

“双高”配电系统的挑战与应对措施探讨

孙秋野¹, 于潇寒², 王靖傲²

(1. 沈阳工业大学, 辽宁省 沈阳市 110870; 2. 东北大学, 辽宁省 沈阳市 110819)

Discussion on Challenges and Countermeasures of “Double High” Power Distribution System

SUN Qiuye¹, YU Xiaohan², WANG Jing'ao²

(1. Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, Liaoning Province, China;

2. Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning Province, China)

ABSTRACT: With the gradual increase in the penetration rate of renewable energy sources such as wind and solar and power electronic equipment such as multi-converters in the distribution system (“double high”), power distribution system faces many problems and challenges. New problems such as low inertia and weak damping caused by the uncertainty and volatility of high proportion of renewable energy output and high proportion power electronic equipment embedding together bring new challenges to the safe operation of power distribution system. This paper summarizes the problems faced by the distribution system under the new situation, analyzes the mechanism of these new problems, and discusses the existing solutions based on the influence of “double high” characteristics on the distribution system in different spatial and temporal scale. Finally, the development of a “double high” distribution system is prospected.

KEY WORDS: “double high” power distribution system; renewable energies; power electronics; uncertainty; spatial and temporal scale

摘要:随着风光等可再生能源及多变流器等电力电子设备在配电系统中渗透率逐步提高,“双高”配电系统面临诸多问题与挑战。高比例可再生能源出力的不确定性及波动性,高比例电力电子设备大量存在于控制环节带来的低惯性及弱阻尼等新问题均为配电系统安全运行带来了新的挑战。该文从“双高”特性对配电系统影响的不同时空尺度出发,归纳配电系统新形势下面临的问题,分析这些新问题的产生机理,并针对现有的解决方案展开探讨。最后尝试对“双高”配电系统的发展进行展望。

关键词:“双高”配电系统; 可再生能源; 电力电子; 不确定性; 时空尺度

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFA0702200)。

National Key R&D Program of China (2018YFA0702200).

0 引言

当下环境污染问题日益凸显,全球范围内“碳达峰”,“碳中和”成为热点^[1],电力系统中风光等可再生能源发电是有效的解决措施之一^[2]。“十四五”以来,国家能源集团累计投产电力装机 5 280 万 kW^[3],清洁能源占比超过 65%^[4],成为引领企业发展和绿色转型的主力^[5]。2023 年发布的《新时代的中国绿色发展》白皮书指出,我国需加快推进以沙漠、戈壁、荒漠地区为重点的大型风电光伏基地建设,积极稳妥发展海上风电,积极推广城镇、农村屋顶光伏,鼓励发展乡村分散式风电^[6]。配电系统中可再生能源并网通常以分布式为主,利用闲置地块就地消纳,其具备传输距离短、损耗小等优点。然而由于系统中源荷直接相连,其相互干扰明显,且常伴随安装环境不确定,维修周期较短和由于延时、丢包、错序等导致的通信网络不可靠等问题,使得系统内波动较为剧烈。可再生能源与负荷的随机性,不确定性及波动性等特点的叠加使得源荷波动加剧^[7],配电系统的动态特征极大改变^[8]。传统同步发电机占比的下降及异步机通过变频器并网都降低了系统的转动惯量,并削弱了系统抗冲击能力;海量电力电子设备并网使得系统响应尺度复杂化^[9-10]。配电系统已经形成“高比例电力电子设备”和“高比例风光等可再生能源”的典型“双高”特征。

“双高”配电系统的整体框架如图 1 所示,高比例可再生能源接入的研究更关注于风光等可再生能源大量接入后系统不确定性增加的问题^[11-12],具体体现在通过控制、优化、规划、预测手段来降低不确定性的研究,多集中于系统的稳态过程。高

比例电力电子设备的研究则更关注于大量电力电子设备接入后系统的惯性和阻尼变化机理,目前,主要体现在电压稳定、功角稳定、频率稳定、输电能力、消纳能力等方面的研究^[13],多集中于系统的

暂态过程。“双高”配电系统储能的研究更关注于调峰调频以及解决不同时间尺度的能量平衡问题,目前主要体现在传统的增容补点和新兴的分布式储能^[14]。

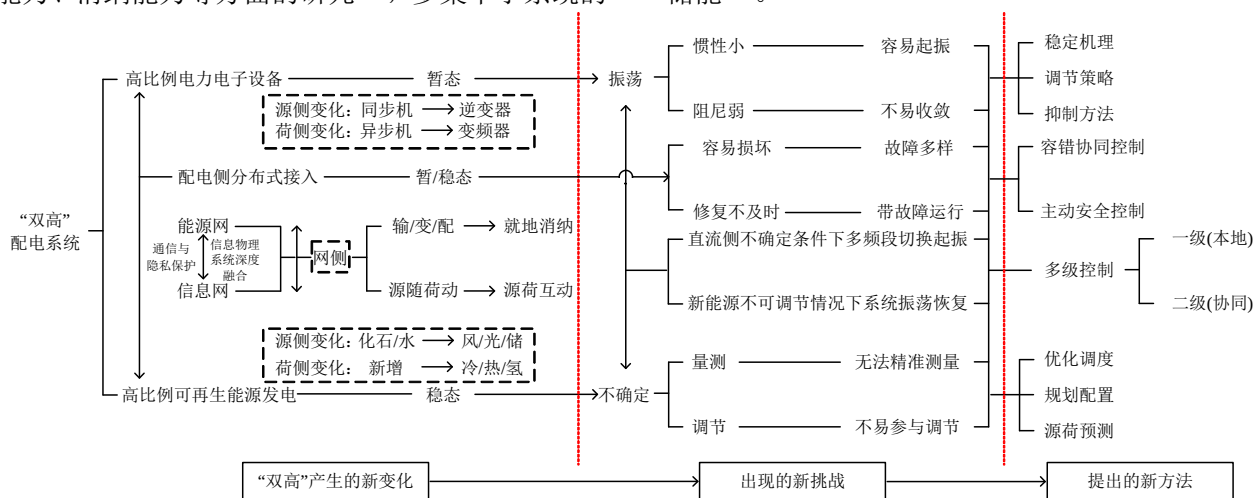


图1 “双高”配电系统整体框架

Fig. 1 Overall framework of “double-high” distribution systems

在传统大电网中,源侧与负荷侧相距较远且存在变压器、线路等缓冲电力电子设备的相互影响,此外,电力电子设备和可再生能源发电不确定性相叠加的问题影响较小。然而,配电网中源荷距离较近、设备安装环境复杂、设备易损坏、通信环境复杂等原因导致“叠加”现象显著,同时治理问题中存在大量负荷参与的现象,使得“双高”配电系统中已存在的挑战日益严峻并涌现了新的挑战。

因此,本文尝试从时空尺度出发,归纳并总结“双高”配电系统中源荷变化及暂稳态的特点,新问题的表现形式,产生机理及应对措施。并尝试将高比例电力电子设备与高比例可再生能源的挑战及应对措施进行有机结合,最后针对“双高”配电系统的未来挑战及发展趋势进行展望。

1 高比例电力电子设备低惯性及应对策略低惯性现象机理

1.1 低惯性现象机理

对于含高比例电力电子设备的配电系统,传统旋转发电设备由逆变器替代,其在时间尺度和空间尺度上的特点如图2所示,可再生能源发电的接口设备为静止型电力电子变换器,其没有传统的旋转部件。传统电力系统惯性定义为同步发电机转子对于转速变化的阻碍作用^[15],如文献^[16]将系统等效惯量定义为频率事件发生时源荷功率偏差与电网频率变化率的比值,其惯量水平既表征系统有功

功率与频率变化率或频率的关系,又表征系统的惯量能量水平。相比之下,静止型变换器在扰动时不能像传统的旋转发电设备吸收/发出能量,抵抗网侧频率变化,维持系统稳定运行,因此其设备惯性非常低(光伏并网的等效惯量几乎为0^[17])。然而,静止型器件的优点在于其惯量支撑策略的灵活制定,根据系统不同功率暂态特性,设置最佳的惯量支撑方法。然而其惯量水平与传统不同,仅能表征系统有功功率与频率变化率或频率的动力学关系,不能表征系统惯量能量水平。

尽管学者们提出了大量基于虚拟惯量等变流器控制方式,并建立大量基于同步机的旋转惯量支撑场站,“双高”配电系统的等效惯量依旧因大量的电力电子变换设备而较低^[18]。

1.2 广义惯量分析方法

如图3中所示,由于“双高”配电系统中同步机占比持续下降,虚拟惯量及附加控制显著增多,因而其惯量评估体系从传统的由额定转速下发电机转子具有的动能和该机组额定容量的比值方法转换到含静止器件及控制器虚拟惯量的广义惯量评估方法。

目前的广义惯量分析方法分成了两大类,分别是模型构建法和数据辨识法,如图4所示。

1.2.1 模型构建法

模型构建法起源于传统同步发电机的惯量评估,通过建立同步发电机的数学模型来表征其运行

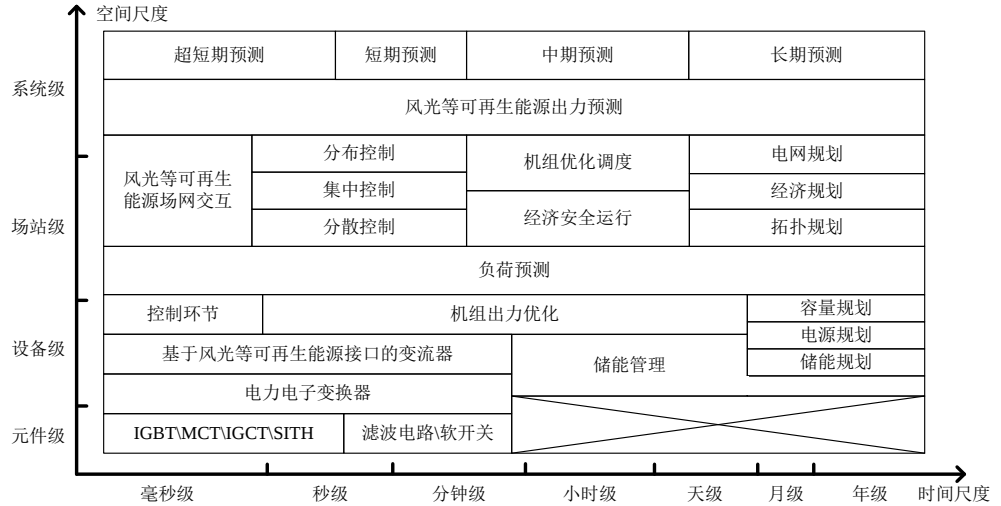


图 2 “双高”配电系统时间-空间特点归类

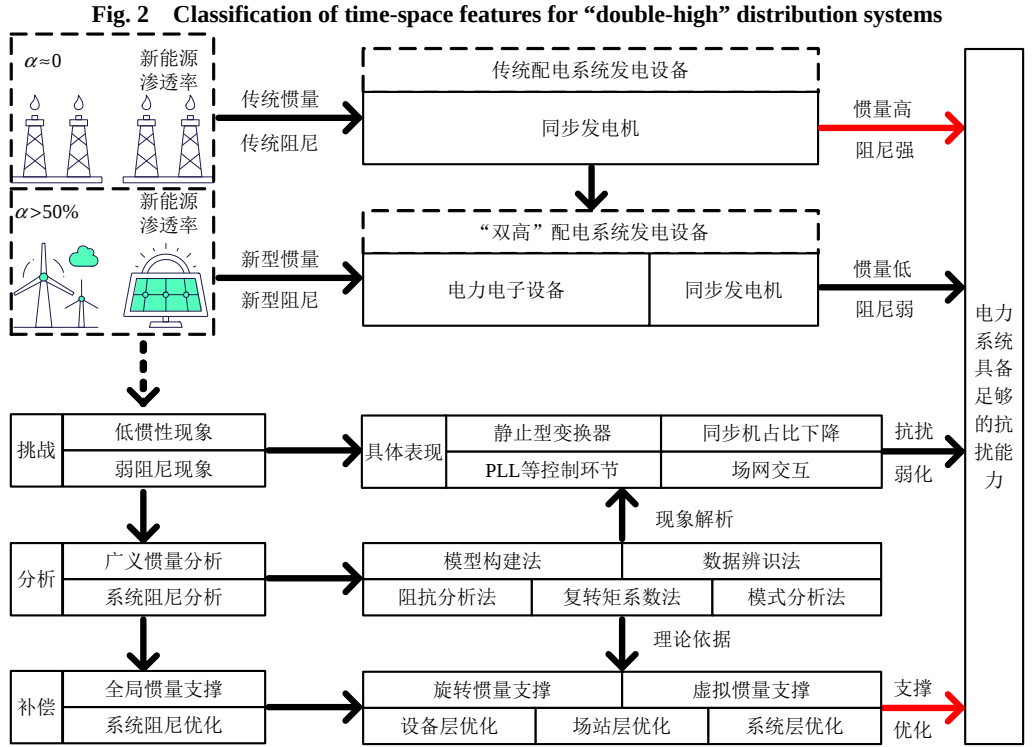


图 3 “双高”配电系统带来挑战的机理、分析与补偿

Fig. 3 Mechanism, analysis and compensation of challenges posed by "double-high" feature of distribution systems

