [32] 韩英铎, 闵勇, 洪绍斌. 复杂扩展式电力系统功率频率动态过程分析[J]. 电力系统自动化, 1992, 16(1): 28-33.
- HAN Yingduo, MIN Yong, HONG Shaobin. Analysis of power-frequency dynamics in large scale multi-machine power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1992, 16(1): 28-33(in Chinese).
- [33] 闵勇, 陈磊, 姜齐荣. 电力系统稳定分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016: 180-199.
- YAN Yong, CHEN Lei, JIANG Qirong. Power system stability[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016: 180-199(in Chinese).
- [34] 刘玉生, 邝硕. 多地区电力系统频率和交换功率的分散最优控制[J]. 电力系统自动化, 1983(2): 3-10, 68.
- LIU Yusheng, KUANG Shuo. Decentralized optimal control of frequency and tie line power for multi-area power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1983(2): 3-10, 68(in Chinese).
- [35] 郭炳庆, 孙元章, 卢强. 电力系统稳定性分析与控制实时仿真决策系统[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(18): 5-7.
- GUO Bingqing, SUN Yuanzhang, LU Qiang. Real-time simulation and decision making system for stability analysis and control of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(18): 5-7(in Chinese).
- [36] ALHELOU H H, PARTHASARATHY H, NAGPAL N, et al. Decentralized stochastic disturbance observer-based optimal frequency control method for interconnected power systems with high renewable shares[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(5): 3180-3192.
- [37] WANG Ziqiang, WANG Jie, LA SCALA M. A novel distributed-decentralized fixed-time optimal frequency and excitation control framework in a nonlinear network-preserving power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(2): 1285-1297.
- [38] WANG Zhaojian, LIU Feng, PANG J Z F, et al. Distributed optimal frequency control considering a nonlinear network-preserving model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1): 76-86.
- [39] ZHAO Xiaohui, WEI Hua, QI Junjian, et al. Frequency stability constrained optimal power flow incorporating differential algebraic equations of governor dynamics[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(3): 1666-1676.
- [40] 曾嘉俊, 黄健洪, 郝旭东. 基于状态反馈线性化的电力系统动态频率控制[J]. 智慧电力, 2017, 45(9): 40-44.
- ZENG Jiajun, HUANG Jianhong, HAO Xudong. Dynamic frequency control of power systems based on state feedback linearization[J]. Smart Power, 2017, 45(9): 40-44(in Chinese).
- [41] 高扬, 艾芊, 郝然, 等. 交直流混合电网的多智能体自律分散控制[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1158-1164.
- GAO Yang, AI Qian, HAO Ran, et al. Autonomous decentralized control of multi-agent system for AC/DC hybrid grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1158-1164(in Chinese).
- [42] WANG Ziqiang, WANG Jie. A practical distributed finite-time control scheme for power system transient stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(5): 3320-3331.
- [43] PHAM T N, TRINH H, OO A M T. Distributed control of HVDC links for primary frequency control of time-delay power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2): 1301-1314.
- [44] YANG Fan, SHAO Xinyi, LI Dongdong, et al. Disturbance observer based fractional-order integral sliding mode frequency control strategy for interconnected power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(6): 5922-5932.
- [45] LIU Wenlong, GENG Guangchao, JIANG Quanyuan, et al. Model-free fast frequency control support with energy storage system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 3078-3086.
- [46] CHAN M L, DUNLOP R D, SCHWEPPE F. Dynamic equivalents for average system frequency behavior following major disturbances[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1972, PAS-91(4): 1637-1642.

