面向新型电力系统的频率安全研究综述与展望

韩泽雷[1],鞠 平[1],秦 川[1],孙大雁[2],孙华东[3],郑 义[1]
(1. 河海大学 能源与电气学院,江苏 南京 211100;2. 国家电力调度控制中心,北京 100031;
3. 中国电力科学研究院有限公司,北京 100192)

摘要:随着电力系统低碳化转型的进程加速,我国电网正向着以“高比例新能源”和“高比例电力电子设备”为特征的新型电力系统转型。新能源出力的波动和电力电子设备的大规模接入,既显著增加了系统的不平衡功率冲击,又削弱了系统的频率支撑能力,给频率安全带来了严峻挑战。从频率安全的建模、分析和控制3个角度出发,首先介绍了电力系统频率响应的4种模型:全系统详细模型、线性化模型、单机等值模型、人工智能模型。然后对电力系统频率安全指标及其量化评估方法、影响因素进行评述。最后从“源-荷-储”及其协调控制等方面分析了频率安全的控制手段并介绍了频率紧急协调控制系统,并对建模、分析和控制3个方面分别提出展望。

关键词:新型电力系统;频率安全;频率响应建模;频率机理分析;频率安全控制
中图分类号:TM712 **文献标志码**:A DOI:10.16081/j.epae.202303007

0 引言

随着“双碳”目标的提出,我国能源结构的升级和电力系统的转型势在必行。未来我国风电、光伏等新能源必将迎来长期且高速的发展,新能源在我国电网中将占据更高的比例。据国家能源局发布的数据,截至2022年底,我国风电、光伏装机容量分别达到3.7×10^8 kW和3.9×10^8 kW,同比增长11.2%和28.1%[1]。到2060年前,新能源发电量占比有望超过50%,成为电量主体[2]。随着新能源比例的进一步提高与大规模电力电子设备的持续接入,系统有功功率更加难以平衡,频率安全问题将尤为突出。

2015年9月,我国锦苏特高压直流线路双极闭锁,3.55%的功率缺额造成了华东电网频率最低跌至49.56 Hz,频率恢复共耗时240 s[3]。2016年9月,澳大利亚南部电网因台风袭击,引发频率崩溃,造成10 h停电;事故前风力、光伏发电占比达48.36%,非同步发电功率接近80%,是由极低惯量水平下系统故障导致频率快速跌落而诱发的系统解列[4]。2019年8月,英国“8·9”大停电事故中,由于事故前系统风力发电占比为30%,系统惯量偏低,约3.9%的功率缺额造成系统频率最低跌至48.8 Hz并触发低频减负荷,从而造成大规模停电[5]。

有学者指出,近年来发生的这些频率安全事故与电力系统中新能源出力的不确定性、系统的低惯量水平等特性密切相关[6]。在新型电力系统转型的过程中,随着新能源和电力电子设备比例的进一步提高,电力系统频率在时空上的不均分布问题愈发显著,其频率动态机理也愈发复杂,甚至可能出现全新的问题,因此亟需展开对新型电力系统频率安全的研究。

针对新型电力系统已经或可能出现的频率安全问题,本文从建模、分析、控制3个方面进行综述并提出展望。首先,归纳了电力系统频率响应现有的4种模型:全系统详细模型、线性化模型、单机等值模型、人工智能模型,在此基础上总结和比较了各种模型的优缺点,并提出展望。然后,在模型的基础上总结了现有的频率安全的评估指标和手段,主要包括初始频率变化率(rate of change of frequency,RoCoF)、极限频率、频率恢复时间和稳态频率,从机理和模型参数2个方面分析了影响频率安全的因素,并提出展望。最后从“源-荷-储”及其协调控制等方面总结了频率安全的控制手段,介绍了频率紧急协调控制系统,并提出了展望。

1 新型电力系统频率响应建模

目前在系统频率响应模型方面,主要有全系统详细模型、线性化模型、单机等值模型和人工智能模型。

1.1 全系统详细模型

全系统详细模型是通过获取电力系统中所有相关元件的参数并以此为基础建立的全状态模型,在电网调度、规划设计、事故模型等领域具有广泛应用。

采用仿真软件可以方便地使用全系统详细模型对系统频率动态特性进行离线分析,目前常用的电

收稿日期:2022-10-26;**修回日期**:2023-02-15
在线出版日期:2023-04-27
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51837004,U2066601);“111”计划项目(B14022)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51837004,U2066601) and the 111 Project(B14022)

力系统动态仿真软件有 PSS / E、PSD-FDS、BPA 及 PSASP。根据仿真软件的计算结果，可以直观地展现系统频率的功频动态特性以及频率响应的时空分布特性[7-8]。此外，根据时域仿真法的仿真结果，可对系统的频率稳定性做出评价，如文献[9]采用时域仿真法，仿真分析了动态附加频率控制策略对多端柔性直流输电系统的频率稳定的影响；文献[10]基于时域仿真结果分析了频率紧急控制特性。

采用全系统详细模型计算动态频率响应，可以计及电力系统元件的非线性环节，并同时能够获得电压、功率等其他状态参量的动态变化曲线，且具有良好的仿真精度，能够最大限度地真实反映系统在扰动作用下的动态行为，被广泛地应用在电力系统计算分析。但是随着系统规模的扩大，系统模型方程维数急剧增加，时域仿真法计算速度明显降低，难以实现对电力系统的在线分析。而且详细的元件模型参数众多，参数整定是否与实际相符会显著影响仿真结果的准确性。因此，目前全系统详细模型常用于频率安全的离线分析或者事后校验。

1.2　线性化模型

线性化模型分析法是在全系统详细模型基础上，对网络方程、负荷模型、发电机及原动机–调速器方程进行线性化并作适当简化后，得到系统的线性化简化模型，然后计算得到系统的动态频率响应。通过与全系统详细模型的计算结果对比，该算法在降低计算量的同时，能够准确计算系统各发电机的动态频率。

例如，直流潮流就是在传统非线性潮流模型的基础上忽略无功波动并做出适当的线性化处理后而建立起的简化潮流模型[11]。基于直流潮流的动态频率分析法是一种将网络方程部分采用直流潮流法进行简化，从而计算动态频率的线性化模型分析方法[12]。基于直流潮流的动态频率分析法忽略了有功波动时，系统中各个节点的电压变化，仅关注有功与频率的变化关系，在大幅降低计算量的同时，保证了计算的精度，且能够粗略地计及动态频率响应的空间分布差异。

而动态潮流分析法是在常规潮流计算方法的基础上，因故障产生的不平衡功率按照各个节点的消耗能力进行分配来代替常规潮流算法中平衡节点的选取，通过迭代潮流方程与频率求解方程，实现计算动态频率响应的目的[13]。此种方法中，忽略了发电机之间的相对摇摆，计算得到的是系统的平均频率，无法计及频率响应的空间分布特性。在进行动态频率计算时，需要逐步迭代，计算量大，难以实现在线分析。

上述线性化模型分析法简化了频率响应的计算过程，虽然在保证一定准确性的基础上降低了计算量，但是在系统规模较大时，仍然无法实现在线分析。频率波动过程中的最低频率以及稳态频率是描述其波动特性的重要参数，为更快地获得频率波动的动态行为特征，采用简化方法直接计算动态频率的稳态频率、最低频率[14-15]，能够大幅简化计算过程，在交直流混联电网中以及考虑直流紧急功率支援时，均可获得较为理想的计算效果[16-17]。

1.3　单机等值模型

单机等值模型基于惯性中心频率的概念，采用单台等值发电机来描述整个电力系统频率波动。由于模型中只有 1 台等值发电机，描述系统频率响应的方程阶数得以大幅降低，计算复杂程度也随之大幅下降。经典的单机等值模型主要有平均系统频率（average system frequency，ASF）模型[18]及系统频率响应（system frequency response，SFR）模型[19]，实际上这两者具有相似性。由于单机等值模型非常简洁，能够获得频率响应的解析解，因此被广泛应用于考虑频率动态特性的电力系统规划和运行控制中[20-23]。

