

低惯量电力系统频率稳定分析与控制研究综述及展望

文云峰, 杨伟峰, 林晓煌

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:大容量直流和高比例新能源接入下,越来越多的电力系统正逐渐演变为低惯量电力系统。低惯量电力系统惯量支撑力度弱、出力不确定性强、频率调节能力和阻尼特性差,致使频率稳定问题日益凸显。为更好地理解电力系统在低惯量运行场景下的频率稳定威胁以及为有效制定应对策略提供参考,对低惯量电力系统频率稳定分析与控制领域的国内外研究进展进行综述与展望。首先,分析低惯量运行场景产生的主要原因及其对频率稳定的潜在影响,并介绍近年来实际电网频率问题的典型案例。进而,对基于时域仿真、数学解析、数据驱动的各类频率稳定分析方法进行阐述。从“源、网、荷、储”多类型有功资源调频能力挖掘、多道防线加强与协调配合等角度给出改善低惯量电力系统频率稳定的控制措施。最后,展望了该领域未来需深入探索的研究方向。

关键词:低惯量电力系统;惯性;频率稳定;频率控制;稳定性;新能源;高压直流输电

中图分类号:TM 712

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202009043

0 引言

近年来,国内外诸多电力系统正逐步从常规电源主导向风、光等新能源主导的形态转型升级^[1-2]。截至2019年底,我国风电和光伏发电累计装机分别达到2.1亿kW和2.04亿kW,新能源装机并网容量居世界首位,21个省(区)新能源发电装机已成为第一、第二大电源^[3]。与此同时,为实现清洁能源的远距离跨区输送和消纳,越来越多的大容量直流输电工程投运。目前,我国正在建设和已投运的特高压直流输电工程达18项,送端与受端电网密集型直流送出/馈入程度不断加深,部分区域电网间已实现多直流异步互联格局^[4]。例如,2020年,云南电网通过昆柳龙、楚穗、普侨等9回大容量直流和鲁西背靠背直流(直流容量总计44.6GW)与南方电网主网异步互连;西南电网通过宾金、锦苏、向上等3回特高压直流和渝鄂背靠背直流(直流容量总计30.2GW)分别与华东、华中电网异步联网;“十四五”期间,华中和华东等受端电网馈入的特高压直流数目将分别达到5回和9回,直流馈入容量分别达到40GW和75.6GW^[5-6]。

在上述背景下,未来越来越多的电力系统将逐渐演变为直流和新能源高渗透的低惯量电力系统(low-inertia power systems)。这是由于新能源大多

通过电力电子变流器接入电网,与系统频率解耦,有功功率扰动下不能够为电网主动提供惯量支撑^[7]。受国家煤控政策、节能减排及大气污染防治行动计划等因素影响,近年来大量煤电机组被关停,部分电网呈现出常规电源空心化态势,加剧系统转动惯量下降程度。除电源结构变化外,输/配电侧及负荷侧的转变也对系统惯量水平造成一定影响。例如,大容量直流馈入挤占受端电网常规同步电源开机容量,多直流异步联网使系统同步规模减小,采用变频器的分布式发电、微电网、直流配电网和负荷侧有大量电力电子设备接入均会使系统惯量水平呈现不同程度的降低。未来,柔性多端直流电网与交流电网互联后,所连接交流电网的转动惯量水平将被进一步削弱^[8]。

低惯量电力系统惯量支撑力度弱、出力不确定性强、频率调节能力和阻尼特性差,致使频率稳定问题日益凸显^[9-10]。大容量直流和高比例新能源接入下,直流闭锁/连续换相失败、换流器故障、新能源集群脱网等多种故障场景均可能带来巨量的有功冲击,造成系统频率变化速率RoCoF(Rate of Change of Frequency)增加,频率偏差增大,易触发低频减载、高频切机等第三道防线安全自动装置动作,存在大面积切负荷/切机风险^[11-12]。近年来,英国“8·9”、澳大利亚“9·28”等大停电事故的发生引起国内外研究机构对低惯量电力系统频率稳定问题的高度关注^[13-14]。

针对低惯量电力系统频率稳定问题,国内外已开展许多相关研究。但当前对低惯量电力系统频率稳定问题的认识仍不够全面,特别是对频率稳定的分析方法及改善频率稳定性的控制措施仍缺乏深入、综合的分析与探讨。为更好地理解电力系统在

收稿日期:2020-07-26; **修回日期:**2020-08-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51707017);湖南省自然科学基金优秀青年基金资助项目(2020JJ3011);湖湘青年科技创新人才项目

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51707017),Hunan Provincial Natural Science Foundation for Excellent Young Scholars(2020JJ3011) and Huxiang Young Talents Science and Technology Innovation Program

低惯量运行场景下的频率稳定威胁和准备应对策略,本文对低惯量电力系统频率稳定分析与控制领域的国内外研究进展进行综述与展望。首先,分析典型的低惯量运行场景及频率稳定机理,并介绍近年来实际电网中发生的典型频率事件。进而,对频率稳定分析的各类方法进行阐述。最后,从挖掘多类型有功资源调频能力、多道防线加强与协调配合等角度给出提升频率稳定的控制措施,并展望了未来需深入探索的研究方向。

1 低惯量电力系统频率稳定问题

1.1 低惯量运行场景及其对频率稳定的潜在影响

大量电力电子设备接入后,电力系统可能存在多种低惯量运行场景。为全面了解低惯量运行场景对系统频率所造成的威胁,本节分别从“发电-输电-配电-用电”各环节出发,叙述惯量下降原因及其对频率稳定的潜在影响。

(1)发电侧:大规模新能源集中接入。

电力市场下,规模化新能源集中接入电网后将替代一部分常规电源开机容量,由于新能源机组大多经变流器并网,有功出力无法主动响应频率变化,从而对系统惯量水平和频率稳定造成恶性影响。新能源并网设备耐压、耐频能力差,在大扰动下存在新能源集群连锁脱网风险,可能造成巨量有功缺额和系统频率大幅跌落。而常规电源空心化态势下,新能源出力的随机性、间歇性及波动性给发电侧引入了强不确定性,使得电力平衡调节面临更大挑战,威胁系统频率稳定性。近年来,在春节等小负荷运行方式期间,我国多个省级电网新能源最大出力占比超过用电负荷的50%,新能源消纳目标和频率稳定约束两者相互之间冲突加剧。

(2)输电侧:密集型直流送出和馈入。

大容量远距离直流输电为有效促进水电和新能源跨区消纳、能源资源大范围优化配置发挥了重要作用。然而,密集型直流送出和馈入也给系统惯量特性和频率稳定带来负面影响。当送/受端系统间联络通道“强直弱交”特征明显时,由于交流互换功率占比较低,电网间联系不紧密,加上电力电子设备及其复杂控制策略影响,交直流通道间的相互作用可能造成频率振荡现象^[15-16]。而当送/受端处于异步联网状态时,原有大型同步电网将被分割为2个异步子网,使得转动惯量水平及调频能力下降,易引起机组调频、直流调制动作用频繁和电网备用容量不足等问题。此外,多直流异步联网格局下,大容量特高压直流双极闭锁或多回直流连续换相失败造成有功冲击大、不平衡能量波及范围广,导致送端和受端电网将分别出现高频、低频稳定问题。若送端和受端电网均较弱,可能引起送/受端分别出现大面积