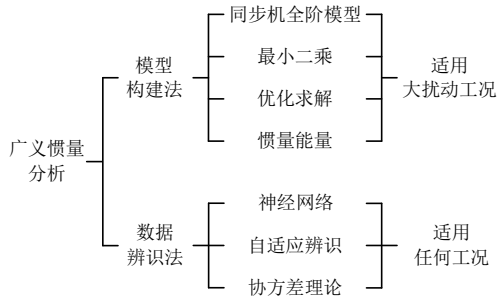


图 4 广义惯量分析方法归类

Fig. 4 Classification of inertia analysis methods

特性，进而评估其等效惯量。近年来，模型构建法主要在基于同步机的分析中得到了广泛的应用，包

括卡尔曼滤波、优化求解^[19]、最小二乘^[20]等算法已经应用于场站系惯量分析中。为降低计算复杂度，学者们提出简化多项式模型并用于惯量评估，如文献[21]将系统简化为二阶多项式模型，并通过最小二乘法评估系统等效惯量。类似地，基于摇摆方程的惯量能量简化评估方法，通过相量量测单元计算系统节点惯量，进而实现系统等效惯量的评估。如文献[22]建立了摇摆方程模型，并通过其导数分析了系统的等效惯量。文献[23]从能量的角度实现对系统惯量的评估，目前，利用多节点惯量求解系统等效惯量的问题面临着全网结构未知，系统模型阶

数难以确定等巨大挑战。

随着电力系统“双高”化,风光发电中多电力电子设备大量存在于控制环节使得需要分析的变量爆炸式增长,同时时间尺度缩减,应用模型构建法进行惯量分析的难度急剧增大。目前,可再生能源机组的惯量评估得到了学者们的广泛研究^[21],如文献[24]建立了系统状态空间模型,并通过主模态分析计算等效惯量。然而,由于可再生能源机组输出的不确定性及波动性等特点,其模型构建及惯量评估的方法尚未完善,如何结合其特点建立精准有效的评估模型有待进一步研究。

1.2.2 数据辨识法

数据辨识主要通过对系统中各个模态下扰动数据的提取,应用神经网络^[25]、自适应辨识算法^[26]以及矩阵协方差理论^[27]等,建立包含机组运行状态、负载水平等变量在内的综合模型并求解,进而评估等效惯量。数据辨识法与系统所处工况的扰动大小无关,适用范围更广。文献[28]通过多层神经网络预测并评估系统等效惯量。文献[29]通过可再生能源发电并网占比及系统同步机总容量预测了系统整体等效惯量。文献[30]建立了包含系统备用容量、可观测量等多变量关联模型,更好地实现了整体惯量的预测和评估。然而,当下基于数据辨识的方法前置处理阶段过长,效率较低,如何结合数据辨识设计快捷高效的处理方法有待进一步研究。

1.3 全局惯量支撑

近年来,为解决大电网中低惯量的问题,河北新型电力系统示范工程应用自带惯量的构网型控制技术,有效解决“双高”带来的低惯量问题^[31]。类似地,中国电力科学研究院有限公司在低惯量电力系统研究示范工程中建立了具备虚拟同步机功能的新能源电站,从而应对低惯量问题^[32]。针对配电系统,目前的惯量支撑方法可分为如图5所示的基于旋转设备的转动惯量支撑和基于静止设备的

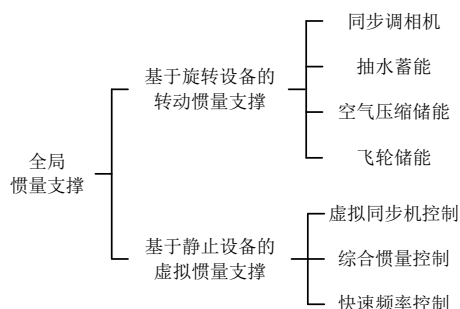


图5 系统惯量支撑归类

Fig. 5 System inertia support classification

虚拟惯量支撑两种。

1.3.1 基于旋转设备的转动惯量支撑

基于旋转设备的转动惯量支撑是指同步旋转并网装备在运行时与电网直接耦合,当系统出现功率扰动时,旋转装备释放出转子存储动能用于抵抗系统频率偏移,并向电网提供转动惯量支撑。

目前,基于旋转设备的转动惯量支撑主要包括同步调相机、抽水蓄能、空气压缩储能以及飞轮储能等。同步调相机作为同步并网的旋转装备,在额定运行时也同样存储旋转动能,可在电网故障情况下释放出旋转动能以提供惯量支撑^[33]。空气压缩储能(compressed air energy storage, CAES)^[34]和抽水蓄能(pumped-hydro storage, PHS)^[35]与火电机组运行机理相同,CAES和PHS系统存储的能量可作为原动功率用于驱动同步发电机并网运行,进而向电网提供惯量支撑。飞轮储能利用电能驱动高速旋转的飞轮存储动能,并在系统惯量较低时用以拖动电机发电并支撑系统^[36]。

1.3.2 基于静止设备的虚拟惯量支撑

基于静止设备的虚拟惯量支撑是结合控制算法,可再生能源,能量存储系统及电力电子设备等静止器件来模拟传统电力系统惯量的一类控制方法。

虚拟惯量控制主要可以分为虚拟同步机控制(virtual synchronous machine, VSM)、综合惯量控制(synthetic inertia control, SIC)以及快速频率控制(fast frequency control, FFC)3类。

VSM通过控制电力电子变换器来模拟同步发电机的动态行为^[37],如七阶状态方程模型^[38-39]等。基于输出参考值不同,其还可以分为电压和电流参考值模型两类^[40-41]。

SIC中的惯量响应可以通过摇摆方程表征,并追踪系统的频率变化率实现。SIC仅利用频率变化率的导数来模拟同步发电机惯量响应,因此该方法的关键在于对频率变化率的测量。

FFC是基于频率偏差的控制,通过模拟同步发电机的下垂控制实现。并联运行的调速器可根据各自的额定功率分配负载,其下垂系数表示频率偏差与输出功率变化的比值^[42]。

2 高比例电力电子的弱阻尼及其应对策略

2.1 弱阻尼现象机理

“双高”配电系统弱阻尼现象严重,然而其产

生的机理并不明确。目前,学者们普遍认可从贡献负电阻的角度揭示其产生机理,即大量电力电子设备及控制部分等效为负阻抗,导致系统阻尼变弱,引发系统振荡失稳。从该视角出发,弱阻尼现象主要从源侧和载侧两个方面体现。

功率解耦控制中解耦计算严重依赖锁相环,其反馈控制环节在跟踪电网电压相位的同时会引入正反馈^[43],进而产生负阻抗^[44],削弱系统阻尼。

风光等可再生能源并网同样会出现大量的等效负阻抗。文献[45]指出,双馈异步风力发电在转差率 s 小于 0 时,会在转子侧换流器控制部分引入额外的负电阻;文献[46]指出,永磁同步直驱风力发电机组与弱交流系统动态交互会产生负电阻效应,进而导致系统阻尼变弱。

2.2 系统阻尼分析方法

系统阻尼机理研究以线性系统稳定性理论为基础,主要分为频域和时域分析法。频域分析法中以阻抗分析法应用最为广泛,复转矩系数法则更偏向分析同步发电机与串补输电系统的轴系扭振问题;模式分析法则建立系统动态模型,进而对系统的状态矩阵进行特征值分析,如图 6 所示。

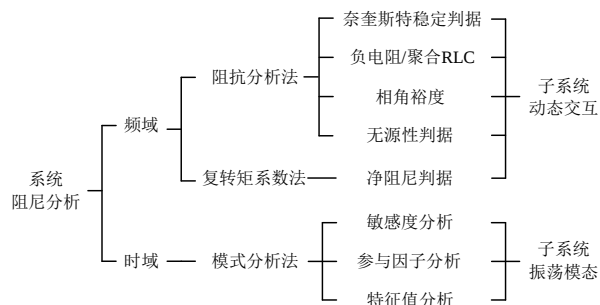


图 6 系统阻尼分析方法归类

Fig. 6 Classification of system damping analysis methods

2.2.1 阻抗分析法

阻抗分析法通常将系统分解为两个开环子系统,并通过子系统的频率响应特性来评估闭环互联系统的稳定性,其又可细分为图 6 所示的 4 类。

基于奈奎斯特的阻抗分析法通过构建电力系统源侧及载侧阻抗模型,得到源侧载侧阻抗比,进而通过其奈奎斯特曲线,判断系统稳定性^[47]。

基于相角裕度的阻抗分析法判断子系统阻抗幅值交叉点处的相角差是否超过 180° ,来判断闭环系统稳定性。其从子系统是否贡献负的相角裕度的角度判断系统稳定性^[48]。

基于负电阻或聚合 RLC 电路的阻抗分析法将源侧和载侧子系统的等效阻抗之和表示为 $Z=R+jX$

的形式,或建立 RLC 等值电路模型,判断阻抗之和的实部或等效电阻是否为负,进而判断闭环系统稳定性^[49]。

基于无源性的阻抗分析法通过判断子系统是否无源来判断闭环系统是否无源(即传递函数极点均在复平面的左半平面,且任意频率下传递函数的实部非),进而根据无源系统稳定来判断闭环系统稳定性^[50]。

如何在多子系统中应用阻抗分析法,并依据阻抗的本质特性对系统失稳问题做出解释有待进一步研究。

2.2.2 复转矩系数法

复转矩系数法从阻尼转矩的角度解释了轴系扭振失稳问题,具有明确的物理意义,并提供了简单的稳定评估方法^[51],即机械和电气子系统的阻尼转矩系数之和大于 0 时,闭环系统稳定^[52]。然而该稳定判据缺乏严格的数学证明^[53-54],同时基于“双高”配电系统的新特点,该方法得到了改进,如文献[55-56]中对风机的转子侧换流器控制及锁相环子系统应用改进复转矩系数法分析系统阻尼变化。文献[57]将控制环节与锁相环等效为阻尼分量与同步分量,并分析了主导振荡模式。