ASF 模型中对同步发电机模型进行了简化等值，仅保留了同步发电机的转子运动方程并等值为单机模型，另外考虑了与频率波动密切相关的每台发电机的调速器模型。由此可见 ASF 模型的阶数是随发电机数量变化的，在实际大系统中，发电机的数量众多，ASF 模型的阶数随着发电机数量的增加呈线性增加，实用性大幅降低。

SFR 模型进一步采用了简化再热式汽轮机–调速器环节作为系统等值原动机–调速器环节，得到了更加简化的模型结构，模型的阶数不随系统规模增加而变化。在 SFR 模型中引入了简化再热式汽轮机–调速器环节作为聚合原动机调速器模型，因此模型仅适应于火力发电系统。实际系统中的调速器结构、类型多样，而采用传统的数学推理方法难以得到合适的单机等值模型。文献[24]在系统中原动机–调速器结构一致的前提下，提出了基于加权法的发电机及其调速系统模型参数聚合的实用方法，在 IEEE 10 机 39 节点系统中证明了此方法的准确性。文献[25]对该模型做出了改进，在原模型基础上，将原来调速器等值模型由静态模型改为动态模型，提出了改进 SFR 模型。

但是现存的 SFR 模型存在几个问题：一是只考虑了汽轮机，不适用于含有较多水轮机乃至新能源发电的电力系统；二是调速系统模型过于简化，没有反映其动态过程；三是没有显性考虑电力负荷的频率调节效应；四是不能辨识确定所有的模型参数。为此，文献[26]在 SFR 经典模型的基础上，构建了具有更强适应性的 SFR 通用模型，其参数通过辨识获得，可应用于含水电及新能源发电的电力系统。

SFR 等值模型采用单台发电机等效模拟全系统的频率响应，由于模型结构的固有缺点，单机等值模型并不能计及频率响应的空间分布特性。在电气联系较为紧密的局部电网内部，频率响应的空间分布并不明显，单机等值模型具有较强的实用价值；但在地理分布较广的电力系统中，单机等值模型法的实用价值将会受到限制。并且单机等值模型法忽略了有功功率与电压波动之间的耦合关系，而实际上当系统突然出现有功功率缺额时，在有功潮流转移过程中将会引起无功功率的重新分布从而导致电压的波动，单机等值模型法并不能描述这一过程。

1.4 人工智能模型

人工智能模型，其核心思想是通过数据驱动的方式，将堆叠多层结构的上一层输出作为下一层的输入，采用一系列非线性变换实现对输入信息的分级表达，拟合出数据间错综复杂的关系，从而实现分析、分类、预测等功能[27]。

采用决策树[28]、神经网络[29]、多层极限学习机[30-31]、强化学习[32]、支持向量机[33]等人工智能方法进行系统频率动态分析，具有较快的计算速度和较高的计算精度。人工智能法一般在线计算量较少，但是线下需要足够的样本数据进行训练，在实测数据不足的情况下，目前还难以进行推广应用。而且人工智能法得到的是数值化的计算结果，其物理机理可解释性偏弱。

1.5 频率响应建模研究展望

上述 4 种模型中，全系统详细模型定性正确、定量准确，但计算复杂，需要获取所有参数而且计算量很大；线性化模型是对模型进行线性化而且可以获得传递函数，计算量小，但仅适用于小扰动；单机等值模型结构简洁，能够获得频率响应的解析解，但以往的 SFR 模型仅适用于调频速度较快的纯火电机组的电力系统，应用存在局限性；而人工智能模型虽然拥有较快的计算速度和较高的计算精度，但其训练所需数据庞大，且物理机理的可解释性较弱。表 1 对这 4 种模型进行了纵向比较。

表 1 模型比较

Table 1 Model comparison

模型结构	优势	缺陷
全系统详细模型	定性正确，定量准确	计算复杂，参数难以获取
线性化模型	可以获得传递函数，计算量小	仅适用于小扰动
单机等值模型	结构简洁，能够获得频率响应的解析解	适用范围有限
人工智能模型	具有较快的计算速度和较高的计算精度	训练数据庞大，机理不明，难以解释

对于电力系统频率响应模型方面的研究，可以在保留模型优势的基础上进一步深入分析。在机理建模方面，一方面由于具备新的频率响应特性的电力电子设备大规模并网，频率动态过程将越发复杂，需要更多考虑针对多尺度耦合和非线性环节装备的建模与特性分析，此时全系统详细模型若进一步向“精细化”方向发展，其建模难度将大幅增加；另一方面，由于频率时空分布差异化的进一步加大，传统基于惯性中心假设的单机等值模型不再能准确反映不同节点的频率响应情况。为此，需要寻找一个介于全系统详细模型与单机等值模型 2 个极端之间的模型，比如分区域、分类型的等值模型。

在人工智能模型方面，由于机理模型的复杂程度明显提高，针对大量复杂影响因素下问题分析的人工智能模型将具备更广阔的应用空间。但目前人工智能模型的机理可解释性相对较弱，因此在应用中可以与物理模型相结合，以增强其可解释性，在实测数据不足的情况下也可以采用无监督学习或小样本数据学习进行训练。

2 新型电力系统频率安全分析

当发生功率扰动时，系统频率响应的典型过程如图 1 所示。图中：f_{ref} 为系统参考频率；f_m 为频率最值；t_0 为频率开始跌落的时间；t_1 为到达频率最值的时间。

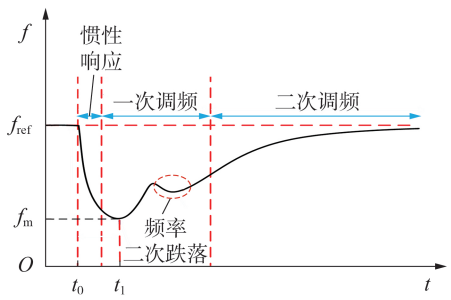

图 1 频率动态响应过程

Fig.1 Frequency dynamic response process

系统发生故障之后，频率一开始快速下降，到达最低点之后开始缓慢回升。在新型电力系统中，频率有时会经历一个二次跌落与回升过程，最终达到稳态。目前来看，二次跌落的主要原因有：一次调频能力缺失，如汽轮机锅炉蓄热不足导致主蒸汽压力下降，影响后续调频能力；风机转子动能控制中恢复转速环节需要重新吸收功率[34]。

针对新型电力系统频率安全分析的研究面临 2 个方面问题：一是从电力系统安全运行的角度来看，需要对系统频率的安全性指标进行更为精确的定量评估；二是从电力系统整体特性的角度来看，需要对系统频率安全性在电力系统转型过程中的变化规律进行分析。

2.1 频率安全评估指标

频率安全目前主要依赖于频率动态响应进行判

定，对于频率安全需要量化评估指标与方法，以便电力系统运行人员了解其特征并且据此实施控制。

这方面已经有一些研究工作和成果[35]，常用的频率安全指标总结如下[36-37]。

1）RoCoF，即扰动后初始时间段的频率变化速度。RoCoF在开始时很大，然后逐步减小，所以如何选取其计算的时间点或者时间段，也是一个需要研究的问题。

2）频率最值，即频率在动态过程中频率的最大值或最小值。在受端系统，如果频率最低点小于低频减载阈值，将触发区域减载而导致大规模停电。我国低频减载阈值为49.0~49.2 Hz，如华东电网为49.0 Hz。所以，频率最值是最受关注的频率安全指标。

3）频率恢复时间，从扰动开始到频率趋于平稳的时间。

4）频率稳态值，频率动态过程平稳后达到的稳态值，我国一般要求在49.5~50.5 Hz范围内。

在此基础之上，根据不同的频率控制需求，文献[38]综合偏移幅值和持续时间，提出了考虑累积效应的暂态频率偏移指标。文献[39]建立了一套刻画频率时空分布差异化程度的量化指标。此外，面向高比例电力电子设备接入的低惯量电力系统，还有用于间接或直接衡量系统惯量水平的指标，如系统非同步发电渗透率[40]、基于同步相量测量装置频率量测数据的惯量分布指标[41]、量化评估低压穿越场景下风电承载能力的频率强度指标[42]等，文献[43]还对国外的几种典型惯量需求评估方法进行了梳理，在此基础上提出了我国应对惯量问题的建议。文献[44]提出了可以量化频率最大偏移的“跌落深度系数”指标以及量化频率平均变化率的“跌落坡度系数”指标。文献[45]针对传统频率安全评估标准的不足之处，提出了一种改进的频率安全评估指标与方法。文献[46]在考虑了频率时空分布特性的基础上，在两区系统中提出并推导了区域频率安全指标。