切机和切负荷等严重事故。随着柔性直流输电技术的发展,未来柔性多端直流电网与交流电网互联后,所连交流电网的转动惯量水平将被进一步削弱^[17]。

(3)配电侧:分布式发电、微电网和直流配电网馈入。

采用变流器的分布式发电、微电网、直流配电网持续馈入后,除变流器设备影响外,由于部分区域用电负荷可就地自主供给,使主网同步电源开机数量被迫减少,转动惯量、热备用不足引起的频率稳定问题进一步加深^[18-19]。欧美国家许多配电网中装有RoCoF保护装置,其动作阈值设置已难以满足低惯量场景下的运行要求:低惯量场景下,RoCoF过快会导致RoCoF保护装置大面积动作。目前,爱尔兰电网、英国电网等许多公司已提出修改保护装置RoCoF触发值的标准或建议。例如,英国电网要求将RoCoF触发值从原有的 $\pm 0.125 \text{ Hz/s}$ 提升至 $\pm 1 \text{ Hz/s}$ ^[20]。

(4)用电侧:大量电力电子设备的接入。

随着科技发展和产业升级,大量具有变流器接口的设备在用电侧持续接入,如电动汽车、小型风机、屋顶光伏等,这些设备对系统频率稳定也会造成影响。与传统恒定阻抗和恒定电流负荷相比,变流器接口负荷不响应频率变化,使整体负荷频率特性变差。

1.2 频率稳定问题的机理分析

频率稳定是指电力系统受到小扰动或大扰动后,系统频率能够保持或恢复到允许的范围,不发生频率振荡或崩溃的能力^[21]。我国《电力系统安全稳定导则》中给出的频率稳定判据是:系统频率能够迅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数值^[21]。判据中的相关重要频率特征与本文讨论的惯量之间存在一定联系,下面将简单地就频率稳定问题进行机理分析。

电力系统在运行时刻的总体惯量水平(记作 H^{SYS} ,单位为 $\text{MW}\cdot\text{s}$)可用系统中所有开机的同步机组总旋转动能表示:

$$H^{\text{SYS}} = \sum_{i=1}^N H_i S_i x_i \quad (1)$$

其中, H_i 为同步机组 i 的惯性时间常数; S_i 为同步机组 i 的额定容量; N 为同步机组数量; x_i 表征机组 i 的开停机状态(等于0时为关机,等于1时为开机)。

在仅考虑同步发电机组惯性响应和一次调频措施的情况下,系统频率的动态响应可由等值发电机组转子运动方程简化得到:

$$\frac{2H^{\text{SYS}}}{f^0} \frac{df(t)}{dt} = \Delta P_G(t) - \Delta P_L - D\Delta f(t) \quad (2)$$

其中, f^0 为正常状态时的系统频率; $f(t)$ 为系统惯性

中心频率; D 为负荷阻尼系数; ΔP_L 为扰动产生的有功不平衡量; $\Delta P_C(t)$ 为机组一次调频有功调整量。

系统受扰后初始时刻对应的有功不平衡量最大,由 $\Delta P_C(t=0^+)=0$ 、 $\Delta f(t=0^+)=0$ 可得 RoCoF 最大值 R^{\max} 为:

$$R^{\max} = \left. \frac{df(t)}{dt} \right|_{t=0^+} = -\frac{\Delta P_L f^0}{2H^{\text{SYS}}} \quad (3)$$

准稳态频率偏差 Δf^{ss} 可用机组一次调频备用容量完全释放状况 ($\Delta P_C = R$) 下的频率偏差表示^[22]:

$$\Delta f^{\text{ss}} = \Delta f \Big|_{t \rightarrow \infty} = -\frac{R - \Delta P_L}{D} \quad (4)$$

根据文献[23],系统受扰后的频率极值偏差可由式(5)所示的单机系统频率响应 SFR (System Frequency Response) 模型的频率偏差表达式推得。

$$\Delta f(t) = \frac{K\Delta P}{DK+1} \left[1 + \alpha e^{-s\omega_n t} \sin(\omega_r t + \varphi) \right] \quad (5)$$

其中, K 为机组调速器调速增益; ω_n 为自然振荡角频率; s 为阻尼比; ω_r 为阻尼角频率; α 和 φ 为在 SFR 模型参数推导频率表达式时产生的系数; ΔP 为等效有功扰动量,与系统惯量相关,且 $\Delta P = \frac{H^{\text{eq}}}{H^{\text{SYS}}} \Delta P_L$, H^{eq} 为单机 SFR 模型中机组的等效惯量。

基于文献[24],对式(5)所示的频率偏差求导可得:

$$\frac{d\Delta f(t)}{dt} = \frac{K\Delta P}{DK+1} \alpha \omega_n e^{-s\omega_n t} \sin(\omega_r t + \varphi_1) \quad (6)$$

其中, $\varphi_1 = \arctan \frac{\omega_r T_R}{1 - s\omega_n T_R}$, T_R 为机组再热时间常数。

由于频率极值点出现时刻对应导数 $d\Delta f(t)/dt = 0$ 时刻,故极值点时刻可以表示为:

$$t^{\text{nadir}} = \frac{1}{\omega_r} \arctan \frac{\omega_r T_R}{s\omega_n T_R - 1} \quad (7)$$

最后,将式(7)代入式(5)中,可得到简化的频率极值偏差 Δf^{nadir} 解析表达式为:

$$\Delta f^{\text{nadir}} = \frac{K\Delta P}{DK+1} \left(1 + \sqrt{1-s^2} \right) \alpha e^{-s\omega_n t^{\text{nadir}}} \quad (8)$$

图1给出了不同惯量水平下系统受到相同大小

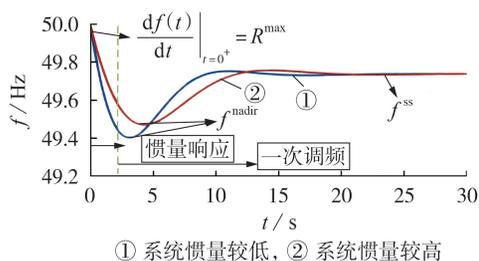


图1 系统受扰后频率动态变化与惯量大小的关系
Fig.1 Relationship between post-fault frequency dynamics and inertia of system

扰动后的频率动态变化曲线。结合图1和式(3)、(4)、(8)给出的简化形式的频率指标解析式可以看出:

(1)系统受扰后最大 RoCoF 与有功不平衡量呈正比而与惯量水平呈反比关系,事故容量越大、系统惯量越低, RoCoF 变化越快,越容易触及 RoCoF 保护动作阈值;

(2)系统受扰后的频率极值偏差随系统惯量水平和一次调频能力的降低而增大,为维持频率偏差在电网规程允许的事故发生后偏差范围 ($-\Delta f^{\text{max}} \leq \Delta f^{\text{nadir}} \leq \Delta f^{\text{max}}$) 内,系统需具备足够的惯量水平、备用容量和调节速率以应对运行中可能出现的极限故障;

(3)准稳态频率偏差主要与有功扰动大小、机组一次调频备用容量及负荷阻尼特性相关,与惯量水平无直接关系。

可以看出,在低惯量运行场景中,系统受扰后的 RoCoF 和频率极值偏差这2个重要的暂态频率指标都将趋于恶化。当这些指标约束被违反时,系统内相应的低频/高频保护装置将被触发,危及系统稳定运行^[21]。另外,由于新能源和直流并网设备在辅助调频控制策略影响下可能对系统频率呈现负阻尼特性,这将使系统频率在爬升或回调至准稳态过程中出现振荡现象,进一步复杂化频率稳定问题^[7,25]。

2 近年来实际电网频率问题典型案例

2.1 英国“8·9”大停电事故

2019年8月9日,英国电网遭受雷击引起单相短路接地,部分海上风电、分布式电源、燃气机组相继脱网后,系统频率出现大幅跌落,诱发低频减载动作,最终整个英国损失约5%负荷。事故发生前风电出力为30%、直流馈入功率逾9%,低惯量特征明显。经事后分析,系统惯量水平低是该事故的主要诱因之一,扰动发生后 RoCoF 值过大引起分布式电源跳闸,进而导致后续火电意外脱网,低频减载动作^[13]。