2.2.3 模式分析法

模式分析法是针对系统的特征信息评估振荡稳定性问题,并根据参与因子辨识主导振荡的元件,表征不同元件之间动态交互程度^[58]。主导振荡模式的信息可以为提高系统阻尼,消除振荡提供理论指导^[59]。根据全系统状态矩阵求解振荡模式,辨识阻尼最低的主导振荡模式,并根据该模式阻尼判别系统稳定性,以及求解各元件的参与程度^[55]。

模式分析法准确度高,物理透明度高,易指导电力系统的运行和稳定控制,如为电力系统静态稳定器选择理想安装地点^[60];分析除暂态力矩放大作用外的各种次同步振荡问题^[61]等。然而,系统状态方程形成较为困难,且有“维数灾”的问题^[62],难以适应多机电力系统的情况,且不利于阻尼抑制对策的确定,如何兼顾模式分析法的物理透明度以及在保持结果精确度的同时降低其计算复杂度有待进一步研究。

2.3 全局阻尼优化

近年来,为解决大电网中弱阻尼的问题,国家电网公司的智能柔性直流输电技术示范工程采用智能化柔性直流输电技术通过调节直流电压和功

率流向来提高系统的稳定性和阻尼能力^[63]。类似地,华东电网的智能交流输电技术示范工程通过灵活交流输电和智能交流输电技术及高级控制算法来提高系统的动态响应和阻尼特性^[64]。目前,各类弱阻尼现象抑制方法并无本质化的差异^[65]。学术界尚未对不同类型弱阻尼现象及其优化方法的特征和形成机制达成共识,缺少系统性的整理和归纳。

为了更好地阐述“双高”配电系统中弱阻尼现象优化方法,本文利用文献[66]提出的结构分别从设备层、场站层以及系统层出发,概括现有弱阻尼现象优化方法,如图7所示。

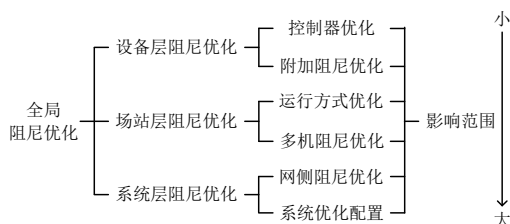


图7 全局阻尼优化归类

Fig. 7 Global damping optimization classification

2.3.1 设备层阻尼优化

设备层阻尼优化可分为控制器优化以及附加阻尼优化两种。

控制器阻尼优化通过优化控制器中控制环路参数设计提升其阻尼特性。文献[67]提出一种消减延时环节的控制环路设计改善方法来降低控制系统延时对负阻尼的影响。此外,还可以通过调整控制器结构实现其等效阻抗优化,如文献[68]在一级控制中使用比例谐振控制器,增大谐波频率处阻抗幅值来降低削弱负阻尼现象。

附加阻尼优化指的是在一级控制中引入补偿器,并将其反馈至控制环路来实现阻尼优化。如文献[69]引入柔性交流输电系统装置向系统中注入逆向振荡电流来实现对系统内潮流分布的快速调节,实现系统阻尼的优化。

2.3.2 场站层阻尼优化

场站层的阻尼优化主要包括运行方式阻尼优化以及多机阻尼优化。

运行方式阻尼优化是对可再生能源发电场站增添多种运行模式,有效缓解可再生能源发电的不确定性带来的弱阻尼现象。如文献[70]说明,静止无功发生器的固定无功功率输出模式能增大系统阻尼,增强系统稳定性。

多机阻尼优化是将控制器中的控制结构、参数及虚拟阻抗技术应用多机系统中,从而实现可再生

能源发电并网等场站层的阻尼优化^[71]。

2.3.3 系统层阻尼优化

系统层阻尼优化可分为网侧阻尼优化和系统阻尼优化配置两个方面。

网侧阻尼优化是针对关键参数及结构进行优化设计,进而提升系统的阻尼。如文献[72]提出一种阻抗灵敏度指标,通过衡量系统中关键参数的敏感度进行优化设计,进而改善系统阻尼特性;文献[73-74]改变网侧结构,通过降频来降低系统电抗的影响,有效改善了网侧阻尼特性。此外,对网侧多环节采用非线性控制同样可以改善电网阻尼特性。然而其控制结构较为复杂,仍处于理论研究阶段。

系统阻尼优化配置是通过改善多变流器的不同接入位置提升系统的阻尼特性。如文献[75]通过分析阻抗网络特性得到变流器不同接入位置对阻尼特性的影响,并提出一种复杂系统中变流器最佳接入位置的算法。

配电系统中源侧荷侧的高比例电力电子化严重降低了系统的惯量和阻尼,目前基于惯量支撑和阻尼优化的方法已得到了广泛的研究,如何针对高比例电力电子化配电系统有机地结合两者仍有待研究。

3 高比例可再生能源接入的控制问题

随着分布式可再生能源的快速发展和成本的降低,以集中式控制为主的传统配电系统正在向以多微电网为子系统的分布式“双高”配电系统转变。如图3所示,配电网控制的目的是通过对其中源荷储等设备的调节实现高比例可再生能源接入下系统的稳定高效运行,所以其时间尺度通常较宽,从秒级到小时级。本节从“双高”配电系统分级控制的角度对“双高”配电系统的控制问题进行阐述,“双高”配电系统分级控制如图8所示。

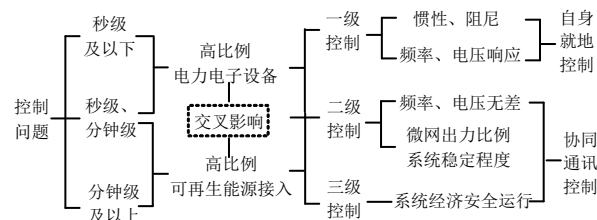


图8 “双高”配电系统分级控制

Fig. 8 Hierarchical control of “double high” distribution system

3.1 一次电压/频率控制

“双高”配电系统的一级控制是控制逆变器的

电流及电压。逆变器的输出控制由内环和外环组成。外环调节电压，内环控制输出电流^[76]。传统微电网在并网运行时，由配电网为微电网提供稳定的电压和频率。微电网中通常采用 P - Q 控制为大电网注入电能，在孤岛运行时需要保证微电网内的电能质量，采用 V - f 控制稳定电压和频率。由于可再生能源和新型负荷的接入，“双高”配电系统中非线性电源和负载增多，为了增强对其的控制性能并提高其稳定性，一些学者对多变量控制方法展开了研究^[77]。其中，下垂控制和虚拟同步机两种控制方法应用最为广泛。

3.1.1 下垂控制

下垂控制是一种模拟同步发电机下垂特性并调整发电机输出的控制策略，通常应用于多机配电系统或微电网中，以确保可再生能源机组对系统负荷变化做出适当响应，从而保持整个系统的频率电压在合理范围，其中， P - f / Q - V 是最具代表性的下垂控制。由于电力系统线路大多呈感性，其控制方程如表 1 所示。其中， P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为下垂控制过程中的有功功率和无功功率参考值； ω_{ref} 为下垂控制输出的角频率参考值； ω 为下垂控制输出的角频率； V_{ref} 表示为输出电压参考值； V 为输出电压值； m 为有功下垂系数； n 为无功下垂系数。

表 1 下垂控制及虚拟同步机控制方程及特点
Table 1 Droop control and virtual synchronization machine control equation and characteristics

控制方法	控制方程	特点
P - f / Q - V 下垂控制	$\begin{cases} \omega = \omega_{ref} - m(P - P_{ref}) \\ V = V_{ref} - n(Q - Q_{ref}) \end{cases}$	根据配电网频率变化自动调节发电机输出频率
虚拟 同步机控制	$\begin{cases} P_m = P_{ref} + \frac{1}{D_p}(\omega_{ref} - \omega) \\ V = V_{ref} - D_q(Q - Q_{ref}) \end{cases}$	控制电力电子设备产生虚拟惯性，模拟同步发电机行为

基于上述方法，文献[78]设计一种基于指数函数的分布式能源下垂控制策略，降低了无功功率分配偏差。文献[79]针对电动汽车负荷设计一种自适应双向下垂控制，保证了配电网的稳定性。然而下垂控制对系统外部扰动和不确定性的响应能力有限，在实际应用中需要考虑复杂环境和非线性效应等问题。

3.1.2 虚拟同步机控制

虚拟同步机控制在下垂控制的基础上，通过增加虚拟惯量，使光伏、风电等分布式能源资源能够以类似于传统同步发电机的转子运动方程的形式使并网变换器具备惯量阻尼特性来协调分布式能

源资源，其控制方程如表 1 所示。其中， D_p 为 P - ω 下垂系数， D_q 是 Q - V 下垂系数。基于上述方法，文献[80]提出一种基于模糊推理系统的改进虚拟同步发电机控制算法，降低了有功功率并减小了频率超调，提高了系统频率稳定性。文献[81]提出一种基于状态空间分析的虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)增强控制方法，通过对虚拟定子电抗的调整，实现了振荡阻尼和暂态有功功率的合理分配。然而虚拟同步机控制对于网络失真和系统不稳定的敏感性，以及在复杂网络条件下性能的受限，使得学者们需要对控制算法进一步改进。

3.2 二次补偿/恢复控制

“双高”配电系统的二级控制负责各微电网的电压、频率可靠和输出功率按比例分配，该领域有 3 种主要策略：集中控制、分散控制和分布式控制方法。

3.2.1 集中控制策略

集中主控制器测量各分布式发电机组的频率和电压，并与并网提供的参考值进行比较，根据参考值和实际值之间的误差，恢复电压和频率。集中控制最显著的优点是程序标准化以及实施简单。文献[82]从网内通信和微网与主网通信设计控制器。在集中控制中，本地控制器既不相互通信也不单独行动，但可以从分布式电源收集数据，中央控制器根据目标函数和约束条件对所有分布式电源和储能做出调度决策。主从控制是集中式控制策略中采用比较多的一种方法，用以调节公共母线的电压。该算法通过制定系统操作的总体策略和指令，协调各微网执行电压调节、负荷分配等任务，从而在多层控制中提供更高水平的协调^[83]。

3.2.2 分散控制策略

分散控制侧重于使各个微电网独立做出决策，不依赖于全局信息，具有节点间通信少，利于连接和使用、计算成本较低、故障控制范围广泛以及单点潮流管理效率高等优势^[83]。文献[84]提出一种能够以并网或孤岛模式运行智能体的具有实时决策环境的微电网的分散控制架构，提高了各逆变器控制的可靠性。

3.2.3 分布式控制策略

分布式控制通过在系统中引入分布式智能设备，实现对电能的高效分配、实时监测和智能调控。与集中控制相比，分布式控制对通信网络以及中央处理环境的依赖程度低，容错能力强。与分散控制

相比，分布式控制通过节点通信来考虑配电网的全局性能。文献[85]设计了基于多智能体系统的分布式控制，以保证针对任何即插即用时间以及连接故障和参数变化的鲁棒性。文献[86]提出一种结合基于多智能体的一致性算法的分布式协调控制器，提高了配电网和微电网之间的能源利用率。