2.2　频率安全评估指标的计算

在频率安全指标的量化评估方面，常用的方法大体可分为3种：

1）方法1，基于1.1节所述的全系统频率响应模型，通过时域仿真或者数值计算获取系统频率响应，然后计算频率安全指标；

2）方法2，基于SFR等低阶线性频率响应模型的传递函数，对其进行拉普拉斯反变换，获得解析化的频率动态函数及安全指标计算公式；

3）方法3，基于包含多台发电机调速器的频率响应等值模型（如ASF模型），将频率偏差的变化特性描述为在时域上线性[47-48]或者抛物线形[49]调整机组出力，从而将闭环传递函数转换为开环处理，据此获得解析化的最低频率等安全指标。

上述频率安全评估方法中，方法2、3计算量较小，可以实现频率安全指标的在线量化评估。

2.3　频率安全影响分析

2.3.1　机理因素分析

电力系统频率安全的变化，主要表现在以下几个方面。

一是高比例新能源、大容量高压直流输电等，显著增加了系统的不平衡功率冲击。目前的研究主要集中在新能源波动性对频率特性的影响分析、考虑新能源与特高压直流的电网运行风险评估、连锁故障分析等方面。文献[50]从频率偏差等角度研究了新能源功率波动对电力系统频率的影响。文献[51]考虑新能源出力的不确定性和特高压直流运行功率的变化，开展了电网的运行瓶颈分析及风险评估研究。文献[52]分析了电网故障导致大面积风电低电压穿越对电网频率的影响，并给出了相应的改善措施。

二是高比例电力电子设备接入导致系统惯量水平下降、调频能力减弱，降低了系统的频率支撑能力。目前的研究主要集中在高比例电力电子设备接入对频率特性的影响分析、惯量等系统参数影响频率动态响应的模式及机理分析、系统等效惯量估计等方面。文献[53]从系统层面对不同惯量形式进行梳理并分类，指出当前电力系统的等效惯量组成成分复杂且时变，需要开展不同时间尺度且包含不同惯量形式的等效惯量评估研究。文献[54-55]推导了异步电机的惯量响应机理，分析了异步电机等效惯量的时变特征，其对扰动瞬间的RoCoF几乎不起作用，但可改善频率最低点和稳态值。目前，已有的惯量评估方法包括基于扰动的估计方法[56-58]以及基于非扰动时期系统特性的估算方法[59-60]。但目前对于频率安全指标的计算和分析大多依赖于仿真和实验，对于电力电子器件如何影响频率特性的理论研究有限，对此文献[61]提出了一种严格将系统频率特性与电力电子器件特性相联系的理论分析方法，从理论角度分析了电力电子器件对频率的影响。

此外，由于分布式发电、微电网、直流配电网的持续接入，部分区域用电负荷可实现自主供给，使主网同步电源开机数量减少，从而导致系统惯量的降低，进一步加深了频率安全隐患[62]。

2.3.2　模型参数分析

影响电力系统频率安全指标的因素，除了功率扰动的大小以外，还包括系统各部分参数[63]。

发电机组主要参与频率调节过程，其主要参数为惯性时间常数、一次调频系数和阻尼系数。发电机惯性时间常数主要影响RoCoF，发电机一次调频

系数主要影响最大频率偏差和稳态频率误差，而发电机阻尼系数对各安全指标的影响均较小。除此以外，发电机调频特性的变化，如频率死区、一次调频限幅、热力系统的约束等都会对发电机调频特性产生影响，进而影响频率安全指标。例如文献[64]提出了一种考虑限幅环节的含新能源的系统频率模型与简化聚合模型，从而提高了预测精度。文献[65]提出了一种计及一次调频死区与限幅的频率安全约束的模型，从而更为准确地估计系统调频能力。

电力负荷是系统功率平衡的另一方面，对系统频率响应具有重要影响，主要为系统提供阻尼。文献[66]以一个简单系统为背景，定性和定量地分析了负荷特性对阻尼的影响。另外，通过定量分析可以发现，负荷频率系数、负荷感应电动机比例和感应电动机的惯性时间常数对频率安全指标存在一定影响，但影响相对于发电机都较小。

通过上述对发电机和负荷模型的参数影响分析，文献[26]还基于通用SFR模型，对整个系统模型中3个重要的系统物理参数对频率指标的影响程度进行了定性和定量的分析。其中系统等效惯性时间常数反映的是系统的惯量水平，其对RoCoF有显著影响，随着惯性时间常数的降低，RoCoF明显增大；系统阻尼效应在频率响应过程中始终存在，对各阶段的特性都会有影响，系统阻尼系数对最大频率偏差和恢复时间影响最大；系统调频系数反映了发电机组的一次调频能力，只影响最大频率偏差和稳态频率偏差，对稳态频率偏差的作用与系统阻尼系数大致相同，但受调速器动态特性的影响，对最大频率偏差的影响远小于系统阻尼系数。模型参数对频率安全指标的影响程度对比如表2所示。

表2 模型参数对频率安全指标的影响分析对比

Table 2 Influence analysis comparison of model parameters on frequency security indexes

模型参数	模型参数对频率安全指标的影响		
	RoCoF	最大频率偏差	稳态频率误差
惯性时间常数	大	中	小
系统阻尼	小	小	小
一次调频系数	小	大	大

上面对频率安全指标的分析建立在确定扰动的基础上，但是随着新能源和新负荷的日益增加，电力系统中的随机扰动日趋加剧。在此情况下，频率也会产生随机的动态波动。频率的动态波动是否在安全范围，这里称之为频率随机动态安全，文献[67-68]针对随机性小扰动引发系统频率的随机波动，研究了系统频率域内概率问题，提出了用于描述随机扰动下电力系统动态安全的系统频率域内概率指标，同时建立了随机扰动下SFR模型，并推导了系统频率域内概率解析公式。在对解析结果进行机理分析发现，在一定时间之内，系统频率具有平稳的分布，这也在一定程度上解释了实际电网中系统频率存在的随机波动。

2.4 频率安全分析研究展望

在向新型电力系统转型的过程中，随着系统惯量的降低和更广泛的频率控制手段的应用，频率安全的评估指标将不再局限于2.3节中阐述的几项指标，而是需要对频率安全进行多尺度、多维度分析，从而体现频率响应过程中存在的新变化，例如频率的二次跌落指标等需要纳入评估体系，甚至在紧急控制时的各种阈值指标，在新型电力系统中都可能面临重置。

同时，电力电子设备输出的电压和频率动态主要取决于设备的控制器动态，使得系统等效惯量的组成更加复杂。电力电子设备输出的等效惯量与传统同步机存在差异，且电压幅值和频率动态耦合特征也更加凸显，呈现非线性动态特征，大幅增加了对系统惯量做出量化评估的难度。

针对不同的频率控制策略和措施对频率动态所产生的影响，也需要对其调频能力和性能进行量化评估。对于短期内的频率分析，需要考虑电磁暂态对频率的影响；对于中期内的频率分析，需要考虑其发电机组调速器特性的影响；对于中长期内的频率分析，则需要考虑热力环节的影响，例如在“华东9·19”频率安全事故中，调频机组锅炉主蒸汽压力下降，造成一次调频能力不足，增加了频率恢复的难度。而产生的影响也不仅是对于频率动态，还应该包括对频率的时空分布的影响。

大功率缺额下电压的波动过程对RoCoF、最低频率、稳态频率等频率动态响应的全过程均有明显影响，在频率响应建模与量化评估时不容忽视。然而，现有的频率响应等值建模在分析过程中仅考虑系统的有功-频率特性，尚未能计及电压特性的影响。而且，网内各个节点的电压分布及在大功率缺额情况下的波动特性存在差异，也即电压具有分散性，这也增加了在低阶等值频率响应模型中表征电压特性影响的难度。因此，如何在频率响应等值建模时计及电压特性的影响，以保证频率安全快速仿真及在线量化评估的精度，值得深入研究。