2.2 南澳“9·28”大停电事故

2016年9月28日,风、光伏发电占比超48%的南澳电网受台风极端天气影响,风电并网点2min内发生6次电压跌落,诱发风电场集群脱网事故。接着,继保装置动作切除过载的联络线,该电网转变为孤岛运行状态,有功缺额进一步增加,最终导致大面积停电事故(损失1.83GW负荷)。该事故的诱因也是惯量短缺导致新能源集群脱网后火电缺少足够调频时间,进而引起联络线潮流越限等故障^[14]。

2.3 华东电网“9·19”频率跌落事件

2015年9月19日,锦苏特高压直流双极闭锁导致华东电网功率缺额4.9GW。在事故发生12s后,

系统频率跌落至最低点 49.56 Hz, 为近十年内频率首次跌破 49.8 Hz。本次事故与多直流馈入电网在小负荷运行方式下开机规模小、转动惯量较低且一次调频能力未达预期有关^[26]。

综上可知, 引起低惯量电力系统频率稳定问题的主要原因是大量电力电子接口设备并网致使系统同步规模减小, 运行不确定性增强, 且大容量有功冲击下缺少足够的惯量支撑和频率调节能力。

3 低惯量电力系统频率稳定分析方法

频率稳定分析的目的是: 对系统遭受较大有功扰动下频率大范围波动或系统局部(或解列后的局部)频率振荡现象, 进行系统频率稳定性分析计算, 以辅助对各种频率稳定控制措施提出相应的要求^[21]。目前, 频率稳定分析方法主要有 3 种: ①以数值分析为基础的时域仿真方法; ②将电网中部分频率弱相关量进行忽略处理的数学解析方法; ③基于数据驱动技术对频率数据样本进行学习的“无模型

(model-free)”智能化评估方法。这 3 种频率稳定分析方法的主要框架如图 2 所示。其中, 时域仿真方法对小扰动和大扰动下的频率稳定分析均可适用; 数学解析方法则主要用于小扰动频率稳定问题分析, 对实际大规模电力系统遭受大扰动下的频率指标计算精度可能不足; 而数据驱动的智能化评估方法, 由于需要提取明显的的数据样本特征, 一般也多用于大扰动频率稳定分析。本节将分别从 3 种方法的理论、利弊、适用性出发, 对其进行逐一说明。

3.1 时域仿真方法

目前, 实际电力系统中尚无实用化的在线频率稳定分析工具, 主要依赖基于全模型时域仿真的离线分析方式。时域仿真方法将系统中各元件及其拓扑关系进行数学描述后, 形成一组联立的微分和代数方程组; 然后, 以稳态工况或潮流解为初值, 对预想扰动后的系统状态进行逐步求解, 得到频率的时域变化结果。该方法的优点是可计及各类型机组的复杂控制特性和负荷详细模型, 能够反映由于网络

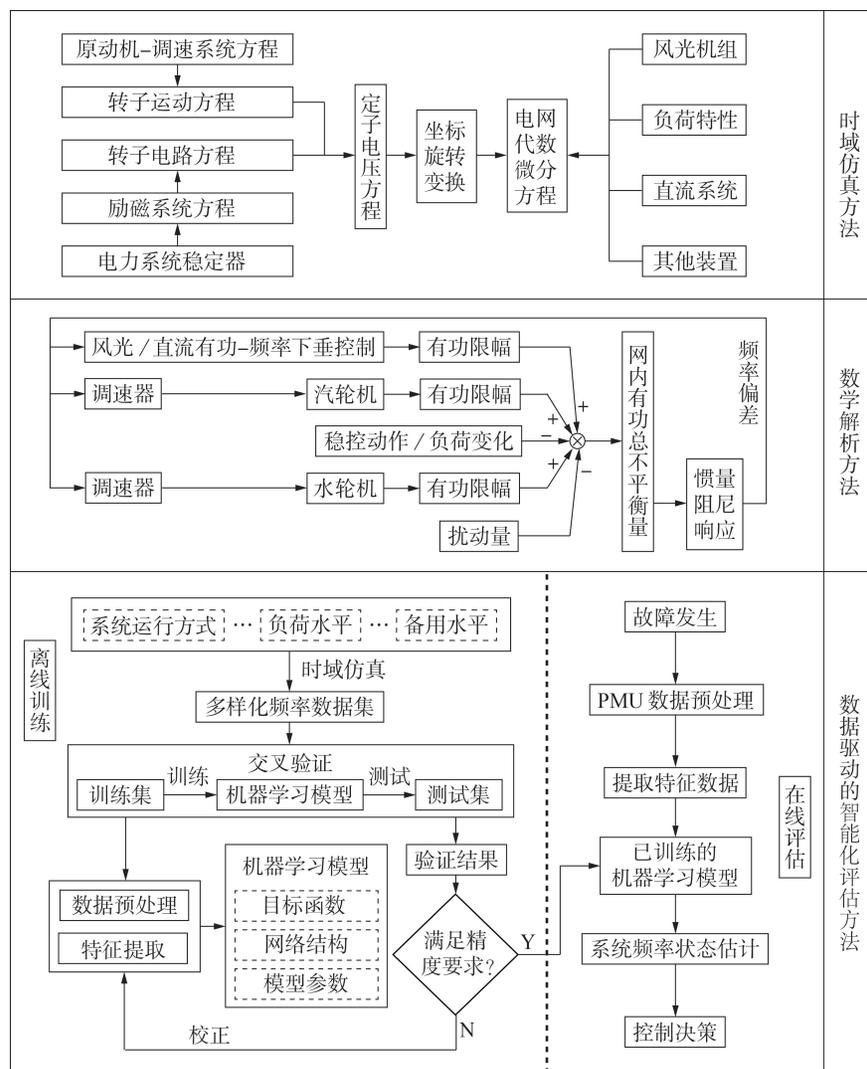


图2 频率稳定分析方法的研究框架

Fig.2 Framework of frequency stability analysis methods

结构和参数不均衡导致的频率时空分布特性。同时,由于方程中除频率特征外,还包括功角、电压等状态量,故频率与功角、电压之间的耦合关系也可被反映出来,计算结果精度相对较高。目前用于时域仿真分析的软件很多,主要包括 PSD-BPA、PSASP、DIgSILENT、PSS/E 等。针对实际系统频率动态仿真结果可能与实测轨迹之间存在一定偏差的问题,文献[27-28]考虑实际系统中相量测量单元(PMU)装置获取频率轨迹的能力,基于实测轨迹研究不同观测点频率轨迹的动态变化,揭示系统频率动态时空分布特性,进而校验时域仿真模型和参数,为设置低频减载方案提供参考。

由于时域仿真方法通常采用机电暂态模型对频率动态特性进行分析,且仿真步长较小,故应用于实际电网时存在计算量大、运算耗时长、建模困难等固有缺陷,无法满足低惯量电力系统多场景运行方式和海量预想扰动故障“组合数爆炸”下的在线分析需求^[29]。

3.2 数学解析方法

为提升频率稳定分析的效率,平均系统频率 ASF (Average System Frequency) 模型被提出^[30]。ASF 模型在忽略系统电压动态变化、元件拓扑、汽轮机调速系统时间常数及限幅环节后,将所有机组的机械功率和转子运动方程等值聚合,解析表达电网遭受有功扰动后的系统频率平均响应。IEEE 会士 Anderson 教授在 ASF 模型的基础上,提出 SFR 模型。SFR 模型将系统等值为单机(仅保留原动机和调速器)带集中负荷的低阶模型,进而建立有功扰动与系统频率的数学解析式,可更直观和快速地求解频率特征^[24]。文献[23]给出了将电网中多台机组参数聚合为仅含单台等值机组 SFR 模型的解析方法和计算流程。文献[31]提出了一种考虑累积效应的频率偏移安全量化评估方法,通过频率偏移量和偏移时间的积分评估频率安全性。文献[32]构建了一种预测系统受扰后频率极值的解析模型,通过解开闭环结构、输入抛物线频率偏差、多项式拟合等策略,提高了频率偏差计算的便捷性,降低了计算量。针对小电网,文献[33]构建了频率稳定评估指标,分析了主导发电机调速系统参数对小电网暂态频率特性的影响。