与大电网源荷分离的特点相比，在物理层面，“双高”配电系统中源、荷、储多依据地形或建筑，单机容量小、分布分散交互，导致设备安装环境复杂、易受人为因素破坏、检修与运行维护难度大。同时，一些源侧设备的工作环境恶劣，如分布式光伏发电集群与海岛微网中的设备多处于高温、低温、潮湿及腐蚀环境。在信息层面，与大电网采用专用的通信网络相比，“双高”配电系统所采用的通信方式限于用户侧现有通信网络，其带宽窄、稳定性较差、信息节点开放缺乏保护，导致信息传输拥挤、数据丢包，且易受网络攻击。这些物理与信息层面的问题都会导致分布式控制出现故障与异常。针对上述物理层问题，文献[87]采用自适应控制算法的主动安全控制方案来调整分布式发电变换系统的工作参数，以保持系统的稳定性和效率。文献[88]针对分布式发电执行器突变异常，提出自适应状态反馈滑模主动安全控制策略。针对信息层问题，文献[89]通过在线自适应方案减轻离线设计对所有分布式光伏最坏情况攻击的保守性，并解决了受多层拒绝服务攻击对网络微电网频率同步的协同问题。文献[90]提出动态 P - f 下垂控制器的二次频率控制器，在提高响应速率的情况下提高对拒绝服务攻击的容忍度。

4 高比例可再生能源接入的优化规划

可再生能源高比例渗透带来较大的波动性和不确定性，导致当下配电系统的分布式电源不完全可控，而系统中分布式电源数量增加，拓扑分布更加复杂，负荷的可调性增强，储能增多，从传统的“源随荷动”到当前的“源-荷-储互动”。这就需要优化规划方法对源、网、荷、储协同调度和建设、扩展、重构。如图 9 所示，本节将从“双高”配电系统的优化调度及规划模型到求解算法进行详细阐述。

4.1 “双高”配电系统中的优化调度模型

优化调度模型是描述“双高”配电系统优化调度问题的核心。根据处理不确定性的方法，可以将

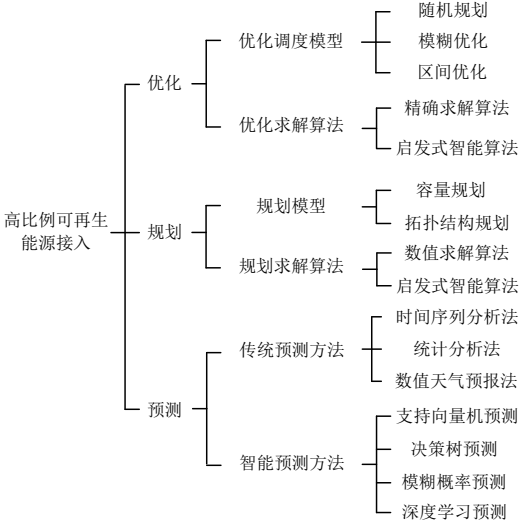


图 9 配电系统中高比例可再生能源接入带来的问题及解决方法

Fig. 9 Problems and solutions caused by the high proportion of renewable energy access in the power distribution system

“双高”配电系统的优化模型分为随机规划模型、鲁棒优化模型以及模糊规划模型。各调度模型如表 2 所示。

表 2 “双高”配电系统中的优化调度模型
Table 2 Optimized scheduling model in the double-high power distribution system

模型名称	数学表达式	特点
随机规划模型	$\begin{cases} \min/\max F[c^T y(x_j)] \\ \text{s.t. } Ax_j^n + Bx_j^{n-1} + \dots + c = 0 \\ \min \leq x_j \leq \max \\ j=1, 2, \dots, m \end{cases}$	以概率分布描述随机变量
模糊优化模型	$\begin{cases} \min/\max F[g(x_j)] \\ \text{s.t. } 0 \leq g(x_j) \leq 1 \\ x_j \in [x_{\min}, x_{\max}] \end{cases}$	以隶属度函数描述不确定性程度
区间优化模型	$\begin{cases} \min/\max F[c^T y(x_j)] \\ \text{s.t. } x_j \in [x_{\min}, x_{\max}] \\ y(x, w) = \emptyset \\ \forall w = (a_i), \quad a_i \in \omega \end{cases}$	使用确定上下界来描述不确定性

4.1.1 随机规划模型

随机规划是一种利用概率方法解决决策问题的数学优化方法。对于高不确定性和波动性的可再生能源机组，随机规划能准确表述驱动数据以及构建合理高效的约束条件，并尽可能对不确定性数据进行缩减。例如，文献[91]使用随机对偶动态规划，解决了随机规划中的“维数灾难”问题。文献[92]在随机规划问题增加了需求响应，有效降低了随机规划仅仅依赖数据带来的片面性。

4.1.2 模糊优化模型

模糊优化模型多目标表述能力较好，在表述多

电源协同以及多能互补等高比例可再生能源配电系统的协同供能方面具有优势。文献[93]将机组出力功率和功率爬坡持续时间用隶属度函数表示来表征不确定性。文献[94]将模糊优化与需求响应相结合，综合考虑了发电和预测的不确定性。

4.1.3 区间优化模型

区间优化专注于处理参数不确定性，其中决策变量和约束条件的参数以区间形式表示，而非具体数值，在面对缺乏准确参数信息或可再生能源变化广泛的情况下，为决策问题提供更灵活的处理方式。文献[95]将风速、太阳辐照度和负荷的预测误差制定为区间数，以避免对精确概率分布的需求，降低系统的不确定性。文献[96]基于区间顺序关系和可能性，将不确定性目标函数和约束条件转化为确定性目标和约束，量化了不确定性的影响。

4.2 “双高”配电系统中的规划模型

系统的优化问题是利用现有设备进行调度来达到系统的经济安全环保运行，但是当现有设备或系统结构难以满足优化目标时，就需要通过规划对系统进行新增设备、建设规划或者扩展和重构，其时间尺度通常较长，通常在年及以上。相较于优化调度问题，规划问题更注重中长期内发电、储能、负荷等设备的发展。

4.2.1 容量规划

可再生资源分布不均导致可再生能源机组的建设和并网困难，储能系统用于配电系统已成为业界所共识，机组建设也需要配备相应容量和不同时间尺度的储能来平抑不确定性。此外，还需要相应容量的负荷实现能量平衡，从而保持系统的经济性和稳定性。

考虑到可再生能源的分布不均，文献[97]对可再生能源机组进行容量规划，降低了配电网的建设成本和投资成本。由于一些地区原有电力系统，所以需要在原有系统的基础上进行扩容规划。文献[98]将负荷和可再生能源的不确定性纳入规划目标函数，提高了扩容规划的适应性。文献[99]考虑了配电系统和输电网之间的联系，通过双层协同扩容规划的方式降低总体规划成本和配电网运营成本。文献[100]对配电网中储能的位置、容量和额定功率进行规划，最大限度发挥了储能的效益。

4.2.2 拓扑结构规划

传统电力系统的拓扑结构规划主要根据系统

负荷情况来选择线路连接方式，以最小投资成本来满足基本负荷需求^[101]。然而在“双高”系统中，能源信息耦合加剧，除了能源系统的拓扑结构以外，通信以及算力的拓扑结构也需要进行合理规划。文献[102]提出一种大规模并网系统拓扑规划，提高了能源系统的稳定性。文献[103-104]在规划时考虑光能和风能的位置分布以及地形因素，分别节约了电缆建设成本以及储能建设成本。文献[105]对电力通信系统的网络结构拓扑进行规划，提高了通信网络的可靠性和容错能力。文献[106]在求解二次频率控制时对配电网算力拓扑结构进行规划，构建了具有边缘计算能力的算力网络结构，在保证计算时间的前提下提高了系统对网络攻击的容忍度。

4.3 “双高”配电系统中的优化调度求解方法

双高配电系统的优化规划求解方法分为精确求解算法和启发式智能算法，本节将根据这两类算法进行详细介绍。

4.3.1 精确求解算法

精确求解算法的优势明显，由于其可以从数学上证明得到的解为最优解，所以算法的可解释性强，而且确保了解的正确性。目前主流的精确求解算法，如表 3 所示。但是在求解不确定性问题时需要考虑额外线性化步骤初始化参数，因此，精确算法通常与确定性模型相结合使用。

表 3 “双高”配电系统中的优化求解算法
Table 3 Optimal solution algorithm in double-high distribution system

名称	实施方法	特点
线性	Lambda 迭代法 ^[108]	迭代至误差小于人工设定参数 λ
规划	内点法 ^[109]	向目标函数最快下降方向搜寻收敛最优解
非线性	牛顿法 ^[110]	一阶雅可比与二阶海森矩阵实现梯度下降
规划	拉格朗日法 ^[111]	分解多约束主问题为子问题依次优化计算
	二次规划法 ^[112]	泰勒级数重构目标函数形成二次函数形
混合整	Benders 算法 ^[113]	主次问题逐次迭代并修正参数逼近最优解，
数规划	C&CG 算法 ^[114]	结合对偶理论转化主、子问题简化计算
动态	文献[115]	基于时序或空间分解
规划		主问题为子问题求解
鲁棒	文献[116]	制定鲁棒性准则，
优化		提取不确定性变量波动区间

文献[107]将鲁棒优化与线性规划相结合，针对可在生能源不确定性，通过对偶理论，将提出的鲁棒最佳化问题转化为一个混合整数线性规划问题并进行求解。文献[117]建立系统能量管理模型，通过动态规划求解用电成本最小化方案。文献[118]使用混合整数线性规划方法制定并求解了配电系

统空间规划问题。文献[119]通过 Benders 分解求解基于混合整数非线性规划的系统规划问题。文献[120-121]分别通过动态规划求解多阶段和多目标电力系统规划问题。

精确求解算法通过数学模型求解问题,能保证求得解最优,但是当求解问题规模过大时,算法复杂程度高,需要通过近似算法、剪枝策略、并行计算或问题分解等方法降低算法复杂度。

4.3.2 启发式智能算法

随着高比例可再生能源接入,配电系统的优化目标变得复杂,从传统的单目标优化考虑电力系统总成本转向考虑成本、碳排放、能量质量、系统可靠性和不确定性等多目标优化。传统精确算法在多目标优化方面效果不佳,尤其在高维度约束条件下解集求解能力有限。因此,通常采用启发式智能算法。常见启发式算法包括遗传算法等进化算法、模拟退火、粒子群优化等群体智能算法以及机器学习算法。文献[122]采用粒子群算法求解混合可再生能源系统总成本和可再生能源利用率的多目标优化。文献[123]采用非支配排序遗传算法求解可再生能源不确定性和系统总成本最小化问题。文献[124-125]将进化算法与拟牛顿算法、最优功率流和分支交换相结合来求解规划问题。文献[126]采用深度学习方法,利用具有长短期记忆单元的深递归神经网络求解了多微电网的负荷调度。文献[127]采用统计机器学习方法处理系统中光伏发电和负荷的不确定性,有效提高了规划速度。文献[128]在有源配电网规划采用人工神经网络,降低了对系统精准模型的依赖。

启发式智能算法效率高,但可能无法获得全局最优解,需要结合多种启发式智能算法与局部搜索策略,以增加全局搜索能力,提高找到全局最优解的可能性。

5 高比例可再生能源接入的预测问题

精确的预测有助于降低“双高”配电系统中可再生能源出力的不确定性,进而对产能变化进行调整和补偿,以保障电力系统的稳定运行。与传统能源系统不同,源荷不确定性之间的耦合加剧以及人为影响因素复杂,需要提前预测以降低不确定性。按照预测的时间尺度大小,预测可分为超短期、短期、中期以及长期预测,不同时间尺度的预测解决的问题也不同,其作用如图 10 所示。