- [47] ANDERSON P M, MIRHEYDAR M. A low-order system frequency response model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(3): 720-729.
- [48] SHI Qingxin, LI Fangxing, CUI Hantao. 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.
- [49] NAKIGANDA A M, DEGHAN S, MARKOVIC U, et al. A stochastic-robust approach for resilient microgrid investment planning under static and transient islanding security constraints[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(3): 1774-1788.
- [50] 王博, 杨德友, 蔡国伟. 大规模风电并网条件下考虑动态频率约束的机组组合[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2513-2519.
WANG Bo, YANG Deyou, CAI Guowei. Dynamic frequency constraint unit commitment in large-scale wind power grid connection[J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2513-2519(in Chinese).
- [51] WANG Siqi, TOMSOVIC K. Fast frequency support from wind turbine generators with auxiliary dynamic demand control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(5): 3340-3348.
- [52] LI Changgang, WU Yue, SUN Yanli, et al. Continuous under-frequency load shedding scheme for power system adaptive frequency control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(2): 950-961.
- [53] ALVES E, BERGNA-DIAZ G, BRANDAO D, et al. Sufficient conditions for robust frequency stability of AC power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(3): 2684-2692.
- [54] 郑超, 王士元, 张波琦, 等. 光伏高渗透电网动态频率特性及应对措施[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 4064-4073.
ZHENG Chao, WANG Shiyuan, ZHANG Boqi, et al. Dynamic frequency characteristics and countermeasures of power grid with highly penetrated photovoltaics[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 4064-4073(in Chinese).
- [55] 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): 3498-3506.
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): 3498-3506(in Chinese).
- [56] 肖友强, 林晓煌, 文云峰. 直流和新能源高渗透型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(in Chinese).
- [57] 林晓煌, 文云峰, 杨伟峰. 惯量安全域: 概念、特点及评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(9): 3065-3078.
LIN Xiaohuang, WEN Yunfeng, YANG Weifeng. Inertia security region: concept, characteristics, and assessment method[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(9): 3065-3078(in Chinese).
- [58] 刘福锁, 卿梦琪, 唐飞, 等. 计及风电一次调频和频率约束的风电占比极限值计算[J]. 电网技术, 2021, 45(3): 863-870.
LIU Fusuo, QING Mengqi, TANG Fei, et al. Limit proportion calculation of wind power considering primary frequency modulation and frequency constraints[J]. Power System Technology, 2021, 45(3): 863-870(in Chinese).
- [59] 李世春, 曹润杰, 雷小林, 等. 基于改进 SFR 模型的含风电虚拟惯性/一次调频电力系统频率响应特性[J]. 可再生能源, 2019, 37(5): 694-700.
LI Shichun, CAO Runjie, LEI Xiaolin, et al. Frequency characteristics of power system involving virtual inertia and primary frequency regulation of wind power based on modified SFR model[J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(5): 694-700(in Chinese).
- [60] YE Hua, PEI Wei, QI Zhiping. 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.
- [61] 龚浩岳, 周勤勇, 郭强, 等. 高比例新能源接入场景电力系统频率分析模型改进与应用[J]. 电网技术, 2021, 45(12): 4603-4611.
GONG Haoyue, ZHOU Qinyong, GUO Qiang, et al. Improvement and application of frequency analysis modules for power system in high proportion of renewable energy situation[J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4603-4611(in Chinese).
- [62] JU Ping, ZHENG Yi, JIN Yuqing, et al. Analytic assessment of the power system frequency security[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2021, 15(15): 2215-2225.
- [63] SHEN Jiakai, LI Weidong, LIU Liu, 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.