为定量刻画逆变器虚拟惯量引入对系统频率扰动抑制能力的影响,文献[34]提出以 H_2 与 H_∞ 范数为指标分析同步发电机与虚拟同步机的频率响应特性。提前获取准确的惯量参数是建立频率分析数学解析模型的基础,目前已有多种方法被用于评估规模化电力电子变流器接入后的系统惯量水平,主要包括基于频率量测数据和系统辨识的惯量估计方法^[35-36]、基于机电扰动传播信息的惯量估计方法^[37]

和基于开停机状态监测的惯量估计方法^[38]等。

由于频率响应解析模型对机组进行了聚合及简化,与实际模型存在较大差别,故也存在机组间频率振荡难以呈现、等值参数获取困难、求解精度低等问题^[39]。特别是当系统电压发生较大偏移时,由于该方法没有考虑电压因素,故频率计算结果与真实值往往偏差较大,难以推广应用于实际大规模电力系统。

3.3 数据驱动的智能化评估方法

为同时满足实际系统频率稳定分析的精度和速度要求,近年来数据驱动的智能化评估方法受到国内外学者和研究机构的高度关注,并已有大量研究成果报道。由图2可知,频率稳定智能化评估方法的核心思想是:先通过数据驱动方式对仿真数据或历史频率量测数据进行特征提取和离线学习,然后将运行数据和预想故障输入已训练好的机器学习模型,以实现海量运行方式和批量预想故障频率响应性能指标的在线快速计算。

文献[40]构建了一种基于多层极限学习机的频率指标在线评估方法,在自下而上的逐层无监督训练过程中,引入自动编码器算法和正则化系数表征复杂频率响应模型。为实现海量预想有功扰动下系统惯性中心多维频率指标(极值频率、最大 RoCoF、准稳态频率)的快速估计,文献[41]构建了基于堆栈降噪自动编码器(SDAE)的频率评估深度学习网络,基于数据腐蚀和 RMSProp 优化提升网络的鲁棒性。文献[42]利用深度置信网络(DBN)将发电机电磁功率、机械功率、最大有功出力限制等作为模型输入,建立故障与频率的映射关系,用于实现扰动后频率曲线的预测。文献[43]提出一种物理-数据融合的电网暂态频率特征在线预测方法,有助于降低样本依赖性。文献[44]计及严重扰动事件下低频减载动作策略,基于支持向量回归方法构建了最大暂态频率偏移估计模型。

虽然数据驱动的频率稳定智能化评估方法具有在实际电力系统在线应用的潜力,但该方法可解释性差,且输出结果精度严重依赖于机器学习模型离线训练过程中的数据样本量。如何实现少量稀疏样本下的准确计算和泛化能力提升,仍是当前需要攻克的难点问题。现有方法主要应用于仅考虑同步机组一次调频的大扰动故障场景,对于直流调制、虚拟惯量、稳控策略、需求响应等潜在控制措施的考虑非常欠缺,求解结果过于保守。此外,如何将智能化评估方法拓展应用于小扰动场景,也值得进一步探索。

4 低惯量电力系统频率稳定控制策略

频率控制策略的有效设计和配置是保障低惯量电力系统安全稳定运行的关键之一,对于避免频率

失稳/崩溃,防止大面积切机、切负荷和系统解列,具有重要意义。本节首先分析小/大扰动频率稳定的应对策略和存在的不足。进而,从“源、网、荷、储”多角度探讨潜在可供挖掘的有功调频资源,协同提升低惯量电力系统调频能力。最后,针对当前“三道防线”在低惯量运行场景下可能存在的缺陷和不足,提出加强和协调配合思路。图3概括了本文描述的适应低惯量电力系统的频率稳定控制策略研究框架。

4.1 低惯量电力系统小/大扰动频率稳定应对策略

发生小扰动时,系统调频机制主要依赖于同步机组的惯量响应和调频能力。当系统运行于小负荷运行方式时,高占比新能源出力的强波动性将导致已开机同步电源频繁往复参与一次调频,对机组一次调频能力提出严峻考验。同时,正常运行方式下频率变化更为频繁,频率异常波动会带来电能质量相关问题。由于电力电子设备的复杂控制策略和快速响应特性,在小扰动场景下变流器可能对频率呈现负阻尼效应,更易导致频率发生振荡^[25,45-46]。为解决风机调频存在的负面影响,文献[47-48]分别针对其调频控制和虚拟阻尼结构进行了优化,实现对风电调频阻尼特性的增强。

对于大扰动故障,一般按扰动严重程度设置三道防线,分别采取相应的频率控制措施:① $N-1$ 扰动故障下,不采取稳定控制措施(一次调频除外),应能保持频率稳定运行,此为第一道防线;②遭受 $N-2$ 、直流双极闭锁等严重故障后,可以允许采取稳控切机、稳控切负荷、直流调制、抽水蓄能切泵等措施保持频率稳定,此为第二道防线;③ $N-k$ 、新能源集群脱网、大容量电厂跳闸、开关拒动、保护和自动装置拒动/误动等极端故障下,必须采取低频减载、高频切机、解列等最后一道防线(第三道防线)措施,以避免造成长时间大面积停电,尽可能地降低事故影响

和尽快恢复正常运行^[21]。由于低惯量电力系统存在较高的惯量缺额和调频备用不足风险,其在遭受大容量有功冲击时会出现快速的频率变化和更大的频率偏差,第一、二道防线易被突破,危及系统本质安全稳定。因此,原有三道防线的某些环节可能需要重新优化、设计和加强。特别是需深入探索挖掘多类型有功资源的调频能力,通过多类型有功资源协同控制和多道防线协调配合,更好地应对电力电子化趋势下的低惯量甚至超低惯量高风险运行场景。

4.2 多类型有功资源参与的频率稳定控制策略

随着火电机组阶段性退出和新能源持续并网,为应对源荷双侧不确定性和大容量有功冲击事件,电力系统对旋转备用的需求越来越大,单纯依赖同步电源参与的传统调频机制已难以满足频率稳定需求。为此,下面从“源、网、荷、储”多环节出发,阐述其潜在的有功响应资源及频率控制策略。

(1) 低惯量电力系统电源侧调频能力挖掘。

a. 加强传统同步电源的调频能力。

加强对传统同步发电机组调频能力的监测、优化设计控制参数及策略,是一种最为直接和经济的提升系统频率性能的方式。文献[49]针对火电机组一次调频,提出一种控制参数动态优化方法,通过考虑各场景下调差系数变化对机组调频能力的影响,动态调节调频控制参数实现最佳调频效果。另外在二次调频方面,文献[50]提出高比例水电多直流弱送端电网自动发电控制(AGC)的优化方法,在减少日常频繁调整的同时提升故障下的动态响应性能。针对我国电网在频率控制性能评价方面实施的“时段控制性能标准(CPS)”存在的不足,文献[51]研究了基于运行安全要求的频率控制性能评价方法,设计了评价指标和评价方式,以规范控制区域的有功平衡调节行为。