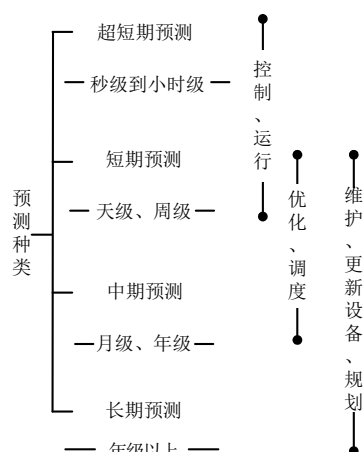


图 10 不同时间尺度的预测在控制、优化和规划中的应用

Fig. 10 Application of predictions at different time scales in control, optimization, and planning

5.1 经典预测方法

经典预测方法是通过数学模型描述或拟合的精确算法,包括时间序列分析法、趋势分析法和统计分析法等方法。

5.1.1 时间序列分析法

时间序列分析法通过随时间变化的连续负荷数据序列,建立数学模型描述负荷与时间的关系或者趋势,从而确定负荷和时间的函数关系。该方法所需数据量少,且拟合结果为一个连续函数,但是由于该方法对数据不进行预先处理,所以能处理的数据量较少,而且通常完全拟合历史数据,对长时间的随机误差抵抗能力较差,所以只能用于超短期和短期预测^[129]。

5.1.2 统计分析法

统计分析法又称回归分析方法,在预测中表现为分析天气、经济等外部因素与预测值之间的关系。其方法简单、参数较少、预测的速度快,但是对历史数据要求较高,适合在中期以及长期预测中应用。例如,文献[130-131]基于自回归移动平均值模型,利用历史负荷数据中的自相关和移动平均结构来进行准确的预测。文献[132]利用自回归积分移动平均值模型,增强了对非稳态出力数据的处理能力。文献[133]在自回归积分移动平均值模型的基础上,考虑了季节性负荷变化,提高了长期预测精度。

5.1.3 基于数值天气预报法

基于数值天气预报法多用于风光出力预测,该算法不需要较长观测窗口期的历史数据,以天气预报为实时输入数据,预测可再生能源出力情况,可以对新建风电场和光伏电站等“双高”配电系统规

划问题进行指导。文献[134]基于高斯过程对风速进行修正,并找到与输出功率之间的关系进行建模,实现了风力发电的功率预测。文献[135]分析了太阳辐照预报的显著特征,进而讨论了数值天气预报和电力系统规划之间的关系。

经典预测方法算法结构简单,计算速度快,算法可解释性强,适用于规模较小的“双高”配电系统,然而面对系统规模大、可再生能源比例过高的系统,需要对经典算法进行调整改进。

5.2 智能预测方法

电力预测受多种因素影响,负荷曲线和发电曲线具备较强的非线性。由于机器学习方法具有较强的非线性映射能力,能有效地处理预测中的非线性问题。机器学习方法包括支持向量机、模糊逻辑以及神经网络等方法。

5.2.1 支持向量机预测

支持向量机处理小样本问题和非线性问题具有优势,但是参数选择上具有一定困难。在历史数据规模较小时,该方法均适用于超短期、短期、中期和长期预测。文献[136]提出一种基于支持向量回归机的短期预测方法,提高了预测精度。文献[137-138]分别通过 K-means、最小二乘以及遗传算法对支持向量机预测方法进行优化。

5.2.2 模糊概率预测

“双高”配电系统中的不确定性的种类分为固有不确定性和随机不确定性。其中随机不确定性可以借助模糊理论和概率模型来实现模糊概率预测。文献[139]根据风力发电和太阳能发电的时间序列,对原始数据进行模糊信息粒度处理,消除数据的波动性和不确定性。文献[140]提出一种新的长期模糊概率预测模型,提高了长期负荷预测的准确性和适应性。

5.2.3 深度学习预测

深度学习预测是以神经网络为工具进行优化的特殊的机器学习方法,其在预测的表现中较为良好。常见的深度学习预测方法有 BP 神经网络、卷积神经网络以及循环神经网络。

卷积神经网络可以有效地捕获时空关系,对于时序数据(如时间序列)中的短期依赖关系具有良好的建模能力,适用于“双高”配电系统超短期以及短期预测。文献[141]提出一种基于卷积神经网络的混合深度学习神经网络,用于 24h 风力发电预测,通过卷积、核函数合并运算提取风力发电特性,提

高风力发电的预测精度。文献[142]提出一种基于深度学习的日前光伏发电量预测方法,利用剩余卷积网络和密集卷积网络作为预测的核心模型对光伏发电量进行日前预测降低不确定性。

循环神经网络能捕获时间顺序上前后输出的相关性,风光电和负荷预测都具有明显的时间属性,所以能对其进行有效预测。但是由于循环神经网络具有长程依赖,所以仅适用于短期电力系统预测。文献[143-144]通过设计长短时记忆循环神经网络,对可再生能源发电和负荷分别进行预测,减少了预测误差。

智能预测方法能够利用大数据和人工智能技术提高预测准确性和效率,但是对数据质量和模型复杂度的要求较高,可解释性差,这对模型的选取以及参数调整提出了更高的要求。

6 高比例可再生能源接入下的信息化与智能化问题

传统配电系统的电力网络与信息网络相互独立,电力网负责能源传输,而信息网则用于监测、控制和管理电力系统的运行。然而由于风光等可再生能源分布不均、不确定性和波动性较大,大量的智能控制设备频繁的访问与信息交互,导致“双高”配电系统信息层与物理层深度融合,系统中网络层次结构、信息环境复杂程度以及受到信息攻击的概率均大幅提高。这需要考虑更为合理的通信方式并对其进行隐私保护。

6.1 “双高”配电系统的通信问题

我国的地理环境复杂性、显著的气候差异、不均匀的资源分布以及不平衡的经济发展状态,决定了可再生能源在“双高”配电系统中的分布分散,以及源、荷、储之间地理位置分布的不均衡性,进而直接导致通信网络复杂度增加和通信可靠性降低,需要先进的通信方式以实现设备之间的信息交流,保证系统的稳定运行和优化控制。

6.1.1 “双高”配电系统的通信

“双高”配电系统的源、荷、储分散分布的特性决定了其需要适应不同场景的通信技术来实现信息交互。其中,针对近距离设备之间的通信,采用无线局域网或 Zigbee 等近距离无线通信技术,而针对场站间的远程大数据量通信则采用长距离低功耗射频通信、窄带物联网以及 5G 通信技术,实现准确快速的通信^[145]。采用先进的信息传输技术

技术,可以实现智能化数据调控和远程控制。

6.1.2 “双高”配电系统的信息处理

“双高”配电系统的信息处理技术主要分为数据预处理技术、数据压缩技术以及数据融合与挖掘技术^[146]。其中,前端预处理技术主要包括数据清洗、数据补全、数据归约转换等^[147]。通过数据预处理,可以提高数据质量,减少噪声和冗余信息,从而提高后续数据分析和决策的准确性和效率。

由于前端数据采样频率增高,海量数据将对传输通道和后端信息处理造成巨大冲击。通过数据压缩能在保证信息不丢失的前提下有效减轻中后端的数据传输与处理压力。常见方法有差分编码、离散余弦变换^[148]、自适应采样^[149]等。与数据压缩不同,数据融合与挖掘技术将数据通过数学方法整合并提取特征,进而根据特征进行决策。常见方法有特征提取^[150]、数据降维^[151]、聚类分析等^[152]。

6.2 “双高”配电系统的隐私保护问题

传统配电系统使用专用通信网络来进行监控、控制和数据传输,这种网络是封闭的,与外部网络隔离。然而,随着信息技术的发展和电力系统智能化的推进,“双高”配电系统需要考虑与外部网络进行连接,以实现远程监控、远程操作和数据共享等功能。在这种情况下,需要严格的安全措施来保护电力系统免受网络攻击和恶意行为的影响。本节将介绍“双高”配电系统的隐私保护策略。

6.2.1 攻击前防御策略

攻击前防御是指在系统遭受潜在威胁之前采取的预防性措施,旨在识别和缓解安全风险,提高

系统的整体安全性。文献[153]针对智能化设备接入新型电力系统时的通信授权问题,提出一种基于会话启动协议的低熵共享密码体制。文献[154]提出网络物理协同态势感知和主动防御的概念,以提高信息物理系统的防御能力。

6.2.2 攻击中防御策略

攻击中防御是指在系统遭受实际攻击时采取的应对措施,以最小化攻击造成的损失和影响。文献[155]提出一种通过随机选择用于状态估计的传感器来检测虚假数据注入攻击的方法。文献[156]提出一种基于统一信息物理系统的切割方法,在遭受网络攻击有效防止攻击范围扩大。

6.2.3 攻击后恢复策略

攻击后恢复是指在电力系统遭受攻击后,采取的一系列措施以修复受到损害的系統、数据和功能,确保系统尽快恢复到安全稳定的状态。文献[157]提出一种基于生成对抗网络的针对虚假数据注入攻击后的恢复方法,能够准确恢复被攻击的操纵的状态估计数据。文献[158]提出一种基于迭代优化的方法来恢复受攻击网络变量的攻击前值,以恢复受攻击网络变量真实值。

7 展望

高比例可再生能源和高比例电力电子设备给配电系统带来了更多的变化与挑战,无论是“双高”自身还是与其他系统的耦合产生的新问题都值得深入探索与研究,本文总结“双高”自身、其交叉影响、与其他能源形式互联、与信息系统耦合的新特性如图11所示。

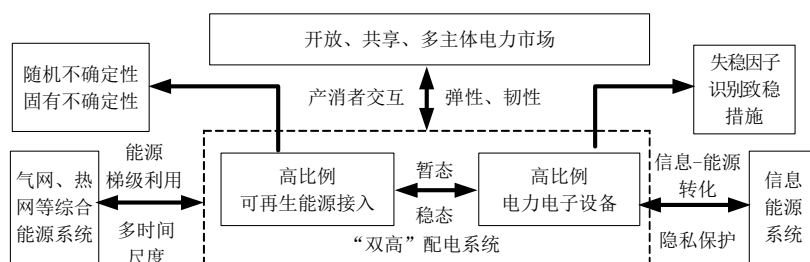


图 11 “双高”配电系统的内外在联系

Fig. 11 Internal and external connection of the "double high" distribution system

7.1 对“双高”特性自身问题的研究

“双高”特性自身存在的问题需要进一步讨论和解决。高比例电力电子设备带来的低惯量、弱阻尼的特性引起系统失稳的机理,系统失稳的主导因子识别及预防系统失稳的致稳措施仍有待研究。高比例可再生能源接入给系统注入的两种不确定性

需要分类探讨。其中,源自天气或负荷等数据量测不充分、预测方法缺陷等产生的认知不确定性,可以通过提升测量、预测的精度进行弥补,而风光和负荷自身的固有不确定性及无法完全弥补的认知不确定性则需要通过更先进的控制、优化和规划算法有针对性的进行解决。

7.2 对“双高”特性之间关联性的考虑

“双高”配电系统具有高比例电力电子设备和
高比例可再生能源接入的两大特性，二者之间具有
紧密联系。一般来说，高比例电力电子设备和高比
例可再生能源接入对应的是系统的暂态和稳态特
性。但是，电力电子设备的低惯性也会导致系统的
静态稳定性下降，其电压电流反特性影响系统整体
的电压调节特性；而可再生能源出力不确定导致的
直流侧的能量不稳也会导致系统宽频振荡谐振点
发生变化。然而“双高”配电系统的实际运行中更
为常见的是暂态稳态之间的过渡状态，该状态下系
统存在小幅度等幅振荡，严重影响系统供电电能质
量。因此，如何有机地结合可再生能源发电的不确
定性、电力电子设备的快速性，并深入研究暂稳态
之间的过渡状态是当下亟需解决的问题。