频率安全作为威胁电力系统安全运行的一大因素，在未来的研究中，需要形成一套理论体系和量化评估技术对系统惯量和调频能力进行整体评估。

3 新型电力系统频率安全控制

新型电力系统频率安全在不同区域中其特性和要求均不相同。由于我国能源资源与需求逆向分布，所以需要远距离输送大功率，从而形成明显的“送端”和“受端”。一旦出现大功率缺额，“送端”和

“受端”的频率特性和调频需求是相反的：“送端”功率供大于求，频率飙升，需要降发电、增负荷；而“受端”功率供小于求，频率骤降，需要增发电、降负荷。

为了应对频率安全风险，传统的控制手段主要包括发电机调频、低频减负荷等措施，但仅有这些措施难以满足新型电力系统频率安全控制的需要。为此，针对新型电力系统频率响应呈现出的新的特性，探索新的理论和技术，从“源-荷-储”等方面挖掘调频资源实施互动控制，对于保障电力系统频率安全、推动行业技术进步、保障社会经济发展，有重要的理论意义和实用价值。

3.1　电源侧控制

传统的功率控制包括火电厂、水电厂、抽水蓄能、同步调相机、自动发电控制、功率控制等，广义上还可以扩展到储能电站、直流调制以及目前正在研究的新能源发电参与功率控制。

新型电力系统与传统电力系统在电源侧频率控制的一大区别在于惯性响应阶段。由于新能源发电大多通过变流器并网，其功频关系与电网耦合较弱，在没有附加控制的情况下几乎无法向电网提供惯量支撑功率[53]，因此在这一阶段频率跌落速度会加快。

在电源侧提升电力系统的惯量支撑，抑制频率的快速跌落，提高一次调频能力方面，已经有了一些研究。相比于新能源，火电机组惯量更大，一次调频可挖掘潜力也更大，文献[69]提出了一种基于多尺度形态学滤波的分频段调频控制方法，进一步挖掘了火电机组的调频能力。

针对风电也已经有了一些研究。一种思路是释放风机转子的动能，例如风电转子动能控制，是通过主动释放风机转子动能，从而达到提供短期功率支撑的目的，具体包括下垂控制、虚拟惯性控制和虚拟同步机技术。其中：下垂控制是基于本地频差，输出一个正比于频差的功率，用于平衡功率缺额，这种控制手段通常存在死区，且响应时间相对较长，一般应用于一次调频阶段；虚拟惯性控制是基于RoCoF，输出一个正比于RoCoF的功率，以平衡功率缺额，其响应速度通常快于下垂控制，理论上可以提供瞬时的惯性支撑，但实际应用中通常会人为设置时延，因此也常用于一次调频阶段；虚拟同步机技术是采用控制手段，模拟同步机外部特性，使之具备类似于同步机的特性，从而达到在发生功率扰动后瞬时提供惯性支撑的目的。文献[70-71]研究了虚拟同步机技术，通过模拟同步机组的机电暂态特性，使采用变流器的电源具有同步机组的惯量、阻尼、频率和电压调整等运行外特性，从而达到提供惯量功率支撑的目的，无论是在光伏、风电、储能甚至负荷侧都有广阔的应用前景；文献[72]提出了一种考虑机组间调频能力差异的虚拟惯量协同控制策略，通过引入转子动能评估因子和变流器容量限制因子以体现功率协调，可以在充分发挥各机组调频能力的同时避免系统频率的二次跌落现象。

而另一种思路是保留功率备用，例如变桨距角控制和超速控制，通过增加桨距角或增大转子转速的方式来控制风电机组的有功功率输出低于最大功率点跟踪模式下的输出，从而留下备用容量。其响应速度快，调节范围广，但长期运行时留有备用容量将会降低场站的收益。文献[73]提出了一种动态需求控制策略来与双馈控制相协调，减小了频率二次跌落的可能性并提高了一次调频性能。为进一步挖掘新能源的调频潜力，也可以采用基于功率备用的桨距角控制和超速控制方法。文献[74]针对无储能下的光伏电站一次调频技术，系统地介绍了多串光伏逆变器协调控制和直流链路电容器等频率调节手段，但配置多串光伏逆变器成本较高，而采用功率备用的手段又会降低光伏电站的发电效率，因此光伏电站参与频率调节的研究较少。

3.2　负荷侧控制

负荷侧的主要控制措施就是切负荷。传统上“一刀切”的集中式切负荷会导致区域性停电，产生不良影响，为此各种柔性负荷在系统调度与控制中得到了越来越多的应用[75-76]。

柔性负荷包括可中断负荷、可平移负荷、可削减负荷等，如工业高耗能负载、电动汽车、居民或商业用户空调以及其他弹性负荷。电力公司通过事先与用户签订合同，对参加电网调度的负荷给予一定的补偿和价格优惠，激励用户在规定的时间按照电力调度部门的指令，通过改变空调的设定温度、负载的端电压、电动汽车的充电计划等，灵活地改变负荷量的大小，从而起到了削减负荷的作用。对于大量分散负荷，一般通过负荷代理商的形式参与系统调控。通过柔性负荷，可以在基本不影响用户舒适度的条件下对负荷进行调节，具有经济性好、用户舒适度高等优点，因此，柔性负荷是电网的一种优质调节资源，在紧急控制中应优先使用。

不同地区具有不同的资源禀赋，电网调节手段的配置也不相同，若通过紧急功率支援、储能及柔性负荷等仍不能解决系统的安全稳定问题，则需要切除部分负荷。紧急负荷控制是一种常用的也是最为有效的控制手段，切负荷可分为集中快切、普通切负荷及低频低压减载3种类型，其中集中快切具有响应速度快的优点，一般由调度中心直接控制，需要配置专用的光纤或无线通信设备和切除装置，因此控制成本较高。普通切负荷目前有2种方法：一种是由调度中心将切负荷需求通知营销部负荷控制中心，负荷控制中心再依照事先制定的负荷控制方案，断开用户内部分路开关，切除相应量的负荷，控制精

准但速度慢；另一种是由调度中心根据政府批准的限电序位表下达指令，直接拉开线路或变压器开关，切除负荷，速度稍快但对用户影响较大。低频低压减载是校正控制措施，是系统最后一道防线，当电压或频率低于设定值时，将触发低频低压减载装置动作，切除预先设定的负荷。

在控制过程中，既要确保系统安全稳定性，又要尽量降低控制的经济代价，对于直流受端系统，还需要考虑换流站的无功特性对系统的影响，设法提高控制后系统的电压稳定性，保证系统内其他设备的安全运行，并为闭锁直流换流站的重启运行提供条件。为达到上述目标，既要避免过控，造成不必要的经济损失；又要防止欠控，错失最佳控制时机，导致系统失稳等严重后果。因此，综合运用现有的各种控制手段，选择合适的时机和适当的控制量，是包括直流受端系统在内的电力系统紧急控制的关键问题。文献[77]提出了一种频率安全分段控制下用户侧毫秒级、秒级和分钟级负荷控制优化策略，在经济性最优的前提下保证了频率控制的效果。文献[78]提出了一种频率响应负荷聚合功率建模方案和分散动作策略，为负荷主动快速响应应对大功率缺失提供了灵活方案。

事实上，现有的毫秒级精准负荷控制[79]、海量的分布式储能与柔性负荷[80-82]等，可以在保障用户基本用电需求的前提下参与频率控制。文献[83]发展了基于特高压直流严重故障时以企业可中断负荷为精准控制对象的负荷控制系统，目前已在江苏电网建成投运，实现了3.5×10^6 kW秒级精准实时控制和10^6 kW毫秒级紧急控制能力。

3.3 储能侧控制

各种类型的储能系统是电力系统的重要组成部分，飞轮、蓄电池、超导储能等功率型储能系统的功率密度高，可以根据需要进行频繁、快速的充放电，其响应速度可达到几十或几百毫秒，是一种快速、优质的紧急控制资源。功率型储能一般能量较小，可持续时间短，因而不适合承担长时间的功率调节任务。