b. 新能源发电提供虚拟惯量和辅助调频。

众多电网运营商已发布相关导则和规定,要求并网新能源电站能够为系统提供必要的惯量支撑,

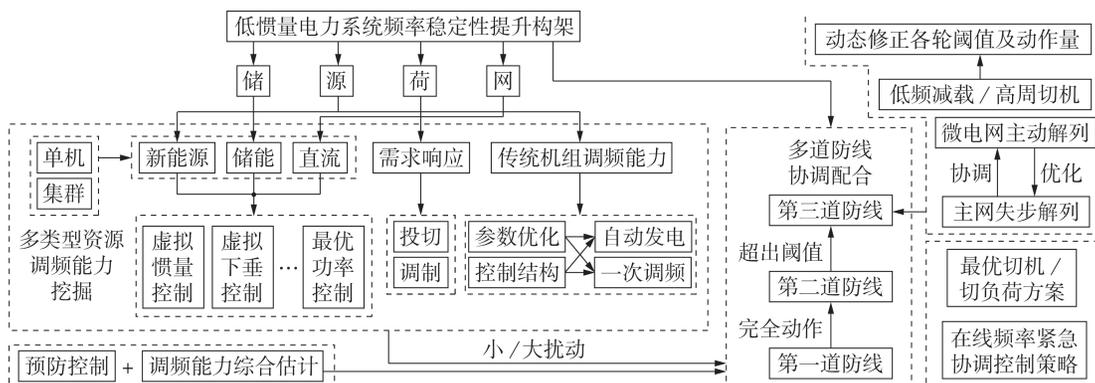


图3 低惯量电力系统调频能力挖掘及安全防线加强的研究框架

Fig.3 Framework of frequency modulation capability mining and security defense enhancement for low-inertia power systems

并参与辅助调频。围绕单机和场站层面,国内外学者已提出了丰富的虚拟惯量和辅助调频控制策略。

在单机控制层面,IEEE会士钟庆昌教授提出在系统对全部变流器加入鲁棒下垂、自同步下垂等控制策略,将变流器设备改造为虚拟同步机,用于模拟同步发电机的惯量和频率响应^[52]。文献[53]提出在微电网中采用虚拟同步机策略,在改善频率稳定性的同时提升了电网整体同步稳定性。文献[54]提出一种定参数虚拟惯量模拟策略,当系统频率发生跌落时,可通过变流器控制风轮转速快速下调,释放部分转子动能增加机组出力,以提供惯量支撑。另外,也有学者发现,如果一味挖掘新能源调频性能,受风机转子动能限制,容易引发系统频率二次跌落。为解决该问题,文献[55]提出一种计及设备能量约束的最优功率支撑轨迹控制策略,通过惯量模拟和下垂控制策略的相互协调,实现机组在频率跌落期间有功输出最佳,避免频率二次跌落问题。

在场站控制层面,文献[56]基于模型预测控制(MPC)算法提出一种分层最优功率控制策略,在风电场调频过程中对场内各机组和储能的有功输出需求进行优化分配,使风电场在参与系统调频的同时尽可能地减少自身动能损失。文献[57]针对经柔直并网的风电场,在逆变侧换流器、整流侧换流器和风电机组上设计响应频率变化的控制环节,使风电场参与交流系统调频。文献[58]提出考虑光伏、风电等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。

(2)低惯量电力系统网络侧调频能力挖掘。

传统直流(LCC-HVDC)和基于电压源换流器的柔性直流(VSC-HVDC)均具有快速控制特性和一定的过载能力,改变其传输功率可对系统频率变化起到抑制作用^[59-60]。文献[61]针对多直流异步电网,分析了直流频率调制(FLC)与一次调频的协调配合关系,提出了直流FLC调频策略的优化设计方案。文献[62]基于VSC-HVDC技术,提出一种 d 轴调频、 q 轴辅助调频的解耦控制策略(通过 d 轴调节线路输送有功直接参与调频的同时,利用 q 轴支撑直流母线电压),改善异步分区电网频率稳定性。文献[63]在定参数调频方法的基础上,提出一种自适应下垂控制策略,在抑制系统频率和电压波动的同时,提升变流器的容量利用率。文献[64]针对耦合多端直流电网的交直流混联电力系统,提出一种协调自适应下垂控制策略,对各直流换流器的下垂控制参数进行动态调整,在确保交直流潮流安全的前提下,实现运行成本和频率性能的最优。

(3)低惯量电力系统负荷侧调频能力挖掘。

除上述源侧、网侧环节中提到的频率控制策略外,近年来也有不少学者从负荷侧出发,提出利用需

求响应增强系统调频能力的具体策略。其主要机制是:当系统内出现有功不平衡问题时,改变可中断负荷的开关状态/用电量,或通过柔性负荷主动响应频率变化^[65]。文献[66]提出一种无需通信的分布式需求响应控制策略,通过响应系统各区域频率偏差及持续时间,利用简单控制装置调节该地区部分负载辅助系统而进行调频。文献[67]提出一种分布式最优负荷控制方法,利用最小方差理论对各区域存在的有功扰动进行评估,从而精确调控负荷动作需求,避免响应过调/欠调。文献[68]考虑电动汽车充电需求,提出一种分散式车联网(V2G)控制技术,使电动汽车电池并网时可参与电网一次调频。

(4)基于储能技术提升低惯量电力系统频率稳定性。

超级电容、电池等储能装置具有快速响应和灵活爬坡能力,在几秒内便能完全动作达到目标出力。因此,通过在低惯量电力系统中分散式地接入规模化储能设备,提供快速、可靠的频率响应能力,是减缓系统调频及惯量支撑不足问题的一种有效手段。

文献[69]研究了一种虚拟惯量和虚拟下垂动态结合的电池储能参与电网一次调频的自适应控制策略。文献[70]在考虑储能经济性和调频性能的基础上,提出一种分布式储能协同调频策略,以储能初始投入成本和电网调频性能标准为参考,量化不同储能规模和扰动下调频策略的性能及经济性。为提供快速调频支持并降低储能容量需求,文献[71]通过在线辨识系统频率特性,基于MPC动态优化设定储能装置的功率设定值。

4.3 多道防线加强与协调配合的频率稳定控制策略

安全稳定三道防线相关标准对于维持我国电力系统安全稳定运行扮演了重要角色。为应对新能源大规模持续并网、特高压交直流电网格局逐步形成的安全稳定新挑战与潜在风险,国家能源局在2020年发布的新版《电力系统安全稳定导则》中对三道防线部分描述进行了更新和完善,明确了直流闭锁/换相失败以及新能源集群脱网分别对应的安稳等级和稳控措施,增加了频率稳定计算相关要求,对频率稳定计算的内容、判据和仿真工具等做出了规定^[21]。

针对低惯量电力系统,多道防线的加强与协调配合至关重要,对于应对低惯量、超低惯量运行场景下的大容量有功冲击具有关键意义。例如,在外送直流满载场景下,直流上调能力有限,一般需采取稳控切机措施减少送端电网有功盈余。但现有稳控切机方案采用离线配置方式,对全网多类型机组调节能力的考虑不充分,存在过切或欠切问题,也可能导致系统在切机后陷入超低惯量状态。当前,对于直流双极闭锁、新能源集群脱网等大容量有功冲击故

障,电网第一、第二道防线控制手段和资源严重不足,触发第三道防线装置动作的风险大为增加。

为此,许多学者提出了加强方法和协调思路。文献[72]针对异步运行后的云南电网,提出预防频率失稳的三道技术防线,即直流FLC与机组调速器、集中式切机、分布式多轮次切机相互配合,保障云南电网的频率稳定性。在第一道防线基础上,文献[73-75]提出一种频率稳定约束预防调度模型,在惯量水平和频率指标的约束下,优化确定各调度时段的机组备用容量和直流传输功率,进而提升系统在预想故障下的频率调节能力。为解决第二道防线中稳控量不精确和不经济的问题,文献[10]提出一种在线紧急协调控制策略,通过在线更新SFR模型,将系统受扰后的紧急功率支援、直流调制、储能等调频手段与频率变化量构建为一个最优化问题,实时求解得到各时刻频率最优控制方案。另外,也有学者提出可采用电气特征结合故障事件的调切一体动作策略代替原有开关动作,提升稳控装置的可调性及其灵活性^[76]。对于第三道防线的低频减载策略,有学者提出基于广域量测信息,建立功率缺额评估模型对低频减载量进行动态调优,以最小切负荷代价维持系统受扰后频率稳定^[77]。文献[78-79]则分别提出分布式和连续化低频减载模型,根据电网实际场景及扰动大小优化制定切负荷策略,避免负荷过切问题。在失步解列方面,将主网解列为微电网孤岛运行时考虑频率稳定的策略研究也已开展^[80]。