- [64] BADESA L, TENG Fei, STRBAC G. Conditions for regional frequency stability in power system scheduling—part I: theory[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(6): 5558-5566.
- [65] BADESA L, TENG Fei, STRBAC G. Conditions for regional frequency stability in power system scheduling—part II: application to unit commitment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(6): 5567-5577.
- [66] 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(in Chinese).
- [67] 薄其滨, 王晓茹, 刘克天. 基于 v-SVR 的电力系统扰动后最低频率预测[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(7): 83-88.
BO Qibin, WANG Xiaoru, LIU Ketian. Minimum frequency prediction based on v-SVR for post-disturbance power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(7): 83-88(in Chinese).
- [68] 胡益, 王晓茹, 滕予非, 等. 基于多层支持向量机的交直流电网频率稳定控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(14): 4104-4117.
HU Yi, WANG Xiaoru, TENG Yufei, et al. Frequency stability control method of AC/DC power system based on multi-layer support vector machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(14): 4104-4117(in Chinese).
- [69] 文云峰, 赵荣臻, 肖友强, 等. 基于多层极限学习机的电力系统频率安全评估方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 133-140.
WEN Yunfeng, ZHAO Rongzhen, XIAO Youqiang, et al. Frequency safety assessment of power system based on multi-layer extreme learning machine[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 133-140(in Chinese).
- [70] 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(in Chinese).
- [71] ZHANG Yichao, ZHU Hongyu, WANG Xiaoru. Prediction for the maximum frequency deviation of post-disturbance based on the deep belief network[C]// Proceedings of 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies. Chengdu: IEEE, 2019: 683-688.
- [72] ADHIKARI U, MORRIS T, PAN Shengyi. WAMS cyber-physical test bed for power system, cybersecurity study, and data mining[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(6): 2744-2753.
- [73] 李峰, 王琦, 胡健雄, 等. 数据与知识联合驱动方法研究进展及其在电力系统中应用展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(13): 4377-4389.
LI Feng, WANG Qi, HU Jianxiong, et al. Combined data-driven and knowledge-driven methodology research advances and its applied prospect in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13): 4377-4389(in Chinese).
- [74] 温玉琦. 一种基于数据驱动与物理模型融合的含风电系统频率响应分析方法[J]. 广东电力, 2019, 32(9): 167-176.
WEN Yuqi. A frequency response analysis method for wind power system based on data driven-physical model fusion[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(9): 167-176(in Chinese).
- [75] WANG Qi, LI Feng, TANG Yi, et al. Integrating model-driven and data-driven methods for power system frequency stability assessment and control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4557-4568.
- [76] 杨博, 陈义军, 姚伟, 等. 基于新一代人工智能技术的电力系统稳定评估与决策综述[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(22): 200-223.
YANG Bo, CHEN Yijun, YAO Wei, et al. New-generation artificial intelligence based stability assessment and decision-making for power grids: a critical review[J]. Automation of Electric Power System, 2022, 46(22): 200-223(in Chinese).
- [77] 曹炜, 张甜, 傅业盛, 等. 同步调相机增强电力系统惯性和改善频率响应的研究与应用[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(3): 1-10.
CAO Wei, ZHANG Tian, FU Yesheng, et al. Research and application for increasing inertia and improving frequency response of power system by using synchronous condenser[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3): 1-10(in Chinese).
- [78] 欧阳金鑫, 袁毅峰, 李梦阳, 等. 考虑风电减载调频的高比例风电电力系统优化调度方法[J]. 电网技术, 2021, 45(6): 2192-2200.
OUYANG Jinxin, YUAN Yifeng, LI Mengyang, et al. Optimal dispatching method of high-proportion wind power systems considering wind power reserve for

- frequency adjustment[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(6): 2192-2200(in Chinese).
- [79] 陈哲, 王檀裕, 郭创新, 等. 计及风电备用容量与需求响应的多备用资源鲁棒优化[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(10): 50-58.
- CHEN Zhe, WANG Luyu, GUO Chuangxin, et al. Robust optimization of multiple reserve resources considering reserve capacity of wind power and demand response[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(10): 50-58(in Chinese).
- [80] O'SULLIVAN J, ROGERS A, FLYNN D, et al. Studying the maximum instantaneous non-synchronous generation in an island system—frequency stability challenges in Ireland[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(6): 2943-2951.
- [81] 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(in Chinese).
- [82] 陈世明, 罗添辉, 高彦丽. 含外部储能的电力系统暂态稳定分布式控制[J]. *信息与控制*, 2021, 50(5): 623-630.
- CHEN Shiming, LUO Tianhui, GAO Yanli. Distributed control of power system transient stability including external energy storage[J]. *Information and Control*, 2021, 50(5): 623-630(in Chinese).
- [83] 王宝财, 孙华东, 李文锋, 等. 考虑动态频率约束的电力系统最小惯量评估[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(1): 114-126.
- WANG Baocai, SUN Huadong, LI Wenfeng, et al. Minimum inertia estimation of power system considering dynamic frequency constraints [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 41(1): 114-126(in Chinese).
- [84] GOLPÍRA H, SEIFI H, MESSINA A R, et al. Maximum penetration level of micro-grids in large-scale power systems : frequency stability viewpoint[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(6): 5163-5171.
- [85] 李东东, 刘强, 徐波, 等. 考虑频率稳定约束的新能源电力系统临界惯量计算方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(22): 24-33.
- LI Dongdong, LIU Qiang, XU Bo, et al. New energy power system critical inertia estimation method considering frequency stability constraints[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(22): 24-33(in Chinese).
- [86] 林恒先, 侯凯元, 陈磊, 等. 高比例风电电力系统考虑频率安全约束的机组组合[J]. *电网技术*, 2021, 45(1): 1-9.
- LIN Hengxian, HOU Kaiyuan, CHEN Lei, et al. Unit commitment of power system with high proportion of wind power considering frequency safety constraints[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(1): 1-9(in Chinese).
- [87] 李东东, 孙雅茹, 徐波, 等. 考虑频率稳定的新能源高渗透率电力系统最小惯量与一次调频容量评估方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(23): 54-61.
- LI Dongdong, SUN Yaru, XU Bo, et al. Minimum inertia and primary frequency capacity assessment for a new energy high permeability power system considering frequency stability[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(23): 54-61(in Chinese).
- [88] RAKHSHANI E, GUSAIN D, SEWDIEN V, et al. A key performance indicator to assess the frequency stability of wind generation dominated power system[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 130957-130969.
- [89] DELKHOSH H, SEIFI H. Power system frequency security index considering all aspects of frequency profile [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(2): 1656-1659.
- [90] 钟庆昌. 虚拟同步机与自主电力系统[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(2): 336-348.
- ZHONG Qingchang. Virtual synchronous machines and autonomous power systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(2): 336-348(in Chinese).
- [91] 屈子森, 蔡云旖, 杨欢, 等. 基于自适应虚拟阻抗的虚拟同步机功率解耦控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(17): 58-66.
- QU Zisen, CAI Yunyi, YANG Huan, et al. Strategy of power decoupling control for virtual synchronous generator based on adaptive virtual impedances[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(17): 58-66(in Chinese).
- [92] 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): 5179-5191.
- 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): 5179-5191(in Chinese).
- [93] 秦晓辉, 苏丽宁, 迟永宁, 等. 大电网中虚拟同步发电机惯量支撑与一次调频功能定位辨析[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(9): 36-43.