抽水蓄能电站、压缩空气储能等能量型储能系统具有能量密度高、能量转化效率高、费用较低的特点，可以大规模存储能量，常用于平抑系统的峰谷差。但能量型储能系统的建设受到地理条件的限制，一次性投资费用也较高。由于蓄电池型储能电站具有建设快、体积小等诸多优点，且随着技术的进步，储能电池的功率密度及性价比不断提高，故近年来得到了越来越广泛的应用。

文献[84]提出了一种基于状态机的协调控制策略，考虑了风力发电场的操作约束和电池储能系统的状态从而支持风力发电场的调频能力。文献[85]提出一种基于风速分段条件下的风储联合调频控制策略，能有效规避二次频率事故。文献[86]提出一种高风电渗透率下以频率响应为限制条件的满足电网频率支撑需求的储能系统配置方法，能够有效改善风电并网环境。文献[87]提出了一种以运行成本最低为目标对储能容量进行优化的风储联合调频策略，在保证调频效果的基础上降低了成本。

3.4 协同控制

本文提到的控制方法所涉的优缺点、控制时间尺度及成本对比如表3所示。

总而言之，目前的频率安全控制方式分为2类：一是各种调频手段的分散控制，如常规发电机组的一次调频，以及新能源发电、储能等通过逆变器实现的频率响应控制，包括下垂控制、虚拟惯量控制、虚拟同步控制等，其本质是依据本地频差或者RoCoF的比例反馈控制；二是集中式功率前馈控制[88-89]，如直流功率调制、抽蓄切泵、精准负荷控制等，其本质是各种调频资源基于故障事件，按设定值实施控制，属于紧急控制范畴。

除了分散的频率控制手段，在实际频率控制中，通常都需要综合多方调频资源，达到对系统频率的协调控制。文献[90]从多方面总结了国外包含多方调频资源的快速频率响应(fast frequency response，FFR)市场研究现状。文献[91-93]从互联系统稳定性和紧急功率支援上论证了直流功率调制对系统频率稳定的重要作用。此外，也可通过调度手段来保

表3 控制方法对比

Table 3 Comparison of control methods

控制方法	优点	缺点	时间尺度	成本
风电转子动能控制	惯性控制响应速度快，可以提供惯性支撑	持续时间短，且转子转速恢复阶段吸收功率易造成频率二次跌落	较短	低
功率备用控制	可提供大量功率备用，响应速度快，调节能力强	降低场站运行收益	较短	高
功率支援	可以远距离、大规模地提供快速、灵活、可控的功率支援	可能恶化系统稳定性，加剧系统瓦解	较短	高
柔性负荷调控	可以灵活改变负荷量的大小，起到削减负荷、平衡功率的作用	精准的负荷控制速度较慢，且切断负荷会造成经济损失	较长	中
功率型储能	可以根据需要进行频繁、快速的充放电，其响应速度可达到几十或几百毫秒，是一种快速、优质的紧急控制资源	功率型储能一般能量较小，可持续时间短，因而不适合承担长时间的功率调节任务	较短	高
能量型储能	能量密度高、能量转化效率高、费用较低，可以大规模存储能量	系统的建设受到地理条件的限制，一次性投资费用较高	较长	中

证频率的安全，如文献[94]提出了一种计及源荷不确定性及频率安全的电力系统区间优化调度方法，在保证系统安全的前提下提高了计算效率。

华东电网目前已建设并投运了集成直流功率调制、抽蓄切泵和快速切除可中断负荷的华东电网频率紧急协调控制系统[95]。系统主要包含3个控制层级，即协控总站、协控主站、协控子站，其决策流程如图2所示。系统发生故障后，协控总站根据功率缺额情况，确定功率支撑总量以及3种频率紧急控制措施（直流调制、抽蓄切泵、毫秒级精准负荷控制）的功率控制量，并下发各协控主站；协控主站根据功率支撑需求和控制对象优先级进行动作决策，并下发协控子站加以执行。

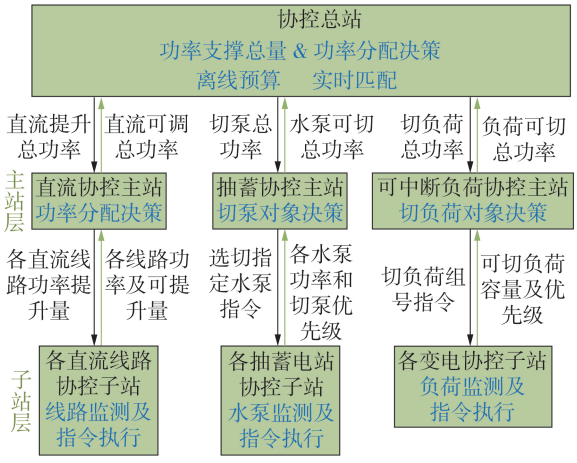

图2　频率紧急协调控制系统的控制决策流程

Fig.2　Control decision-making flowchart of frequency emergency coordinated control system

3.5　频率安全控制研究展望

在电源侧，需要研究如何进一步挖掘火电机组的一次调频能力。随着气电综合能源的发展，需要研究综合能源参与频率控制的手段。此外，如何防止新能源机组在频率故障中大量脱网也十分重要，在澳大利亚和英国电网的停电事故中，都存在由于风电场受到扰动后脱网，进而引发连锁故障的问题。在负荷侧，需要研究如何进一步加强对广义负荷的认识与调控，以及如何提升负荷能效，比如根据频率变化进行调压而改变负荷。在储能侧，随着材料科学的发展，电化学储能的成本将进一步降低，未来能够提供快速功率支撑的电化学储能可以得到大范围的应用。除此以外，FFR市场在国内的发展尚处于起步阶段，对频率响应资源市场的研究也将是一大热点。

在协调多方调频资源方面，除了现有的直流调制、抽蓄切泵、集中式储能、精准负荷控制等措施外，电网中还存在着海量的分布式频控资源，如分布式储能（包含分布式光伏联合储能）、各种柔性负荷等，也可以按照功率响应的形式参与电网的应急控制。然而，电网中的分布式资源分散而孤立，如果采用传统的集中式控制方式，存在通信依赖性高、海量数据汇总到控制中心导致计算维数灾的问题。因此，如何将上述大量孤立的分布式资源纳入现有的集中式频率紧急控制体系，实现分级分步的频率安全协调控制，值得深入研究。

在控制决策方面，目前频率安全紧急控制对控制精度和控制时效性要求较高。而随着区外来电比例和单条直流输电容量的不断提升，新型受端电网可能出现的功率缺额将逐年增大。传统的控制决策方式一般为“离线预算，实时匹配”，即：事先在离线环境下，针对系统不同的运行方式以及预定的故障清单逐个进行离线试探，据此编制紧急控制决策表；在线运行时，按实际工况和故障与决策表进行匹配，获得相关决策。然而，决策表编制完成后，不可能轻易改变，存在控制精度较差、缺乏自适应能力等问题。同时，现有的研究在离线预算时，要么在简化模型中仅考虑有功–频率特性而忽略电压特性，难以满足精度需求；要么在全系统详细模型时域仿真时考虑负荷电压特性[96]，难以在线应用。在传统的决策方式越来越难以满足频率安全紧急控制的精度和速度要求的情况下，亟需开展针对计及电压特性影响的精准快速的频率安全在线评估与控制决策的研究，实现在线乃至实时控制决策。

4　结论

频率安全已成为我国电力系统转型所面临的重要挑战。目前电力系统中新能源发电比例较小，频率安全问题的研究已经取得了重要进展。然而，在新型电力系统中新能源发电比例将过半，面向如此高比例的新能源发电和电力电子设备接入，新型电力系统频率安全问题非常严峻、亟待深入研究，基本而关键的问题是“再平衡”。就短时间尺度而言，主要是“电力再平衡”，即功率的平衡；就长时间尺度而言，主要是“电量再平衡”，即能量的平衡。这是新型电力系统的基本要求，如果不能平衡就无法正常运行。

新型电力系统频率安全需要充分挖掘和协调用好调频资源。首先，源是“主力”，即“再平衡”的主要力量。其中，新能源发电要提升功率调节能力，随着新能源发电比例的不断提高，对其参与调频能力要求也不断提高。常规电源包括火电、水电和核电，要提升深度灵活调节能力。其他电源包括储能、抽蓄、气电综合能源，要提升其参与调峰调频能力。其次，荷是“生力”，即“再平衡”的新生力量。其中，包括温控负荷、冶炼负荷、电动汽车、分布式储能、分布式新能源等，通过聚合商以及价格杠杆作用，参与系统调频和调峰。最后，储是“蓄力”，即再平衡的积蓄力

量。包括抽蓄以及其他各种类型的储能，要提升其参与调峰调频的能力。总之，在电网调节的基础上，通过“源-荷-储”互动，认知新型电力系统频率安全机理和特性，提升新型电力系统频率安全水平，是今后一段时期需要重点研究的内容。

参考文献：

[1] 国家能源局. 国家能源局发布2022年全国电力工业统计数据[EB/OL]. (2023-01-18)[2023-02-15]. http://www.nea.gov.cn/2022-01/18/c_1310691509.htm.