7.3 “双高”配电系统与其他能源系统的耦合

近年来，国家能源局推进多能互补集成优化示
范工程建设^[159]，建立了一批如广东大亚湾、乌鲁木
齐经济开发区、山东烟台龙口示范区等多能互补示
范工程，带动相关研究的数量增多，通过电网、气
网和热网之间的能量转移与转化是实现系统可再生
能源消纳的有效手段。虽然相较于电能，气热等能
源品质较低，从能源经济性角度来看并非最优，但
是其通过管道传输时本身具有的能量存储特性和天
然惯性，有利于减弱“双高”带来的低惯性、高不
确定性问题。在系统运行过程中可以通过电-气-热耦
合，将可再生能源发出的间歇性电能转化为其他形
式的能源进行存储和利用，以实现可再生能源的高
效消纳。综合能源系统的惯性、阻尼以及时间尺度、
不确定性等特性相较于传统电力系统差距较大，需
要从多能角度对上述特性进行深入分析，建立不同
能源耦合、不同时间尺度下的模型，探讨综合能源
系统下的稳定机理以及不确定性管理方法。

7.4 “双高”配电系统中的信息-能源耦合机制

当下，能源革命与数字革命稳步推进，信息系
统和实际能源系统的融合建模一直是电力系统研
究热点之一，国内外纷纷建立信息-能源融合的示范
工程，如国网智能调度示范工程^[160]、美国智能电
网示范项目、日本智能能源微网示范工程等^[162]。
高比例电力电子设备、高比例可再生能源接入带来
的问题本质是更多不确定性信息注入，系统的能量
的产生、存储以及消耗都伴随着信息的产生和传
播，对系统带来潜在的影响。通过对这些信息合理

采集、量测、计算、分析，将增强对系统的了解程
度，进而指导系统的稳定安全运行。在此基础上，
随着系统的信息-能源耦合程度提高，还应当对系统
的隐私保护，虚假数据注入等信息对于能源系统安
全运行反向影响的问题高度关注，构建安全可靠
的信息能源系统。

7.5 “双高”配电系统的储能

随着用户负荷的迅速增长，分布式电源以及电
动汽车大量接入配电网，配电系统难以做到高效精
准的调峰调频以及解决不同时间尺度的能量平衡
问题。通过网改进行增容补点的传统储能解决方案
因存在固有时间周期且投资经济性有限而难以适
用，于是分布式储能以其灵活机动、且可根据台区
负载情况进行功率补偿并有效缓解配变临时性过
载等优点而得到广泛应用^[161]。目前，如何应用分
布式储能与物联网技术弥补传统储能的困境是亟
待解决的问题。

7.6 更加开放、共享、多主体市场化的电力系统

从 2022 年开始，全国统一电力市场体系启动
建设，具有中国特色的电力中长期、辅助服务市场
机制和规则体系全面建立，广东、蒙西、四川、甘
肃、山东、山西 6 个电力现货试点地区进入长周期
结算试运行，上海、江苏、安徽、辽宁、河南、湖
北已全部启动模拟试运行^[162]。在电力体制不断深
入改革的背景下，我国电力现货市场建设正在持续
稳步推进。未来在“双高”配电系统中，应构建更
加开放、共享、多主体市场化的架构，以推动电力
行业向更加灵活和可持续发展的方向发展。一方面，
市场化的配电系统将为各类能源提供平等竞争的
机会，促使太阳能、风能等更好地融入电力系统。
通过建立开放市场机制，能源生产者和消费者之间
的交互将更为直接和高效，从而激励更多创新和投
资于可再生能源技术。另一方面，电力系统市场化
将促进能源储存以及电制热、电制冷技术的发展。
通过市场化的机制，电动汽车等弹性储能设备可以
更灵活地参与市场，这也将为电力系统提供更大的
弹性，更好地应对突发的需求波动和能源供应不足
的挑战。总的来说，开放和多主体市场结构将为可
持续能源的发展、能源存储技术的创新以及电力系
统的弹性提供更加坚实的基础，为未来的能源转型
奠定良好的发展基础。

8 结论

“双高”配电系统是实现双碳目标的关键环

节,无论是高比例电力电子设备还是高比例可再生能源接入都给系统的稳定、经济、环保运行带来了巨大挑战。本文以其时空尺度为主线,探讨了“双高”问题的起源、表现形式及解决办法,归纳了“双高”配电系统面临的问题以及产生机理,并从“双高”配电系统的低惯性和弱阻尼现象以及系统的控制、优化等方面进行了综述,总结了目前主流的解决方法,展望了未来“双高”配电系统有待进一步研究的内容和方向。

参考文献

- [1] CARLEY S, KONISKY D M. The justice and equity implications of the clean energy transition[J]. *Nature Energy*, 2020, 5(8): 569-577.
- [2] 新华网. 中国光伏企业的全球化思考[EB/OL]. 北京: 中华人民共和国国务院新闻办公室, (2023-11-06) [2024-03-20]. https://www.nea.gov.cn/2023-11/06/c_1310748989.htm.
- [3] 中国电力企业联合会. 国家能源集团可再生能源装机容量突破1亿千瓦[EB/OL]. 北京: 中国电力企业联合会, (2023-10-13)[2023-03-20]. <https://www.cec.org.cn/detail/index.html?3-325711>.
- [4] 国家发展和改革委员会能源研究所. 2022 年度全国可再生能源电力发展监测评价报告[R]. 北京: 国家能源局, 2023. http://zfxxgk.nea.gov.cn/2023-09/07/c_1310741874.htm.
- [5] 经济参考报. 推动能源转型 关注绿色未来[EB/OL]. 北京: 中华人民共和国国务院新闻办公室, (2023-10-27) [2023-03-20]. https://www.nea.gov.cn/2023-10/27/c_1310747689.htm.
- [6] 钱赫. 《新时代的中国绿色发展》白皮书(全文)[EB/OL]. 北京: 中华人民共和国国务院新闻办公室, (2023-1-19)[2023-03-20]. http://www.scio.gov.cn/zfbps/zfbps_2279/202303/t20230320_707649.html.
- [7] 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): 1-11.
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): 1-11(in Chinese).
- [8] 谢小荣, 贺静波, 毛航银, 等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(2): 461-474.
XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(2): 461-474(in Chinese).
- [9] 孙秋野, 隋政麒, 王睿, 等. “双高”电力系统非经典稳定性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(S1): 1-13.
SUN Qiuye, SUI Zhengqi, WANG Rui, et al. Non-classical stability analysis of power system with high shares of renewables and power electronics [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(S1): 1-13(in Chinese).
- [10] 黎博, 陈民铀, 钟海旺, 等. 高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(2): 555-580.
LI Bo, CHEN Minyou, ZHONG Haiwang, et al. A review of long-term planning of new power systems with large share of renewable energy[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(2): 555-580(in Chinese).
- [11] SHANER M R, DAVIS S J, LEWIS N S, et al. Geophysical constraints on the reliability of solar and wind power in the United States[J]. *Energy & Environmental Science*, 2018, 11(4): 914-925.
- [12] 徐潇源, 王晗, 严正, 等. 能源转型背景下电力系统不确定性及应对方法综述[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(16): 2-13.
XU Xiaoyuan, WANG Han, YAN Zheng, et al. Overview of power system uncertainty and its solutions under energy transition[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(16): 2-13(in Chinese).
- [13] 马宁宁, 谢小荣, 唐健, 等. “双高”电力系统宽频振荡广域监测与预警系统[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2021, 61(5): 457-464.
MA Ningning, XIE Xiaorong, TANG Jian, et al. Wide-area measurement and early warning system for wide-band oscillations in “double-high” power systems [J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2021, 61(5): 457-464(in Chinese).
- [14] 刘乐艺, 王圣婴. 国家电网积极推动储能产业发展 “超级充电宝” 助建新型能源体系[EB/OL]. 北京: 国家能源局, (2023-5-26)[2024-03-26]. https://www.nea.gov.cn/2023-05/26/c_1310722150.htm.
- [15] LI Qiang, REN Bixing, LV Zhenyu, et al. Influence of high proportion of renewable energy on the inertia level of bulk power system[C]//*Proceedings of 2021 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC)*. Nanjing, China: IEEE, 2021: 671-676.
- [16] CHASSIN D P, HUANG Zhenyu, DONNELLY M K, et al. Estimation of WECC system inertia using observed frequency transients[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2005, 20(2): 1190-1192.
- [17] FERNÁNDEZ-GUILLAMÓN A, GÓMEZ-LÁZARO E, MULJADI E, et al. Power systems with high renewable energy sources: a review of inertia and frequency control

- strategies over time[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115: 109369.
- [18] AZIZIPANAH-ABARGHOOEE R, MALEKPOUR M, PAOLONE M, et al. A new approach to the online estimation of the loss of generation size in power systems [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(3): 2103-2113.
- [19] TRANSTRUM M K, SARIĆ A T, STANKOVIĆ A M. Information geometry approach to verification of dynamic models in power systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(1): 440-450.
- [20] PANDA R K, MOHAPATRA A, SRIVASTAVA S C. Online estimation of system inertia in a power network utilizing Synchrophasor measurements[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(4): 3122-3132.
- [21] 李世春, 黄森焰, 李惠子, 等. 考虑厂用旋转负荷贡献的发电厂惯量修正估计[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(18): 61-71.
LI Shichun, HUANG Senyan, LI Huizi, et al. Correction estimation of the inertia of a power plant considering the contribution of rotating load[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(18): 61-71(in Chinese).
- [22] ZHANG Yingchen, BANK J, WAN Y H, et al. Synchrophasor measurement-based wind plant inertia estimation[C]//*Proceedings of 2013 IEEE Green Technologies Conference*. Denver, CL, USA: IEEE, 2013: 494-499.
- [23] TIAN Xinshou, WANG Weisheng, CHI Yongning, et al. Virtual inertia optimisation control of DFIG and assessment of equivalent inertia time constant of power grid[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2018, 12(15): 1733-1740.
- [24] MAKOLO P, ZAMORA R, LIE T T. Online inertia estimation for power systems with high penetration of RES using recursive parameters estimation[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2021, 15(12): 2571-2585.
- [25] SCHMITT A, LEE B. Steady-state inertia estimation using a neural network approach with modal information[C]//*Proceedings of 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting*. Chicago, IL, USA: IEEE, 2017.
- [26] YANG Deyou, WANG Bo, MA Jin, et al. Ambient-data-driven modal-identification-based approach to estimate the inertia of an interconnected power system[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 118799-118807.
- [27] SCHMITT A, LEE B. Steady-state inertia estimation using a neural network approach with modal information[C]//*Proceedings of 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting*. Chicago, IL, USA: IEEE, 2017.
- [28] TAVAKOLI M R B, POWER M, RUTLEDGE L, et al. Load inertia estimation using white and grey-box estimators for power systems with high wind penetration [J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2012, 45(21): 399-404.
- [29] 曾辉, 苏安龙, 葛延峰, 等. 考虑负荷特性的区域电网在线转动惯量快速估计算法[J]. *电网技术*, 2023, 47(2): 423-434.
ZENG Hui, SU Anlong, GE Yanfeng, et al. Fast estimation algorithm for on-line moment of inertia of regional power grid considering load characteristics[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(2): 423-434(in Chinese).
- [30] SCHIFFER J, ARISTIDOU P, ORTEGA R. Online estimation of power system inertia using dynamic regressor extension and mixing[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(6): 4993-5001.
- [31] 庞彦娟, 胡平. 河北建成首个兆瓦级新型电力系统示范工程[N]. *中国能源报*, 2022-06-13(22).
PANG Yanjuan, HU Ping. Hebei Province has built its first MW level demonstration project for a new power system[N]. *China Energy News*, 2022-06-13(22)(in Chinese).
- [32] 杨帆. 具备虚拟同步机功能的新能源电站在河北建成投运[EB/OL]. 北京: 国务院办公厅, (2017-12-27) [2024-03-26]. https://www.gov.cn/xinwen/2017-12/27/content_5250835.htm.
- [33] 郭强, 李志强. 同步调相机发展综述[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(15): 6050-6063.
GUO Qiang, LI Zhiqiang. Summarization of synchronous condenser development[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(15): 6050-6063(in Chinese).
- [34] 王丹, 张甜甜, 吴嘉禾, 等. 大规模压缩空气储能系统发电方式与运行控制分析与构想[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(24): 13-22.
WANG Dan, ZHANG Tiantian, WU Jiahe, et al. Analysis and conception of power generation mode and operation control of large-scale compressed air energy storage system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(24): 13-22(in Chinese).
- [35] 赵志高, 杨建东, 董旭柱, 等. 基于动态实验的双馈抽水蓄能机组空载特性与变速演化[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(20): 7439-7450.
ZHAO Zhibao, YANG Jiandong, DONG Xuzhu, et al. No-load characteristics and variable speed evolution of doubly-fed pumped storage unit based on dynamic experiment platform[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(20): 7439-7450(in Chinese).
- [36] 洪烽, 贾欣怡, 梁璐, 等. 面向风电场频率支撑的混合储能层次化容量优化配置[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(14): 5596-5606.
HONG Feng, JIA Xinyi, LIANG Lu, et al. Hierarchical capacity optimization configuration of hybrid energy storage for wind farm frequency support[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(14): 5596-5606(in Chinese).
- [37] BECK H P, HESSE R. Virtual synchronous machine [C]//*Proceedings of 2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*. Barcelona,