5 研究展望

5.1 基于分频器理论的频率稳定分析应用

基于机电暂态的时域仿真分析模型在定义输电线路串联电抗和并联电纳等频率相关参数时,都将频率固定为额定值。当系统在大扰动下各节点频率发生明显偏移时,通过数值积分得到的频率结果可能精度不足,难以复现实际电网真实故障发生后的频率变化轨迹。基于分频器(frequency divider)理论^[81]的暂态频率分析方法具有解决该问题的潜力。该方法以节点导纳矩阵为基础,考虑机电暂态在时间尺度上与系统动态变化的相关性,以系统中各台同步机组实际转速为边界条件,得到各时刻母线节点的频率解析式。依据各节点频率解析式,可精确表征系统受扰后的频率时空分布特性,从而对机电暂态模型中元件的频率参数进行动态修正,提升时域仿真精度。

5.2 低惯量电力系统调频能力在线综合评估

低惯量电力系统的调频能力受制于系统中各类型有功资源在当前运行工况下的综合特性。为确保系统具备充裕的惯量/备用水平和可接受的调频性能,有必要深入研究低惯量电力系统调频能力在线

综合评估指标体系与计算方法。对潜在极限扰动、新能源并网容量及可调用的虚拟惯量和调频能力、直流FLC调节容量、同步机组备用容量和调速器性能、AGC动态响应性能、系统等效惯量水平、负荷频率特性、可供调度的储能/需求响应容量和性能、可利用的安稳措施等进行在线综合评价,用于准确分析系统在遭受预想扰动后的频率响应性能,并及时提醒电网调度人员对运行方式或控制策略进行动态优化和调整。

5.3 基于人工智能的频率稳定提升策略

传统频率稳定控制策略采用离线预想形式,在时域仿真分析结果的基础上,设置具体应对措施。随着系统规模的扩大及运行方式不确定性的增强,所需稳控策略的数量显著增加,基于查表匹配的简单模式已难以满足复杂大容量有功冲击下的稳控需求。基于人工智能的稳控策略可有效利用PMU和广域测量系统的海量数据,对系统运行方式及复杂故障场景进行自适应分析,拟合稳控策略与频率稳定约束间的数据驱动映射关系,实现控制策略的在线计算和快速调整。但人工智能方法在电力系统中的有效实施绕不开输出结果的可信性、适应性和可解释性等重要问题,如何寻求突破仍是未来需要解决的关键。

6 结论

大规模集中式新能源、大容量密集型直流、分布式发电/微电网/直流配电网、负荷侧电力电子设备等“发电-输电-配电-用电”各环节发生新变化,给电力系统引入多种低惯量运行场景。低惯量电力系统在遭受直流闭锁/连续换相失败、换流器故障、新能源集群脱网等多种故障后均可能带来巨量的有功冲击,频率稳定面临严峻挑战。本文对低惯量电力系统频率稳定分析与控制领域的国内外研究现状进行了全面的综述。从机理、优缺点和适用性方面出发,介绍了当前几种常用的频率稳定分析方法,提出挖掘多类型有功资源的调频能力,并对多道防线进行加强和协调配合优化设计。最后,对未来需探索的关键理论和技术进行了展望,以期对相关研究者进一步开展相关工作提供参考。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 全球能源互联网跨国跨洲互联研究及展望[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5103-5110, 5391.
LIU Zhenya. Research of global clean energy resource and power grid interconnection[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5103-5110, 5391.
- [2] 文云峰, 杨伟峰, 汪荣华, 等. 构建100%可再生能源电力系统述评与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1843-1856.
WEN Yunfeng, YANG Weifeng, WANG Ronghua, et al. Toward 100% renewable energy power systems: review and prospect

- [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1843-1856.
- [3] 国家能源局. 国家能源局关于2019年度全国可再生能源电力发展监测评价的通报[EB/OL]. (2020-05-06)[2020-08-14]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-05/16/content_5512148.htm.
- [4] 刘泽洪. 中国特高压直流输电技术现状和发展方向[R]. 北京:中国电机工程学会年会, 2019.
- [5] 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.
- [6] 饶宏, 吴为, 周保荣, 等. 云南电网与南网主网交直流系统相互影响及异步联网方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 3470-3477.
RAO Hong, WU Wei, ZHOU Baorong, et al. Study of AC/DC power system interaction and asynchronous connection between Yunnan Power Grid and the rest of CSG[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3470-3477.
- [7] 鲁宗相, 汤海雁, 乔颖, 等. 电力电子接口对电力系统频率控制的影响综述[J]. 中国电力, 2018, 51(1): 51-58.
LU Zongxiang, TANG Haiyan, QIAO Ying, et al. The impact of power electronics interfaces on power system frequency control: a review[J]. Electric Power, 2018, 51(1): 51-58.
- [8] DU Pengwei, LI Weifeng. Frequency response impact of integration of HVDC into a low inertia AC power grid[J/OL]. IEEE Transactions on Power Systems. (2020-04-27)[2020-08-14]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9079170/>. DOI: 10.1109/TPWRS.2020.2990304.
- [9] 李卫东, 晋萃萃, 温可瑞, 等. 大功率缺失下主动频率响应控制初探[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(8): 22-30.
LI Weidong, JIN Cuicui, WEN Kerui, et al. Active frequency response control under high-power loss[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(8): 22-30.
- [10] 王路平, 谢小荣, 刘颖, 等. 多直流馈入受端电网短期频率稳定性的实时协调控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(8): 2205-2212.
WANG Luping, XIE Xiaorong, LIU Ying, et al. Real-time coordinated control of short-term frequency stability for the receiving-end systems with multi-infeed HVDC transmissions[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(8): 2205-2212.
- [11] 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.
- [12] 李卫东. 关于频率响应控制未来发展的思考[J]. 发电技术, 2018, 39(1): 84-89.
LI Weidong. On frequency response control of future grid[J]. Power Generation Technology, 2018, 39(1): 84-89.
- [13] 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.
- [14] Australian Energy Market Operator. Preliminary report—black system event in South Australia on 28 September 2016[R]. Melbourne, Australia: Australian Energy Market Operation Limited, 2016.
- [15] 王世佳, 徐政, 邢法财, 等. 利用旁路阻尼滤波器抑制次同步谐振: 原理与应用[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 1006-1015.
WANG Shijia, XU Zheng, XING Facai, et al. Mechanism and application of bypass damping filter in suppressing SSR[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 1006-1015.
- [16] 赵腾, 张焰, 叶冠豪, 等. 多回特高压直流分层馈入模式下交直流混联系统的稳态特性分析[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(8): 157-164.
ZHAO Teng, ZHANG Yan, YE Guanhao, et al. Steady-state characteristics analysis for AC-DC hybrid system in hierarchical-infeed mode of multi-loop UHVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(8): 157-164.
- [17] WEN Yunfeng, CHUNG C Y, SHUAI Zhikang, et al. Towards flexible risk-limiting operation of multi-terminal HVDC grids with vast wind generation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 1750-1760.
- [18] 李鹏, 窦鹏冲, 李雨薇, 等. 微电网技术在主动配电网中的应用[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 8-16.
LI Peng, DOU Pengchong, LI Yuwei, et al. Application of microgrid technology in towards flexible risk-limiting operation of multi-terminal HVDC grids with vast wind generation active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 8-16.
- [19] WEN Yunfeng, CHUNG C Y, LIU Xuan, et al. Microgrid dispatch with frequency-aware islanding constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(3): 2465-2468.
- [20] NEDD M, BROWELL J, BELL K, et al. Containing a credible loss to within frequency stability limits in a low-inertia GB power system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(2): 1031-1039.
- [21] 国家能源局. 电力系统安全稳定导则: GB/T 38755—2019[S]. 北京, 中国标准出版社, 2020.
- [22] CHU Zhongda, MARKOVIC U, HUG G, et al. Towards optimal system scheduling with synthetic inertia provision from wind turbines[J/OL]. IEEE Transactions on Power Systems. (2020-04-14)[2020-08-14]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9066910>. DOI: 10.1109/TPWRS.2020.2985843.
- [23] 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.
- [24] ANDERSON P M, MIRHEYDAR M. A low-order system frequency response model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(3): 720-729.
- [25] 邢法财, 徐政, 王世佳. 非同步机电源接入电网后的谐振问题分析及抑制[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 76-82.
XING Facai, XU Zheng, WANG Shijia. Analysis and suppression of resonance problem in power system with unconventional generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 76-82.
- [26] 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, ZHUNAG 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.
- [27] 邵帅, 李铭, 蔡宏飞, 等. 基于实测轨迹校正模型参数对电力系统频率动态过程仿真精度的影响[J]. 电测与仪表, 2014, 51(19): 46-52.
SHAO Shuai, LI Ming, CAI Hongfei, et al. The influence of mea-