[2] 舒印彪，陈国平，贺静波，等. 构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J]. 中国工程科学，2021，23(6)：61-69.
SHU Yinbiao，CHEN Guoping，HE Jingbo，et al. Building a new electric power system based on new energy sources[J]. Strategic Study of CAE，2021，23(6)：61-69.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 孙华东，许涛，郭强，等. 英国“8·9”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 中国电机工程学报，2019，39(21)：6183-6192.
SUN Huadong，XU Tao，GUO Qiang，et al. Analysis on blackout in great Britain power grid on August 9th，2019 and its enlightenment to power grid in China[J]. Proceedings of the CSEE，2019，39(21)：6183-6192.

[6] 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)：1-25.
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)：1-25.

[7] 周海锋，倪腊琴，徐泰山. 电力系统功率频率动态特性研究[J]. 电网技术，2009，33(16)：58-62.
ZHOU Haifeng，NI Laqin，XU Taishan. Study on power-frequency dynamic characteristic of power grid[J]. Power System Technology，2009，33(16)：58-62.

[8] 鞠平，秦川，罗建裕. 现代电力系统频率安全分析与控制[M]. 北京：科学出版社，2022：46-65.

[9] 刘昊宇，刘崇茹，蒋思雯. 多端柔性直流输电系统动态附加频率控制策略[J]. 电力自动化设备，2022，42(1)：164-170.
LIU Haoyu，LIU Chongru，JIANG Siwen. Dynamic additional frequency control strategy for VSC-MTDC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment，2022，42(1)：164-170.

[10] 李虎成，袁宇波，卞正达，等. 面向特高压交直流大受端电网的频率紧急控制特性分析[J]. 电力工程技术，2017，36(2)：27-31，109.
LI Hucheng，YUAN Yubo，BIAN Zhengda，et al. The frequency emergency control characteristic analysis for UHV AC/DC large receiving end power grid[J]. Electric Power Engineering Technology，2017，36(2)：27-31，109.

[11] 刘磊，杜兆斌，管晓宏，等. 互联系统结构保留的频率慢动态仿真分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版)，2008，36(2)：139-146.
LIU Lei，DU Zhaobin，GUAN Xiaohong，et al. Simulation analysis of slow-frequency dynamics for interconnected power systems with preserved network structure[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition)，2008，36(2)：139-146.

[12] 李常刚，刘玉田，张恒旭，等. 基于直流潮流的电力系统频率响应分析方法[J]. 中国电机工程学报，2009，29(34)：36-41.
LI Changgang，LIU Yutian，ZHANG Hengxu，et al. Power system frequency response analysis based on the direct current loadflow[J]. Proceedings of the CSEE，2009，29(34)：36-41.

[13] 张国衡. 电力系统动态潮流计算及网络拓扑分析[D]. 济南：山东大学，2007.
ZHANG Guoheng. Investigation on dynamic load flow and network topological analysis[D]. Jinan：Shandong University，2007.

[14] 王晓茹，阮铮，刘克天. 电力系统扰动后稳态频率预测直接法改进[J]. 电力系统及其自动化学报，2010，22(4)：1-5.
WANG Xiaoru，RUAN Zheng，LIU Ketian. Improvement of direct predictive algorithm of power system steady frequency after disturbances[J]. Proceedings of the CSU-EPSA，2010，22(4)：1-5.

[15] 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.

[16] 艾鹏，滕予非，王晓茹，等. 计及紧急直流功率支援的扰动后稳态频率预测算法[J]. 电力系统自动化，2017，41(13)：92-99.
AI Peng，TENG Yufei，WANG Xiaoru，et al. Prediction algorithm of steady frequency after disturbances considering emergency DC power support[J]. Automation of Electric Power Systems，2017，41(13)：92-99.

[17] 胡益，王晓茹，艾鹏，等. 基于广域量测的交直流混联系统发生扰动后稳态频率预测算法[J]. 电力自动化设备，2018，38(11)：35-42.
HU Yi，WANG Xiaoru，AI Peng，et al. Prediction algorithm of steady-state frequency after disturbance for hybrid AC/DC power system based on wide area measurement[J]. Electric Power Automation Equipment，2018，38(11)：35-42.

[18] CHAN M L，DUNLOP R D，SCHWEPPE F. Dynamic equivalents for average system frequency behavior following major distribances[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems，1972，PAS-91(4)：1637-1642.

[19] ANDERSON P M，MIRHEYDAR M. A low-order system frequency response model[J]. IEEE Transactions on Power Systems，1990，5(3)：720-729.

[20] NAKIGANDA A M，DEHGHAN 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.

[21] ZHANG Ziyang，DU Ershun，TENG Fei，et al. Modeling frequency dynamics in unit commitment with a high share of renewable energy[J]. IEEE Transactions on Power sSystems，2020，35(6)：4383-4395.

[22] LI Changgang，WU Yue，SUN Yanli，et al. Continuous underfrequency load shedding scheme for power system adaptive frequency control[J]. IEEE Transactions on Power Systems，2020，35(2)：950-961.

[23] SHI Qingxin，LI Fangxing，HU Qinran，et al. Dynamic demand

control for system frequency regulation: concept review, algorithm comparison, and future vision[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 154: 75-87.

[24] 胡杰，余贻鑫. 电力系统动态等值参数聚合的实用方法[J]. 电网技术，2006，30(24)：26-30.
HU Jie, YU Yixin. A practical method of parameter aggregation for power system dynamic equivalence[J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 26-30.

[25] 李东辉，臧晓明，鞠平，等. 电力系统频率响应的改进模型与参数估计[J]. 电力工程技术，2019，38(5)：85-90.
LI Donghui, ZANG Xiaoming, JU Ping, et al. The improved model and parameter estimation for frequency response of power system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(5): 85-90.

[26] 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.

[27] 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)：3392-3406，3665.
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, 3665.

[28] GENC I, DIAO R S, VITTAL V, et al. Decision tree-based preventive and corrective control applications for dynamic security enhancement in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(3): 1611-1619.

[29] PADRÓN S, HERNÁNDEZ M, FALCÓN A. Reducing underfrequency load shedding in isolated power systems using neural networks. gran Canaria: a case study[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 63-71.

[30] WANG Q, LI F, TANG Y, 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.

[31] 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.

[32] 杨丽，孙元章，徐箭，等. 基于在线强化学习的风电系统自适应负荷频率控制[J]. 电力系统自动化，2020，44(12)：74-83.
YANG Li, SUN Yuanzhang, XU Jian, et al. Adaptive load frequency control of wind power system based on online reinforcement learning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12): 74-83.

[33] 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)：4104-4118.
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): 4104-4118.

[34] 张雯欣，吴琛，黄伟，等. 考虑频率二次跌落的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.

[35] 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.

[36] 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.

[37] 张恒旭，曹永吉，张怡，等. 电力系统频率动态行为衍变与分析方法需求综述[J]. 山东大学学报(工学版)，2021，51(5)：42-52.
ZHANG Hengxu, CAO Yongji, ZHANG Yi, et al. Review of frequency dynamic behavior evolution and analysis method requirements of power system[J]. Journal of Shandong University(Engineering Science), 2021, 51(5): 42-52.