- QIN Xiaohui, SU Lining, CHI Yongning, et al. Functional orientation discrimination of inertia support and primary frequency regulation of virtual synchronous generator in large power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 36-43(in Chinese).
- [94] GEVORGIAN V, ZHANG Yingchen, ELA E. Investigating the impacts of wind generation participation in interconnection frequency response[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(3): 1004-1012.
- [95] 陈宇航, 王刚, 侍乔明, 等. 一种新型风电场虚拟惯量协同控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(5): 27-33.
- CHEN Yuhang, WANG Gang, SHI Qiaoming, et al. A new coordinated virtual inertia control strategy for wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(5): 27-33(in Chinese).
- [96] 李美依, 黄文焘, 邵能灵, 等. 频率扰动下虚拟同步电机控制型分布式电源自适应惯性控制策略[J]. 电网技术, 2020, 44(4): 1525-1533.
- LI Meiyi, HUANG Wentao, TAI Nengling, et al. Adaptive inertial control strategy for inverter interfaced distributed generator based on virtual synchronous generator under frequency disturbances[J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1525-1533(in Chinese).
- [97] ASRARI A, MUSTAFA M, ANSARI M, et al. Impedance analysis of virtual synchronous generator-based vector controlled converters for weak AC grid integration[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1481-1490.
- [98] 陈来军, 王任, 郑天文, 等. 基于参数自适应调节的虚拟同步发电机暂态响应优化控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5724-5731.
- CHEN Laijun, WANG Ren, ZHENG Tianwen, et al. Optimal control of transient response of virtual synchronous generator based on adaptive parameter adjustment[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5724-5731(in Chinese).
- [99] 齐琛, 汪可友, 吴盼, 等. 虚拟同步机功角稳定的参数空间分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(15): 4363-4372.
- QI Chen, WANG Keyou, WU Pan, et al. Parameter space analysis of the rotor angle stability of virtual synchronous machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(15): 4363-4372(in Chinese).
- [100] SUN Kaiqi, XIAO Huangqing, LIU Shengyuan, et al. Machine learning-based fast frequency response control for a VSC-HVDC system[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021, 7(4): 688-697.
- [101] 李冠争, 李斌, 王帅, 等. 基于特征选择和随机森林的电力系统受扰后动态频率预测[J]. 电网技术, 2021, 45(7): 2492-2502.
- LI Guanzheng, LI Bin, WANG Shuai, et al. Dynamic frequency prediction of power system post-disturbance based on feature selection and random forest[J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2492-2502(in Chinese).
- [102] 杨正清. 基于风电主动功率控制的风电场参与系统调频问题研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- YANG Zhengqing. Wind farm's participating in grid frequency regulation through active power control[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016(in Chinese).
- [103] HAFIZ F, ABDENNOUR A. Optimal use of kinetic energy for the inertial support from variable speed wind turbines[J]. Renewable Energy, 2015, 80: 629-643.
- [104] KEUNG P K, LI Pei, BANAKAR H, et al. Kinetic energy of wind-turbine generators for system frequency support[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(1): 279-287.
- [105] 丁磊, 尹善耀, 王同晓, 等. 考虑惯性调频的双馈风电机组主动转速保护控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(24): 29-34, 95.
- DING Lei, YIN Shanyao, WANG Tongxiao, et al. Active rotor speed protection strategy for DFIG-based wind turbines with inertia control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(24): 29-34, 95(in Chinese).
- [106] 焦平洋. 双馈风电机组参与微网调频的控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- JIAO Pingyang. Research on frequency regulation strategy of doubly-fed induction generator in microgrid [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015(in Chinese).
- [107] 侍乔明, 王刚, 李海英, 等. 考虑调频能力的风电场虚拟惯量多机协同控制策略[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 4005-4015.
- SHI Qiaoming, WANG Gang, LI Haiying, et al. Coordinated virtual inertia control strategy of multiple wind turbines in wind farms considering frequency regulation capability[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 4005-4015(in Chinese).
- [108] 周天沛, 孙伟. 高渗透率下变速风力机组虚拟惯性控制的研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 486-495.
- ZHOU Tianpei, SUN Wei. Study on virtual inertia control for DFIG-based wind farms with high penetration[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 486-495(in Chinese).