- sured trajectory based model parameters correcting on simulation precision of power system dynamic frequency[J]. *Electrical Measurement and Instrumentation*, 2014, 51(19):46-52.
- [28] 李铭, 安军, 穆钢, 等. 基于实测轨迹的频率动态时空分布特性研究[J]. *电网技术*, 2014, 38(10):2747-2751.
LI Ming, AN Jun, MU Gang, et al. Measured trajectory based space-time distribution characteristics of frequency dynamics [J]. *Power System Technology*, 2014, 38(10):2747-2751.
- [29] 宋新立, 汤涌, 刘文焯, 等. 电力系统全过程动态仿真的组合数值积分算法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(28):23-29.
SONG Xinli, TANG Yong, LIU Wenzhuo, et al. Mixed numerical integral algorithm for full dynamic simulation of the power system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(28):23-29.
- [30] CHAN M L, DUNLOP D R, SCHWEPPE F. Dynamic equivalents for average system frequency behavior following major disturbances[J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1972, 100(5):2635-2642.
- [31] 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.
- [32] LIU Liu, LI Weidong, BA Yu, et al. An analytical model for frequency nadir prediction following a major disturbance [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(4):2527-2536.
- [33] 岳雷, 薛安成, 崔洁豪, 等. 小电网暂态频率评估指标及调速器参数影响研究[J]. *电网技术*, 2018, 42(12):4031-4036.
YUE Lei, XUE Ancheng, CUI Jiehao, et al. Study on influence of transient frequency evaluation index and governor parameter of small power grid[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(12):4031-4036.
- [34] 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(80):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.
- [35] SUN M, FENG Y, WALL P, et al. Online power system inertia calculation using wide area measurements [J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2019, 109:325-331.
- [36] ZHANG J, XU H. Online identification of power system equivalent inertia constant[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(10):8098-8107.
- [37] CAI Guowei, WANG Bo, YANG Deyou, et al. Inertia estimation based on observed electromechanical oscillation response for power systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(6):4291-4299.
- [38] European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSOE). Future system inertia[R]. Brussels, Belgium: ENTSOE, 2015.
- [39] 张恒旭, 李常刚, 刘玉田, 等. 电力系统动态频率分析与应用研究综述[J]. *电工技术学报*, 2010, 25(11):169-176.
ZHANG Hengxu, LI Changgang, LIU Yutian, et al. Reviews on power system dynamic frequency analysis and its application [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2010, 25(11):169-176.
- [40] 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):133-143.
WEN Yunfeng, ZHAO Rongzhen, XIAO Youqiang, et al. Power system frequency stability assessment based on multi-layer extreme learning machine[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(1):133-143.
- [41] 赵荣臻, 文云峰, 叶希, 等. 基于改进堆栈降噪自动编码器的理想事故频率指标评估方法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(14):4081-4093.
ZHAO Rongzhen, WEN Yunfeng, YE Xi, et al. Research on frequency indicators evaluation of disturbance events based on improved stacked denoising autoencoders[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(14):4081-4093.
- [42] 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, 5290.
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, 5290.
- [43] 王琦, 李峰, 汤奕, 等. 基于物理-数据融合模型的电网暂态频率特征在线预测方法[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(19):1-11.
WANG Qi, LI Feng, TANG Yi, et al. On-line prediction method of transient frequency characteristic for power grid based on physical statistical model[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(19):1-11.
- [44] 李常刚, 李华瑞, 刘玉田, 等. 计及低频减载动作的最大暂态频率偏移快速估计[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(12):27-35.
LI Changgang, LI Huarui, LIU Yutian, et al. Fast estimation of maximum transient frequency deviation considering under-frequency load shedding[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(12):27-35.
- [45] Power System Dynamic Performance Committee. Stability definitions and characterization of dynamic behavior in systems with high penetration of power electronic interfaced technologies[R]. New York, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2020.
- [46] ADREES A, MILANOVIĆ J. Impact of energy storage systems on the stability of low inertia power systems[C]//2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe). Torino, Italy: IEEE, 2017:1-6.
- [47] XIE RUICHAO, KAMWA I, CHUNG C Y. A novel wide-area control strategy for damping of critical frequency oscillations via modulation of active power injections[J/OL]. *IEEE Transactions on Power Systems*. (2020-07-01)[2020-08-14]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9130884>. DOI:10.1109/TPWRS.2020.3006438.
- [48] 马钦林, 杨欢, 屈子森, 等. 改善虚拟同步发电机电阻特性的设计方法[J/OL]. *电网技术*. (2019-11-15)[2020-08-14]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1857>.
- [49] 王琦, 郭钰锋, 万杰, 等. 适用于高风电渗透率电力系统的火电机组一次调频策略[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(4):974-984.
WANG Qi, GUO Yufeng, WAN Jie, et al. Primary frequency regulation strategy of thermal units for a power system with high penetration wind power[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(4):974-984.
- [50] 杨可, 谈超, 王民昆, 等. 高比例水电多直流弱送端电网自动发电控制的优化方法[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(11):166-175.
YANG Ke, TANG Chao, WANG Minkun, et al. A novel wide-area control strategy for damping of critical frequency oscillation via modulation of active power injections[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(11):166-175.