[38] 张恒旭，刘玉田，薛禹胜. 考虑累积效应的频率偏移安全性量化评估[J]. 电力系统自动化，2010，34(24)：5-10.
ZHANG Hengxu, LIU Yutian, XUE Yusheng. Quantitative assessment of transient frequency deviation security considering cumulative effect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(24): 5-10.

[39] 张恒旭，刘玉田. 电力系统动态频率响应时空分布特征量化描述[J]. 中国电机工程学报，2009，29(7)：64-70.
ZHANG Hengxu, LIU Yutian. Quantitative description of space-time distribution features of dynamic frequency responses[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 64-70.

[40] 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.

[41] PULGAR-PAINEMAL H, WANG Y J, SILVA-SARAVIA H. On inertia distribution, inter-area oscillations and location of electronically-interfaced resources[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 995-1003.

[42] 吴琛，花赟玥，陈可欣，等. 考虑低电压穿越场景的频率稳定约束风电承载能力量化方法[J/OL]. 电力自动化设备.(2022-12-22)[2023-02-15]. https://doi.org/10.16081/j.epae.202212016.

[43] 刘中建，周明，李昭辉，等. 高比例新能源电力系统的惯量控制技术与惯量需求评估综述[J]. 电力自动化设备，2021，41(12)：1-11，53.
LIU Zhongjian, ZHOU Ming, LI Zhaohui, et al. Review of inertia control technology and requirement evaluation in renewable-dominant power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(12): 1-11, 53.

[44] 高晖胜，辛焕海，黄林彬，等. 新能源电力系统的共模频率分析及其特征量化[J]. 中国电机工程学报，2021，41(3)：890-900.
GAO Huisheng, XIN Huanhai, HUANG Linbin, et al. Characteristic analysis and quantification of common mode frequency in power systems with high penetration of renewable resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3): 890-900.

[45] 常烨骁，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)：621-631.
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): 621-631.

[46] 申家锴，刘洋，李卫东，等. 考虑频率与区间联络线功率安全约束的两区互联电力系统机组组合[J]. 电力自动化设备，2022，42(11)：167-189.
SHEN Jiakai, LIU Yang, LI Weidong, et al. Unit commitment

considering safety constraints of frequency and inter-areal tie-line power in two-area interconnected power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2022,42(11):167-189.
[47] EGIDO I,FERNANDEZ-BERNAL F,CENTENO P,et al. Maximum frequency deviation calculation in small isolated power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2009,24(4):1731-1738.
[48] FAN Chengwei,WANG Xiaoru,TENG Yufei,et al. Minimum frequency estimation of power system considering governor deadbands[J]. IET Generation,Transmission & Distribution,2017,11(15):3814-3822.
[49] ZHANG Yuqian,GUO Qinglai,ZHOU Yanzhen,et al. Online frequency security assessment based on analytical model considering limiting modules[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems,2021,8(5):1363-1372.
[50] 丁立,乔颖,鲁宗相,等. 高比例风电对电力系统调频指标影响的定量分析[J]. 电力系统自动化,2014,38(14):1-8.
DING Li,QIAO Ying,LU Zongxiang,et al. Impact on frequency regulation of power system from wind power with high penetration[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(14):1-8.
[51] 王春义,牟宏,柳璐,等. 可再生能源和特高压接入下的区域电网可靠性和稳定性评估[J]. 电力系统及其自动化学报,2019,31(1):99-104.
WANG Chunyi,MOU Hong,LIU Lu,et al. Reliability and stability assessment on regional power grid considering the integration of renewable energy and UHV[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2019,31(1):99-104.
[52] 刘洋,王聪颖,夏德明,等. 电网故障导致大面积风电低电压穿越对电网频率的影响分析及措施[J]. 电网技术,2021,45(9):3505-3514.
LIU Yang,WANG Congying,XIA Deming,et al. Influence of large area wind power low voltage ride-through on power grid frequency caused by power grid faults[J]. Power System Technology,2021,45(9):3505-3514.
[53] 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):5179-5192.
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):5179-5192.
[54] CHEN Lei,WANG Xiaohai,MIN Yong,et al. Modelling and investigating the impact of asynchronous inertia of induction motor on power system frequency response[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2020,117:105708.
[55] 王玎,袁小明. 异步电机机电时间尺度有效惯量评估及其对可再生能源并网系统频率动态的影响[J]. 中国电机工程学报,2018,38(24):7258-7266,7452.
WANG Ding,YUAN Xiaoming. Available inertia estimation of induction machine in electromechanical timescale and its effects on frequency dynamics of power systems with renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(24):7258-7266,7452.
[56] SUN M,FENG Y,WALL P,et al. On-line power system inertia calculation using wide area measurements[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2019,109:325-331.
[57] GU H J,YAN R F,SAHA T K. Minimum synchronous inertia requirement of renewable power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2018,33(2):1533-1543.
[58] 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.
[59] YOU Shutang,LIU Yong,KOU Gefei,et al. Non-invasive identification of inertia distribution change in high renewable systems using distribution level PMU[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2018,33(1):1110-1112.
[60] ZHANG J B,XU H C. Online identification of power system equivalent inertia constant[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2017,64(10):8098-8107.
[61] GAO Huisheng,XIN Huanhai,HUANG Linbin,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.
[62] 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.
[63] 陈雪梅,陆超,韩英铎. 电力系统频率问题浅析与频率特性研究综述[J]. 电力工程技术,2020,39(1):1-9.
CHEN Xuemei,LU Chao,HAN Yingduo. Review of power system frequency problems and frequency dynamic characteristics[J]. Electric Power Engineering Technology,2020,39(1):1-9.
[64] 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):4603-4612.
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):4603-4612.
[65] 申家锴,李卫东,李正文,等. 计及一次调频死区与限幅的高比例风电电力系统机组组合[J]. 电网技术,2022,46(4):1326-1337.
SHEN Jiakai,LI Weidong,LI Zhengwen,et al. Unit commitment of power system with high proportion of wind power considering the deadband and limiter of primary frequency response[J]. Power System Technology,2022,46(4):1326-1337.
[66] 鞠平,马大强. 电力负荷的动静特性对低频振荡阻尼的影响分析[J]. 浙江大学学报(自然科学版),1989,23(5):750-760.
JU Ping,MA Daqiang. Effects of static and dynamic loads on the damping of low-frequency oscillations in electric power systems[J]. Journal of Zhejiang University(Natural Science),1989,23(5):750-760.
[67] 李洪宇,鞠平,余一平,等. 随机激励下电力系统有界波动域及域内概率解析分析方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3561-3568.
LI Hongyu,JU Ping,YU Yiping,et al. Bounded fluctuations region and analytic method of intra-region probability in power system under stochastic excitations[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(14):3561-3568.
[68] LI Hongyu,JU Ping,GAN Chun,et al. Analytic analysis for dynamic system frequency in power systems under uncertain variability[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2019,34(2):982-993.
[69] 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.
[70] ZHONG Qingchang, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2011,58(4):1259-1267.
[71] 吕志鹏，盛万兴，刘海涛，等. 虚拟同步机技术在电力系统中的应用与挑战[J]. 中国电机工程学报，2017，37(2)：349-360.
LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, LIU Haitao, et al. Application and challenge of virtual synchronous machine technology in power system[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(2):349-360.
[72] 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.
[73] 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.
[74] 汪红波，周强明，刘恒怡，等. 光伏发电系统一次调频技术回顾与发展趋势[J]. 广东电力，2022，35(1)：11-21.
WANG Hongbo, ZHOU Qiangming, LIU Hengyi, et al. Review and development trend of primary frequency modulation technology in photovoltaic power generation system[J]. Guangdong Electric Power,2022,35(1):11-21.
[75] 王云，刘东，李庆生. 主动配电网中柔性负荷的混合系统建模与控制[J]. 中国电机工程学报，2016，36(8)：2142-2150.
WANG Yun, LIU Dong, LI Qingsheng. Modeling and control of flexible load based on hybrid system in active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(8):2142-2150.
[76] 李顺，唐飞，廖清芬，等. 计及需求响应的智能化微网频率紧急控制策略[J]. 中国电机工程学报，2018，38(1)：51-60，342.
LI Shun, TANG Fei, LIAO Qingfen, et al. Intelligent frequency emergency control strategy considering demand response in the micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(1):51-60,342.
[77] 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.
[78] 陶苏朦，王琦，赵奇，等. 大功率缺失下频率响应负荷聚合建模与分散控制方法[J]. 电力自动化设备，2020，40(2)：182-188.
TAO Sumeng, WANG Qi, ZHAO Qi, et al. Aggregation modeling and decentralized control method of frequency response load under severe power shortage[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(2):182-188.
[79] 任建锋，颜云松，罗剑波，等. 毫秒级精准负荷控制系统设计与工程应用[J]. 电力工程技术，2018，37(1)：45-50.
REN Jianfeng, YAN Yunsong, LUO Jianbo, et al. The design of millisecond-level precisive load control system and engineering application[J]. Electric Power Engineering Technology,2018,37(1):45-50.
[80] BEIL I, HISKENS I, BACKHAUS S. Frequency regulation from commercial building HVAC demand response[J]. Proceedings of the IEEE,2016,104(4):745-757.
[81] LIU Hui, QI Junjian, WANG Jianhui, et al. EV dispatch control for supplementary frequency regulation considering the expectation of EV owners[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2018,9(4):3763-3772.
[82] CAI J, BRAUN J E. Laboratory-based assessment of HVAC equipment for power grid frequency regulation: methods, regulation performance, economics, indoor comfort and energy efficiency[J]. Energy and Buildings,2019,185:148-161.
[83] 罗建裕，李海峰，江叶峰，等. 基于稳控技术的源网荷友好互动精准负荷控制系统[J]. 电力工程技术，2017，36(1)：25-29.
LUO Jianyu, LI Haifeng, JIANG Yefeng, et al. Source network load friendly interactive and precise load control system based on stability control technology[J]. Electric Power Engineering Technology,2017,36(1):25-29.
[84] TAN Jin, ZHANG Yingchen. Coordinated control strategy of a battery energy storage system to support a wind power plant providing multi-timescale frequency ancillary services[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2017,8(3):1140-1153.
[85] 姜惠兰，蔡继朝，肖瑞，等. 一种提高系统频率响应特性的风储协调控制策略[J]. 电力自动化设备，2021，41(7)：44-51.
JIANG Huilan, CAI Jizhao, XIAO Rui, et al. A wind-storage coordinated control strategy for improving system frequency response characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(7):44-51.
[86] 刘洪波，张崇，孙同，等. 高风电渗透率下考虑电网频率支撑需求的储能系统配置方法[J]. 电力自动化设备，2021，41(10)：36-43.
LIU Hongbo, ZHANG Chong, SUN Tong, et al. Configuration method of energy storage system considering grid frequency support demand under high wind power penetration[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(10):36-43.
[87] 朱瑛，秦立宽，颜全椿，等. 考虑频率响应过程的风储联合调频策略及储能系统优化配置方法[J]. 电力自动化设备，2021，41(10)：28-35.
ZHU Ying, QIN Likuan, YAN Quanchun, et al. Wind-storage combined frequency regulation strategy and optimal configuration method of energy storage system considering process of frequency response[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(10):28-35.
[88] 吴限，李梓锋，李卫东，等. 背靠背直流互联系统主动频率响应控制策略[J]. 高电压技术，2022，48(1)：232-245.
WU Xian, LI Zifeng, LI Weidong, et al. An active frequency response control strategy for back-to-back DC interconnection system[J]. High Voltage Engineering,2022,48(1):232-245.
[89] 曹永吉，张恒旭，张怡，等. 基于事件驱动的机组快速频率响应控制方法[J]. 电力系统自动化，2021，45(19)：148-154.
CAO Yongji, ZHANG Hengxu, ZHANG Yi, et al. Event-driven fast frequency response control method for generator unit[J]. Automation of Electric Power Systems,2021,45(19):148-154.
[90] 陈亦平，卓映君，刘映尚，等. 高比例可再生能源电力系统的快速频率响应市场发展与建议[J]. 电力系统自动化，2021，45(10)：174-183.
CHEN Yiping, ZHUO Yingjun, LIU Yingshang, et al. Development and recommendation of fast frequency response market for power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems,2021,45(10):174-183.
[91] 朱良合，袁志昌，盛超，等. 基于柔性直流输电的异步互联系统频率支援控制方法综述[J]. 电力自动化设备，2019，39(2)：84-92.
ZHU Lianghe, YUAN Zhichang, SHENG Chao, et al. Review of frequency support control methods for asynchronous interconnection system based on VSC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(2):84-92.
[92] 张步涵，陈龙，李皇，等. 利用直流功率调制增强特高压交流互联系统稳定性[J]. 高电压技术，2010，36(1)：116-121.
ZHANG Buhan, CHEN Long, LI Huang, et al. Improving the