- Spain: IEEE, 2007: 1-6.
- [38] MACHOWSKI J, BIALEK J W, BUMBY J R. Power system dynamics and stability[M]. Chichester: Wiley, 1997.
- [39] KIMBARK E W. Power system stability volume III synchronous machines[M]. New York: Wiley, 1956.
- [40] TAMRAKAR U, SHRESTHA D, MAHARJAN M, et al. Virtual inertia: current trends and future directions [J]. Applied Sciences, 2017, 7(7): 654.
- [41] D' ARCO S, SUUL J A. Virtual synchronous machines-classification of implementations and analysis of equivalence to droop controllers for microgrids[C]// Proceedings of 2013 IEEE Grenoble Conference . Grenoble: IEEE, 2013: 1-7.
- [42] MARINELLI M, MARTINENAS S, KNEZOVIC K, et al. Validating a centralized approach to primary frequency control with series-produced electric vehicles[J]. Journal of Energy Storage, 2016, 7: 63-73.
- [43] 王睿, 孙秋野, 马大中, 等. 微网中分布式电源锁相环建模及其稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(24): 7338-7348.
- WANG Rui, SUN Qiuye, MA Dazhong, et al. Modeling and stability analysis of distributed generation phase locked loop in microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7338-7348(in Chinese).
- [44] 张东辉, 陈新. 基于阻抗视角的新能源发电系统宽频振荡抑制技术综述[J/OL]. 中国电机工程学报, 1-20 [2024-01-04]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231365>.
- ZHANG Donghui, CHEN Xin. Overview of broadband oscillation mitigation of new energy generation power system based on impedance perspective[J]. Proceedings of the CSEE, 1-20[2024-01-04]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231365>(in Chinese).
- [45] 王亮, 谢小荣, 姜齐荣, 等. 大规模双馈风电场次同步谐振的分析与抑制[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(22): 26-31.
- WANG Liang, XIE Xiaorong, JIANG Qirong, et al. Analysis and mitigation of SSR problems in large-scale wind farms with doubly-fed wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(22): 26-31(in Chinese).
- [46] 谢小荣, 刘华坤, 贺静波, 等. 直驱风机风电场与交流电网相互作用引发次同步振荡的机理与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2366-2372.
- XIE Xiaorong, LIU Huakun, HE Jingbo, et al. Mechanism and characteristics of subsynchronous oscillation caused by the interaction between full-converter wind turbines and AC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2366-2372(in Chinese).
- [47] SUN Jian. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3075-3078
- [48] SONG Yipeng, WANG Xiongfei, BLAABJERG F. Impedance-based high-frequency resonance analysis of DFIG system in weak grids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(5): 3536-3548.
- [49] LIU Huakun, XIE Xiaorong, ZHANG Chuanyu, et al. Quantitative SSR analysis of series-compensated DFIG-based wind farms using aggregated RLC circuit mode[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(1): 474-483.
- [50] WANG Xiongfei, BLAABJERG F, LOH P C. Passivity-based stability analysis and damping injection for multi-paralleled voltage-source converters with LCL filters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(11): 8922-8935.
- [51] CANAY I M. A novel approach to the torsional interaction and electrical damping of the synchronous machine part I: theory[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, PAS-101(10): 3630-3638.
- [52] CANAY I M. A novel approach to the torsional interaction and electrical damping of the synchronous machine part II: application to an arbitrary network[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, PAS-101(10): 3639-3647.
- [53] TABESH A, IRAVANI R. Frequency-response analysis of torsional dynamics[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3): 1430-1437.
- [54] 徐政. 复转矩系数法的适用性分析及其时域仿真实现[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 1-4.
- XU Zheng. The complex torque coefficient approach's applicability analysis and its realization by time domain simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 1-4(in Chinese).
- [55] HU Jiabing, WANG Bo, WANG Weisheng, et al. On small signal dynamic behavior of DFIG-based wind turbines during riding through symmetrical faults in weak AC grid[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(2): 720-730.
- [56] HU Jiabing, HUANG Yunhui, WANG Dong, et al. Modeling of grid-connected DFIG-based wind turbines for DC-link voltage stability analysis[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(4): 1325-1336.
- [57] 邵冰冰, 赵峥, 肖琪, 等. 多直驱风机经柔直并网系统相近次同步振荡模式参与因子的弱鲁棒性分析[J]. 电工技术学报, 2023, 38(3): 754-769.
- SHAO Bingbing, ZHAO Zheng, XIAO Qi, et al. Weak robustness analysis of close subsynchronous oscillation modes' participation factors in multiple direct-drive wind turbines with the VSC-HVDC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(3): 754-769(in Chinese).
- [58] 李雪, 于洋, 姜涛, 等. 基于最优变量投影的电力系统

- 主导振荡参数综合辨识[J]. 电工技术学报, 2022, 37(1): 165-178.
- LI Xue, YU Yang, JIANG Tao, et al. Estimating dominant oscillation characteristics from measurement responses in power systems utilizing optimized variable projection [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(1): 165-178(in Chinese).
- [59] 邵冰冰, 向念文, 王书来, 等. 电力系统广义模式谐振分类及研究现状[J/OL]. 中国电机工程学报, 1-15 [2023-11-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20230919.1225.006.html>.
- SHAO Bingbing, XIANG Nianwen, Wang Shulai, et al. Classification and research status of power system generalized modal resonance[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 1-15[2023-11-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20230919.1225.006.html>(in Chinese).
- [60] 徐光虎, 苏寅生, 孙衢, 等. 基于特征值分析法的 PSS 最佳安装地点的确定[J]. 继电器, 2004, 32(8): 1-4.
- XU Guanghu, SU Yinsheng, SUN Qu, et al. Identification of PSS optimum location based on eigenvalue analysis method[J]. Relay, 2004, 32(8): 1-4(in Chinese).
- [61] 高本锋, 刘培鑫, 刘王锋, 等. 直驱风电场并网对火电机组次同步谐振影响[J]. 电工技术学报, 39(11): 3308-3322.
- GAO Benfeng, LIU Peixin, LIU Wangfeng, et al. Influence of grid connected DirectDrive wind farm on subsynchronous resonance of thermal power units [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 39(11): 3308-3322(in Chinese).
- [62] 韦化, 龙丹丽, 黎静华. 求解大规模机组组合问题的策略迭代近似动态规划[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4420-4429.
- WEI Hua, LONG Danli, LI Jinghua. Policy iteration-approximate dynamic programming for large scale unit commitment problems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4420-4429(in Chinese).
- [63] 国家电网. 国家电网报: 柔性低频交流输电从技术创新走向工程应用[EB/OL]. 北京: 国网智能电网研究院有限公司, (2023-08-10)[2024-03-26]. <http://www.geiri.sgcc.com.cn/html/geiri/gb/xwzx/mtzx/20230905/874126202309051347000001.shtml>.
- [64] 人民日报. 智能电网, 提供强劲电力支撑[EB/OL]. 北京: 中华人民共和国国务院新闻办公室, (2022-08-04)[2024-03-26]. https://www.gov.cn/xinwen/2022-08/04/content_5704179.htm.
- [65] 李生虎, 于新钰, 华玉婷, 等. 基于 DFIG 无功出力灵敏度的电网弱阻尼模式抑制[J]. 高电压技术, 2022, 48(4): 1356-1364.
- LI Shenghu, YU Xinyu, HUA Yuting, et al. Suppression to power system in weakly damped modes based on sensitivity to reactive output of DFIG[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(4): 1356-1364(in Chinese).
- [66] 衣立东, 马宁宁, 丁茂生, 等. 新型电力系统宽频振荡“三道防线”体系架构[J]. 电网技术, 2023, 47(10): 4092-4101.
- YI Lidong, MA Ningning, DING Maosheng, et al. Framework of prevention and control system for wide-band oscillations in new-type power systems[J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 4092-4101(in Chinese).
- [67] KE Xinhua, BUCHMANN B. EP 3847743 B1 Current control for passivity of a power converter[P]. 2022-07-27.
- [68] WANG Fei, DUARTE J L, HENDRIX M A M, et al. Modeling and analysis of grid harmonic distortion impact of aggregated DG inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3): 786-797.
- [69] YAO Wei, JIANG Lin, WEN Jinyu, et al. Wide-area damping controller of FACTS devices for inter-area oscillations considering communication time delays [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1): 318-329.
- [70] 胡鹏, 艾欣, 肖仕武, 等. 静止无功发生器序阻抗建模及对次同步振荡影响因素的分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(17): 3703-3713.
- HU Peng, AI Xin, XIAO Shiwu, et al. Sequence impedance of static var generator and analysis of influencing factors on subsynchronous oscillation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(17): 3703-3713(in Chinese).
- [71] ZHOU Leming, WU Wenhua, CHEN Yandong, et al. Virtual positive-damping reshaped impedance stability control method for the offshore MVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(5): 4951-4966.
- [72] 陈鹏伟, 姜文伟, 阮新波, 等. 直流配电系统有源阻尼控制的阻抗释义与谐振点灵敏度参数调节方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(19): 6616-6629.
- CHEN Pengwei, JIANG Wenwei, RUAN Xinbo, CHEN Xin. Impedance explanation and resonance point sensitivity-based parameter design method of active damping applied to DC distribution system [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(19): 6616-6629(in Chinese).
- [73] WANG Liang, XIE Xiaorong, JIANG Qirong, et al. Investigation of SSR in practical DFIG-based wind farms connected to a series-compensated power system [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2772-2779.
- [74] ZHAO Boyang, WANG Xifan, WANG Xiuli, et al. Upgrading transmission capacity by altering HVAC into fractional frequency transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(5): 3855-3862.
- [75] LI Yang, SHUAI Zhikang, LIU Xuan, et al. Stability analysis and location optimization method for