- [51] 常烨璇,李卫东,巴宇,等. 基于运行安全的频率控制性能评价新方法[J]. 电工技术学报,2019,34(6):1218-1229.
CHANG Yekui, LI Weidong, BA Yu, et al. A new method for frequency control performance assessment on operation security [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6):1218-1229.
- [52] ZHONG Qingchang. Power-electronics-enabled autonomous power systems: architecture and technical routes [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(7):5907-5918.
- [53] CHENG Huijie, SHUAI Zhikang, SHEN Chao, et al. Transient angle stability of paralleled synchronous and virtual synchronous generators in islanded microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(8):8751-8765.
- [54] 李少林,秦世耀,王瑞明,等. 大容量双馈风电机组虚拟惯量调频技术[J]. 电力自动化设备,2018,38(4):145-150,156.
LI Shaolin, QIN Shiyao, WANG Ruiming, et al. Control strategy of virtual inertia frequency regulation for large capacity DFIG-based wind turbine [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4):145-150, 156.
- [55] 高晖胜,菅鹏,黄林彬,等. 能量约束下电力电子并网装备的最优频率控制[J/OL]. 电力系统自动化. (2020-06-11)[2020-08-14]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/32.1180.TP.20200610.1818.004.html>. DOI:10.7500/AEPS20191022007.
- [56] BAO Weiyu, WU Qiuwei, DING Lei, et al. A hierarchical inertial control scheme for multiple wind farms with BESSs based on ADMM [J/OL]. IEEE Transactions on Sustainable Energy. (2020-03-15)[2020-08-14]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9094358>. DOI:10.1109/TSTE.2020.2995101.
- [57] 杨金刚,袁志昌,李顺昕,等. 经柔性直流输电并网的大型风电场频率控制策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(6):109-114.
YANG Jingang, YUAN Zhichang, LI Shunxin, et al. Frequency control strategy for large-scale wind farm grid-connection through VSC-HVDC [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(6):109-114.
- [58] 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 Xiaoliang, 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.
- [59] 高原,马宁宁,王德林,等. 异步联网下直流频率调制及其参数对送端系统频率的影响[J]. 电力自动化设备,2019,39(9):173-179.
GAO Yuan, MA Ningning, WANG Delin, et al. Impact of DC frequency modulation and modulation parameters on frequency characteristics of sending end in asynchronous interconnected power grid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9):173-179.
- [60] 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.
- [61] 高琴,陈亦平,朱林,等. 多直流异步互联系统中频率限制器的控制策略优化设计[J]. 电力系统自动化,2018,42(12):167-172.
GAO Qin, CHEN Yiping, ZHU Lin, et al. Strategy design of frequency limit controller on multi-HVDC asynchronous inter-connected power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(12):167-172.
- [62] 付聪,卞志鹏,王铃,等. 改善异步分区电网频率稳定性的VSC-HVDC控制策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(11):139-144.
FU Cong, BIAN Zhipeng, WANG Qian, et al. VSC-HVDC control strategy for enhancing frequency stability of segmented power grid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11):139-144.
- [63] 翟冬玲,韩民晓,马骏鹏,等. 连接低惯量系统的VSC-MTDC的自适应下垂控制[J]. 电力自动化设备,2019,39(2):128-134.
ZHAI Dongling, HAN Minxiao, MA Junpeng, et al. Adaptive droop control of VSC-MTDC connected to low inertia system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2):128-134.
- [64] AMBIA M N, MENG Ke, XIAO Weidong. Adaptive droop control of multi-terminal HVDC network for frequency regulation and power sharing [J/OL]. IEEE Transactions on Power Systems. (2020-06-02)[2020-08-14]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9106838/>. DOI:10.1109/TPWRS.2020.2999443.
- [65] SCHWEPPE F C, TABORS R D, KIRTLEY J L, et al. Homeostatic utility control [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1980, 99(3):1151-1163.
- [66] MOLINA-GARCÍA A, BOUFFARD F, KIRSCHEN D S. Decentralized demand-side contribution to primary frequency control [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1):411-419.
- [67] ZHAO C, TOPCU U, LOW S H. Optimal load control via frequency measurement and neighborhood area communication [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4):3576-3587.
- [68] LIU Hui, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Decentralized vehicle-to-grid control for primary frequency regulation considering charging demand [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3):3480-3489.
- [69] 李欣然,崔曦文,黄际元,等. 电池储能电源参与电网一次调频的自适应控制策略[J]. 电工技术学报,2019,34(18):3897-3908.
LI Xinran, CUI Xiwen, HUANG Jiyuan, et al. The self-adaptation control strategy of energy storage batteries participating in the primary frequency regulation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(18):3897-3908.
- [70] CHEN Shuaixun, ZHANG Tian, GOOI H B, et al. Penetration rate and effectiveness studies of aggregated BESS for frequency regulation [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1):167-177.
- [71] 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.
- [72] 周保荣,洪潮,金小明,等. 南方电网同步运行网架向异步运行网架的转变研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(8):2084-2092.
ZHOU Baorong, HONG Chao, JIN Xiaoming, et al. Study of backbone structure change from synchronous to asynchronous in China Southern Power Grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8):2084-2092.
- [73] WEN Yunfeng, ZHAN Junpeng, CHUNG C Y, et al. Frequency stability enhancement of integrated AC/VSC-MTDC systems with massive infeed of offshore wind generation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5):5135-5146.
- [74] WEN Yunfeng, CHUNG C Y, YE Xi. Enhancing frequency stability of asynchronous grids interconnected with HVDC links [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2):1800-1810.
- [75] WEN Yunfeng, LI Wenyuan, HUANG Gang, et al. Frequency

- dynamics constrained unit commitment with battery energy storage[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 5115-5125.
- [76] 韩梯, 柯贤波, 霍超, 等. 多直流、高占比新能源电力系统应对严重扰动新技术研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(4): 9-14, 27.
HAN Ti, KE Xianbo, HUO Chao, et al. New technology coping with serious disturbance in power system with multiple DC and high ratio new energy[J]. Smart Power, 2020, 48(4): 9-14, 27.
- [77] 杨德友, 蔡国伟. 基于广域局部量测信息的复杂电力系统自适应低频保护策略研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(10): 266-275.
YANG Deyou, CAI Guowei. Adaptive under frequency load shedding schemes for complex power systems using local measurements[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(10): 266-275.
- [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] LI Changgang, WU Yue, ZHANG Hengxu, et al. Continuous under-frequency load shedding scheme for power system adaptive frequency control[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2020, 35(2): 950-961.
- [80] DING Lei, HAN Qinglong, Zhang Xianming. Distributed secondary control for active power sharing and frequency regulation in islanded microgrids using an event-triggered communication mechanism[J]. IEEE Transaction on Industry Informatics, 2019, 15(7): 266-275.
- [81] MILANO F, MANJAVACAS Á. Frequency-dependent model for transient stability analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1): 806-809.

作者简介:



文云峰

文云峰(1986—),男,重庆人,副教授,博士研究生导师,主要研究方向为低惯量电力系统规划、运行与控制(**E-mail**: yunfeng.8681@163.com);

杨伟峰(1996—),男,浙江杭州人,硕士研究生,主要研究方向为低惯量电力系统频率稳定分析与控制、风电机组频率控制策略设计(**E-mail**: weifengyang@hnu.edu.cn);

林晓煌(1995—),男,广东潮州人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统惯量特性与最低惯量需求评估(**E-mail**: xiaohuang_lin@163.com)。

(编辑 李玮)

Review and prospect of frequency stability analysis and control of low-inertia power systems

WEN Yunfeng, YANG Weifeng, LIN Xiaohuang

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: With the infeed of large capacity HVDC and high proportion of renewable generation, more and more power systems are gradually evolving into low-inertia power systems. Low-inertia power systems usually have weak inertial support, strong uncertainty of generation, poor frequency regulation and damping capability, which results in frequency stability issues increasing. In order to better understand potential frequency stability risks in low-inertia operating scenarios and provide references for effective countermeasures, the research progress of frequency stability analysis and control of low-inertia power systems at home and abroad is reviewed and prospected. Firstly, the main causes of low-inertia operating scenarios and corresponding impacts on system frequency stability are analyzed, and the typical frequency problems occurred in practical systems in recent years are introduced. Furthermore, various frequency stability analysis methods based on time-domain simulation, analytical analysis and data-driven algorithms are explained. The control measures to improve the frequency stability of a low-inertia power system are discussed from the perspectives of frequency modulation ability mining using multi-type active power resources such as source, network, load and storage, multiple security defense lines strengthening and coordination. Finally, the future research directions in this field are prospected.

Key words: low-inertia power systems; inertia; frequency stability; frequency control; stability; renewable energy; HVDC power transmission