- Chinese).
- [109] FANG Jingyang, ZHANG Ruiqi, LI Hongchang, et al. Frequency derivative-based inertia enhancement by grid-connected power converters with a frequency-locked-loop[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 4918-4927.
- [110] 石荣亮, 张烈平, 王文成, 等. 基于频率微分原理的储能变换器虚拟惯量控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2088-2100.
SHI Rongliang, ZHANG Lieping, WANG Wencheng, et al. Research on virtual inertia control strategy for energy storage converters based on a frequency derivative scheme[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2088-2100(in Chinese).
- [111] RAMTHARAN G, JENKINS N, EKANAYAKE J B. Frequency support from doubly fed induction generator wind turbines[J]. IET Renewable Power Generation, 2007, 1(1): 3-9.
- [112] HOKE A F, SHIRAZI M, CHAKRABORTY S, et al. Rapid active power control of photovoltaic systems for grid frequency support[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(3): 1154-1163.
- [113] 华光辉, 胡汝伟, 焦龙, 等. 光伏电站快速频率响应技术研究及应用[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(5): 64-69, 76.
HUA Guanghui, HU Ruwei, JIAO Long, et al. Research and application of fast frequency response technology for photovoltaic stations[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(5): 64-69, 76(in Chinese).
- [114] 孙晓强, 刘鑫, 程松, 等. 光伏逆变器参与西北送端大电网快速频率响应能力实测分析[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2792-2798.
SUN Xiaoqiang, LIU Xin, CHENG Song, et al. Actual measurement and analysis of fast frequency response capability of PV-inverters in northwest power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2792-2798(in Chinese).
- [115] 朱建军, 杨彦波. 宁夏电网新能源电站快速频率响应特性研究分析[J]. 宁夏电力, 2020(6): 40-44.
ZHU Jianjun, YANG Yanbo. Research and analysis on fast-frequency response characteristic of new energy power station in Ningxia power grid[J]. Ningxia Electric Power, 2020(6): 40-44(in Chinese).
- [116] 孙晓强, 刘鑫, 程林, 等. 基于多调频资源协调控制的西北送端大电网新能源快速频率响应参数设置方案[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1760-1765.
SUN Xiaoqiang, LIU Xin, CHENG Lin, et al. Parameter setting of rapid frequency response of renewable energy sources in northwest power grid based on coordinated control of multi-frequency regulation resources[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1760-1765(in Chinese).
- [117] 潘文霞, 全锐, 王飞. 基于双馈风电机组的变下垂系数控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 126-131, 186.
PAN Wenxia, QUAN Rui, WANG Fei. A variable droop control strategy for doubly-fed induction generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 126-131, 186(in Chinese).
- [118] VIDYANANDAN K V, SENROY N. Primary frequency regulation by deloaded wind turbines using variable droop[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 837-846.
- [119] ARANI M F M, MOHAMED Y A R I. Dynamic droop control for wind turbines participating in primary frequency regulation in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 5742-5751.
- [120] TAFTI H D, KONSTANTINOU G, FLETCHER J E, et al. Control of distributed photovoltaic inverters for frequency support and system recovery[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(4): 4742-4750.
- [121] 赵大伟, 马进, 钱敏慧, 等. 光伏电站参与大电网一次调频的控制增益研究[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 425-433.
ZHAO Dawei, MA Jin, QIAN Minhui, et al. Research on control gain for photovoltaic power plants participating in primary frequency regulation of large power grid[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 425-433(in Chinese).
- [122] LIU Ye, SONG Yankan, WANG Zhaojian, et al. Optimal emergency frequency control based on coordinated droop in multi-infeed hybrid AC-DC system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4): 3305-3316.
- [123] SHADABI H, KAMWA I. Dual adaptive nonlinear droop control of VSC-MTDC system for improved transient stability and provision of primary frequency support[J]. IEEE Access, 2021, 9: 76806-76815.
- [124] XIONG Liansong, LIU Lei, LIU Xiaokang, et al. Frequency trajectory planning based strategy for improving frequency stability of droop-controlled inverter based standalone power systems[J]. IEEE

- Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2021, 11(1): 176-187.
- [125] 刘彬彬, 杨健维, 廖凯, 等. 基于转子动能控制的双馈风电机组频率控制改进方案[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 17-22.
- LIU Binbin, YANG Jianwei, LIAO Kai, et al. Improved frequency control strategy for DFIG-based wind turbines based on rotor kinetic energy control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 17-22(in Chinese).
- [126] LEE J, MULJADI E, SRENSSEN P, et al. Releasable kinetic energy-based inertial control of a DFIG wind power plant[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(1): 279-288.
- [127] 张冠锋, 杨俊友, 孙峰, 等. 基于虚拟惯量和频率下垂控制的双馈风电机组一次调频策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 225-232.
- ZHANG Guanfeng, YANG Junyou, SUN Feng, et al. Primary frequency regulation strategy of DFIG based on virtual inertia and frequency droop control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(22): 225-232(in Chinese).
- [128] MIAO Zhixin, FAN Lingling, OSBORN D, et al. Wind farms with HVDC delivery in inertial response and primary frequency control[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(4): 1171-1178.
- [129] PENG Qiao, YANG Yongheng, LIU Tianqi, et al. Coordination of virtual inertia control and frequency damping in PV systems for optimal frequency support [J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2020, 5(4): 305-316.
- [130] TAN Yingjie, MUTTAQI K M, CIUFO P, et al. Enhanced frequency regulation using multilevel energy storage in remote area power supply systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1): 163-170.
- [131] 吴启帆, 宋新立, 张静冉, 等. 电池储能参与电网一次调频的自适应综合控制策略研究[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3829-3836.
- WU Qifan, SONG Xinli, ZHANG Jingran, et al. Study on self-adaptation comprehensive strategy of battery energy storage in primary frequency regulation of power grid[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3829-3836(in Chinese).
- [132] 李军徽, 高卓, 李翠萍, 等. 基于动态任务系数的储能辅助风电一次调频控制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(19): 52-59.
- LI Junhui, GAO Zhuo, LI Cuiping, et al. Control strategy for dynamic task coefficient based primary frequency regulation of wind power assisted by energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(19): 52-59(in Chinese).
- [133] 王刚, 侍乔明, 崔志勇, 等. 一种风力机虚拟惯量控制与传统发电机调速控制的协调方法[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2794-2801.
- WANG Gang, SHI Qiaoming, CUI Zhiyong, et al. A coordinated strategy of virtual inertia control of wind turbine and governor control of conventional generator [J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2794-2801(in Chinese).
- [134] 刘吉臻, 姚琦, 柳玉, 等. 风火联合调度的风电场一次调频控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3462-3469.
- LIU Jizhen, YAO Qi, LIU Yu, et al. Wind farm primary frequency control strategy based on wind & thermal power joint control[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3462-3469(in Chinese).
- [135] 王晶晶, 廖思阳, 姚良忠, 等. 基于一致性算法的直流受端电网分布式调频资源协同频率控制[J]. 电网技术, 2022, 46(3): 888-896.
- WANG Jingjing, LIAO Siyang, YAO Liangzhong, et al. Coordinated frequency control strategy for DC receiving-end power grid with distributed frequency regulation resources using consensus algorithm[J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 888-896(in Chinese).
- [136] 孙船舶, 汤涌, 仲悟之, 等. 基于分布式模型预测控制的包含大规模风电集群互联系统超前频率控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(21): 6291-6302.
- SUN Bohao, TANG Yong, ZHONG Wuzhi, et al. Multi-area interconnected power system advanced frequency control strategy considering large scale wind power cluster integration based on DMPC[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(21): 6291-6302(in Chinese).
- [137] 丁明, 施建雄, 韩平平, 等. 光储系统参与电网调频及调峰的综合控制策略[J]. 中国电力, 2021, 54(1): 116-123, 174.
- DING Ming, SHI Jianxiong, HAN Pingping, et al. An integrated control strategy for photovoltaic-energy storage system participating in frequency regulation and peak shaving of power grid[J]. Electric Power, 2021, 54(1): 116-123, 174(in Chinese).
- [138] 王瑞峰, 高磊, 谌杰, 等. 高风电渗透率下变速风电机组参与系统频率调整策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 101-108.
- WANG Ruifeng, GAO Lei, SHEN Jie, et al. Frequency