stability of UHV AC interconnected system by the DC power modulation[J]. High Voltage Engineering,2010,36(1):116-121.
[93] 谢惠藩,张尧,夏成军. 特高压紧急直流功率支援策略研究[J]. 电力自动化设备,2008,28(8):1-7.
XIE Huifan,ZHANG Yao,XIA Chengjun. Study of UHV emergency DC power support strategy[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(8):1-7.
[94] 宋晓芳,周海强,薛峰,等. 计及源荷不确定性及频率安全的电力系统区间优化调度方法[J]. 电力自动化设备,2022,42(7):212-220.
SONG Xiaofang, ZHOU Haiqiang, XUE Feng, et al. Interval optimal dispatching method of power system considering source-load uncertainty and frequency security[J]. Electric Power Automation Equipment,2022,42(7):212-220.
[95] 许涛,励刚,于钊,等. 多直流馈入受端电网频率紧急协调控制系统设计与应用[J]. 电力系统自动化,2017,41(8):98-104.
XU Tao, LI Gang, YU Zhao, et al. Design and application of emergency coordination control system for multi-infeed HVDC receiving-end system coping with frequency stability problem [J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(8):98-104.
[96] SAJJADI M, SEIFI H, DELKHOSH H. A new approach for system-wide power system frequency model validation via measurement data[J]. Engineering Reports,2022,4(1):1-24.

作者简介:

韩泽雷(1997—),男,博士研究生,主要研究方向为新型电力系统频率安全分析与控制(**E-mail**:hhuhz@hhu.edu.cn);

鞠 平(1962—),男,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统建模、分析与控制(**E-mail**:pju@hhu.edu.cn);

秦 川(1981—),男,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统频率分析与控制(**E-mail**:cqin@hhu.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

Review and prospect of research on frequency security of new power system

HAN Zelei[1],JU Ping[1],QIN Chuan[1],SUN Dayan[2],SUN Huadong[3],ZHENG Yi[1]
(1. College of Energy and Electrical Engineering,Hohai University,Nanjing 211100,China;
2. State Grid Dispatching Control Center,Beijing 100031,China;
3. China Electric Power Research Institute Co.,Ltd.,Beijing 100192,China)

Abstract: With the accelerating process of low carbon transformation of power system, the power grid is becoming a new power system transformation characterized by "high proportion of new energy" and "high proportion of power electronic equipment". The fluctuation of new energy output and the large-scale access of power electronic equipment not only significantly increase the unbalanced power impact of the system, but also weaken the frequency support ability of the system, which brings a severe challenge to the frequency security. From the perspective of modeling, analysis and control of frequency security, firstly four kinds of frequency response models of power system are summarized and compared, that is, full system detailed model, linearized model, single-machine equivalent model and artificial intelligence model. Then the frequency security index of power system and its quantitative evaluation methods and influencing factors are summarized. Finally, the frequency security control methods are summarized from the aspects of "source-load-storage" and its coordinated control, the frequency emergency coordinated control system is introduced, and the aspects of modeling, analysis and control are proposed.

Key words: new power system; frequency security; frequency response modeling; frequency mechanism analysis; frequency security control