- regulation strategy with participation of variable-speed wind turbines for power system with high wind power penetration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 101-108(in Chinese).
- [139] LIU Bi, ZHAO Junbo, HUANG Qi, 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.
- [140] 张雯欣, 吴琛, 黄伟, 等. 考虑频率二次跌落的风电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(in Chinese).
- [141] 杨一凡, 项雷军, 郭新华, 等. 含抽水蓄能电站的互联电网负荷频率自抗扰优化控制研究[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 276-283.
- YANG Yifan, XIANG Leijun, GUO Xinhua, et al. Active disturbance rejection controller optimization of load frequency in interconnected power grid with pumped storage power station[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 276-283(in Chinese).
- [142] 王天翔, 程雪坤, 李伟超, 等. 基于变参数减载控制的风电场一次调频策略[J]. 中国电力, 2021, 54(12): 94-101.
- WANG Tianxiang, CHENG Xuekun, LI Weichao, et al. Primary frequency control strategy for wind farms based on variable parameter de-loading control[J]. Electric Power, 2021, 54(12): 94-101(in Chinese).
- [143] 杨蕾, 王智超, 周鑫, 等. 大规模双馈风电机组并网频率稳定控制策略[J]. 中国电力, 2021, 54(5): 186-194.
- YANG Lei, WANG Zhichao, ZHOU Xin, et al. Frequency stability control strategy for large-scale grid connections with DFIG units[J]. Electric Power, 2021, 54(5): 186-194(in Chinese).
- [144] 黄沐鹏, 张鑫, 王奔. 含海上风电场的多端柔性直流互联系统频率稳定协调控制策略[J]. 广东电力, 2021, 34(5): 64-72.
- HUANG Mupeng, ZHANG Xin, WANG Ben. Frequency stability coordination control strategy for VSC-MTDC interconnected power system with offshore wind farms [J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(5): 64-72(in Chinese).
- [145] 刘洋, 邵广惠, 张弘鹏, 等. 新能源参与系统一次调频分析及参数设置[J]. 电网技术, 2020, 44(2): 683-688.
- LIU Yang, SHAO Guanghui, ZHANG Hongpeng, et al. Analysis of renewable energy participation in primary frequency regulation and parameter setting scheme of power grid[J]. Power System Technology, 2020, 44(2): 683-688(in Chinese).
- [146] KHESHTI M, DING Lei, BAO Weiyu, et al. Toward intelligent inertial frequency participation of wind farms for the grid frequency control[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(11): 6772-6786.
- [147] ADEMOLA-IDOWU A, ZHANG Baosen. Frequency stability using MPC-based inverter power control in low-inertia power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(2): 1628-1637.
- [148] 孙铭, 徐飞, 陈磊, 等. 利用转子动能的风机辅助频率控制最优策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 506-513.
- SUN Ming, XU Fei, CHEN Lei, et al. Optimal auxiliary frequency control strategy of wind turbine generator utilizing rotor kinetic energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 506-513(in Chinese).
- [149] SUN Ming, MIN Yong, CHEN Lei, et al. Optimal auxiliary frequency control of wind turbine generators and coordination with synchronous generators[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021, 7(1): 78-85.
- [150] KUNDUR P, BALU N J, LAUBY M G. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.



汪梦军

在线出版日期: 2022-11-30.

收稿日期: 2022-06-01.

作者简介:

汪梦军(1997), 男, 博士研究生, 主要研究方向为高比例新能源电力系统频率稳定分析与控制、新能源参与系统快速调频, wmj7s7z@163.com;

*通信作者: 马士聪(1980), 男, 工学博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电力系统分析与运行控制、高比例新能源电力系统稳定分析与控制、智能电网、电力系统自动化, mashicong@epri.sgcc.com.cn.

(责任编辑 乔宝榆)

Review of Transient Frequency Stability Analysis and Frequency Regulation Control Methods for Renewable Power Systems

WANG Mengjun¹, GUO Jianbo¹, MA Shicong^{1*}, WANG Tiezhu¹, ZHANG Xi², LUO Kui¹, WANG Guozheng³

(1. China Electric Power Research Institute; 2. Beijing Institute of Technology; 3. Tsinghua University)

KEY WORDS: renewable-dominant power system; transient frequency stability analysis; frequency regulation control methods; frequency response

Under the “double carbon” strategic goal, China will build a renewable-dominant power system. The moment of inertia and frequency regulating capacity of the renewable-dominant power system is reduced, and the fault disturbance power is increased, which threatens the transient frequency stability. In order to better understand the transient frequency stability problem of renewable-dominant power systems and prepare frequency regulation countermeasures, this paper summarized and prospected the research status of transient frequency stability analysis and frequency regulation control methods.

Firstly, the existing transient frequency analysis models are summarized. Affected by the substantial increase in state quantities, the contradiction between the accuracy of the time-domain simulation model and the solution speed has intensified, and it is still suitable for offline use in a renewable-dominated power system. The network-node analysis model using centralized information is limited due to the difficulty of obtaining global information in real time. The network-node analysis model using decentralized information has more application prospects, but the current development is insufficient, and there is a lack of unified standards, so it is difficult to provide index references for frequency regulation control at the system level. The aggregation equivalent model faces the problem of aggregation accuracy and assumption failure due to the heterogeneity of frequency regulation resources (“frequency regulation resource heterogeneity” refers to the gradual emergence of frequency regulation resources with different characteristics) and the distribution characteristics of frequency nodes. If the black-box model can overcome its own theoretical and technical problems with the development of technology, it can be better applied to renewable-dominated power systems.

Then the research status of frequency regulation control methods is sorted out from the system and plant levels, and the applicable characteristics of different frequency regulation control methods are summarized

from the analysis basis. Step control, virtual inertia control, droop control and comprehensive inertia control can be implemented in a decentralized manner based on local information, which is scalable and generally more practical; when analyzing the frequency stability of large power grids, they are generally aggregated and analyzed using the aggregation model. It provides valuable reference indicators for system-level frequency regulation control decision-making. However, its effect on improving the frequency stability of the system is closely related to the accuracy of the aggregation analysis model, and its effectiveness can be improved from the perspective of improving its accuracy. The plant-station frequency regulation control method based on the network-node analysis model using centralized information is less practical due to its dependence on global information and lack of ability to provide system indicators. The station frequency regulation control method based on network-node analysis models using decentralized information temporarily lacks the ability to provide reference indicators for system-level control, but it has strong scalability and great application potential. The frequency stability analysis of systems under coordinated and optimal frequency regulation control is either based on an aggregation model, or a network-node model using aggregated information, with similar characteristics to those described above.

Finally, the characteristic changes of transient frequency stability analysis and frequency regulation control of renewable-dominant power systems and their effects are summarized, and the possible future development ideas are prospected. The aggregation equivalent analysis of heterogeneous frequency regulation resources from the perspective of model-driven and data-driven combination, and the research on modular decentralized autonomous control based on the idea of invariant sets considering the frequency space-time distribution, may become two research directions in the future.