- multiconverter power systems based on nodal admittance matrix[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(1): 529-538.
- [76] CHANDORKAR M C, DIVAN D M, ADAPA R. Control of parallel connected inverters in standalone AC supply systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1993, 29(1): 136-143.
- [77] BAHRANI B, SAEEDIFARD M, KARIMI A, et al. A multivariable design methodology for voltage control of a single-DG-unit microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(2): 589-599.
- [78] WANG Rui, SUN Qiuye, GUI Yonghao, et al. Exponential-function-based droop control for islanded microgrids[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(4): 899-912.
- [79] QIN Deha, SUN Qiuye, WANG Rui, et al. Adaptive bidirectional droop control for electric vehicles parking with vehicle-to-grid service in microgrid[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 6(4): 793-805.
- [80] ZHANG Liang, ZHENG Hao, CAI Guowei, et al. Power - frequency oscillation suppression algorithm for AC microgrid with multiple virtual synchronous generators based on fuzzy inference system[J]. IET Renewable Power Generation, 2022, 16(8): 1589-1601.
- [81] LIU Jia, MIURA Y, BEVRANI H, et al. Enhanced virtual synchronous generator control for parallel inverters in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(5): 2268-2277.
- [82] MORALES-PAREDES K, BONALDO J P, POMILIO J A. Centralized control center implementation for synergistic operation of distributed multifunctional single-phase grid-tie inverters in a microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(10): 8018-8029.
- [83] MA Tan, CINTUGLU M H, MOHAMMED, O. Control of hybrid AC/DC microgrid involving energy storage, renewable energy and pulsed loads[C]//Proceedings of 2015 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. Addison, TX, USA: IEEE: 1-8.
- [84] ZHAO Jinxin, DÖRFLER, F. Distributed control and optimization in DC microgrids[J]. Automatica, 2015, 61: 18-26.
- [85] ZHOU Quan, TIAN Zhen, SHAHIDEHPOUR M, et al. Optimal consensus-based distributed control strategy for coordinated operation of networked microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 35(3): 2452-2462.
- [86] ZHOU Jianguo, ZHANG Huaguang, SUN Qiuye, et al. Event-based distributed active power sharing control for interconnected AC and DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6815-6828.
- [87] SHAHAB M A, MOZAFARI B, SOLEYMANI S, et al. Distributed consensus-based fault tolerant control of islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(1): 37-47.
- [88] 杨泽斌, 许婷, 孙晓东, 等. 基于 BPNN 的无轴承异步电机传感器故障诊断及容错控制[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(11): 4218-4226.
- YANG Zebin, XU Ting, SUN Xiaodong, et al. Sensor fault diagnosis and fault-tolerant control of a bearingless induction motor based on BPNN[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(11): 4218-4226(in Chinese).
- [89] GE Pudong, CHEN Boli, TENG Fei. Cyber-resilient self-triggered distributed control of networked microgrids against multi-layer DoS attacks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(4): 3114-3124.
- [90] WANG Bingyu, SUN Qiuye, HAN Renke, et al. Consensus-based secondary frequency control under denial-of-service attacks of distributed generations for microgrids[J]. Journal of the Franklin Institute, 2021, 358(1): 114-130.
- [91] LU Runzhao, DING Tao, QIN Boyu, et al. Multi-stage stochastic programming to joint economic dispatch for energy and reserve with uncertain renewable energy [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 1140-1151.
- [92] PAPAVALIOU A, MOU Y, CAMBIER L, et al. Application of stochastic dual dynamic programming to the real-time dispatch of storage under renewable supply uncertainty[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(2): 547-558.
- [93] 季峰, 蔡兴国, 岳彩国. 含风电场电力系统的模糊鲁棒优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4791-4798.
- JI Feng, CAI Xingguo, YUE Caiguo. Fuzzy robust dispatch for power systems with wind farms [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4791-4798(in Chinese).
- [94] MANSOURIS A, AHMARINEJAD A, NEMATBAKHS E, et al. Energy management in microgrids including smart homes: a multi-objective approach[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 69: 102852.
- [95] CHEN Chun, WANG Feng, ZHOU Bin, et al. An interval optimization based day-ahead scheduling scheme for renewable energy management in smart distribution systems[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 106: 584-596.
- [96] YANG Dongfeng, ZHANG Chengxin, JIANG Chao, et al. Interval method based optimal scheduling of regional multi-microgrids with uncertainties of renewable energy [J]. IEEE Access, 2021, 9: 53292-53305.
- [97] BJØRNEBYE H, HAGEM C, LIND A. Optimal location of renewable power[J]. Energy, 2018, 147: 1203-1215.
- [98] LI Qingtao, WANG Jianxue, ZHANG Yao, et al. Multi-period generation expansion planning for

- sustainable power systems to maximize the utilization of renewable energy sources[J]. Sustainability, 2020, 12(3): 1083.
- [99] ZHONG, Haiwang, ZHANG Guanglun, TAN Zhenfei, et al. Hierarchical collaborative expansion planning for transmission and distribution networks considering transmission cost allocation[J]. Applied Energy, 2022, 307: 118147.
- [100] SEDGHI M, AHMADIAN A, ALIAKBAR-GOLKAR M. Optimal storage planning in active distribution network considering uncertainty of wind power distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 304-316.
- [101] 青珂. 计及不确定性的可再生能源系统规划与运行优化研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
- QING Ke. Research on the planning and operation optimization of renewable energy system considering uncertainty[D]. University of Electronic Science and Technology of China, 2023(in Chinese).
- [102] KUMAR J, AGARWAL A, SINGH N. Design, operation and control of avast DC mienergy sources [J]. Renew. Energy Focus, vol. 34, pp. 17-36, Sep. 2020.
- [103] LI Junxian, HU Weihao, WU Xiawei, et al. Cable connection optimization for onshore wind farms considering restricted area and topography[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(3): 3082-3092.
- [104] SEDGHI M, AHMADIAN A, ALIAKBAR-GOLKAR M. Optimal storage planning in active distribution network considering uncertainty of wind power distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 304-316.
- [105] ZHUANG Yan, XU Jie, YUAN Hui, et al. Research on informatization construction of electric power communication network under smart grid[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 632: 042090.
- [106] WANG Bingyu, SUN Qiuye, HAN Renke, et al. Consensus-based secondary frequency control under denial-of-service attacks of distributed generations for microgrids[J]. Journal of the Franklin Institute, 2021, 358(1): 114-130.
- [107] LU Xinhui, LI Haobin, ZHOU Kaile, et al. Optimal load dispatch of energy hub considering uncertainties of renewable energy and demand response[J]. Energy, 2023, 262: 125564.
- [108] RUPAM MAHMOOD A, VAN HASSELT H, Sutton R S. Weighted importance sampling for off-policy learning with linear function approximation[C]//Proceedings of the 27th International Conference on Neural Information Processing Systems. Montreal: MIT Press, 2014, 27.
- [109] PEYGHAMI M R, HAFSHEJANI S F, SHIRVANI L. Complexity of interior-point methods for linear optimization based on a new trigonometric kernel function[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2014, 255: 74-85.
- [110] VARAGNOLO D, ZANELLA F, CENEDESE A, et al. Newton-Raphson consensus for distributed convex optimization[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2016, 61(4): 994-1009.
- [111] DA SILVA I C, CARNEIRO S, DE OLIVEIRA E J, et al. A heuristic constructive algorithm for capacitor placement on distribution systems[J]. IEEE transactions on power systems, 2008, 23(4): 1619-1626.
- [112] HOSSEINI S M, CARLI R, DOTOLI M. Robust optimal energy management of a residential microgrid under uncertainties on demand and renewable power generation[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2021, 18(2): 618-637.
- [113] MANSOURI S A, AHMARINEJAD A, ANSARIAN M, et al. Stochastic planning and operation of energy hubs considering demand response programs using Benders decomposition approach[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 120: 106030.
- [114] SHAO Chengcheng, WANG Xifan, SHAHIDEHPUR M, et al. An MILP-based optimal power flow in multicarrier energy systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(1): 239-248.
- [115] 林舜江, 冯祥勇, 梁炜焜, 等. 新能源电力系统不确定优化调度方法研究现状及展望[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(10): 198-215.
- LIN Shunjiang, FENG Xiangyong, LIANG Weikun, et al. Research status and prospect of uncertain optimal dispatch methods for renewable energy power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(10): 198-215(in Chinese).
- [116] 周丽红, 于浩, 李鹏, 等. 多主体市场下的园区综合能源系统随机鲁棒运行优化[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(23): 100-109.
- ZHOU Lihong, YU Hao, LI Peng, et al. Stochastic robust operation optimization for park-level integrated energy system in multi-stakeholder market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(24): 100-109(in Chinese).
- [117] YUAN Jun, YU S S, ZHANG Guidong, et al. Design and HIL realization of an online adaptive dynamic programming approach for real-time economic operations of household energy systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(1): 330-341.
- [118] SHU Jun, WU Lei, LI Zuyi, et al. A new method for spatial power network planning in complicated environments[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(1): 381-389.
- [119] KHODR H M, VALE Z A, RAMOS C. Notice of violation of IEEE publication principles: a benders

- decomposition and fuzzy multicriteria approach for distribution networks remuneration considering DG [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 1091-1101.
- [120] CELLI G, MOCCI S, PILO F, et al. Multi-year optimal planning of active distribution networks[C]//Proceedings of the 19th International Conference on Electricity Distribution. Vienna: CIRED, 2007.
- [121] GANGULY S, SAHOO N C, DAS D. Multi-objective planning of electrical distribution systems using dynamic programming[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 46: 65-78.
- [122] SHARAFI M, ELMEKKAWY T Y. Multi-objective optimal design of hybrid renewable energy systems using PSO-simulation based approach[J]. Renewable Energy, 2014, 68: 67-79.
- [123] KAMJOO A, MAHERI A, DIZQAH A M, et al. Multi-objective design under uncertainties of hybrid renewable energy system using NSGA-II and chance constrained programming[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 74: 187-194.
- [124] CARRANO E C, TAKAHASHI R H C, CARDOSO E P, et al. Optimal substation location and energy distribution network design using a hybrid GA-BFGS algorithm[J]. IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 2005, 152(6): 919-926.
- [125] SALEHI J, HAGHIFAM M R. Long term distribution network planning considering urbanity uncertainties [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 42(1): 321-333.
- [126] DU Yan, LI Fangxing. Intelligent multi-microgrid energy management based on deep neural network and model-free reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1066-1076.
- [127] FU Xueqian. Statistical machine learning model for capacitor planning considering uncertainties in photovoltaic power[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(1): 5.
- [128] ZHANG Xi, HUA Weiqi, LIU Youbo, et al. Reinforcement learning for active distribution network planning based on Monte Carlo tree search [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 138: 107885.
- [129] DEB C, ZHANG Fan, YANG Junjing, et al. A review on time series forecasting techniques for building energy consumption[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 74: 902-924.
- [130] HUANG S J, SHIH K R. Short-term load forecasting via ARMA model identification including non-Gaussian process considerations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 673-679.
- [131] PAPPAS S S, EKONOMOU L, KARAMOVSANTAS D C, et al. Electricity demand loads modeling using AutoRegressive Moving Average(ARMA) models [J]. Energy, 2008, 33(9): 1353-1360.
- [132] LEE Y S, TONG L I. Forecasting time series using a methodology based on autoregressive integrated moving average and genetic programming[J]. Knowledge-Based Systems, 2011, 24(1):66-72.
- [133] CHAKHCHOUKH Y, PANCIATICI P, MILI L. Electric load forecasting based on statistical robust methods [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 982-991.
- [134] CHEN Niya, QIAN Zheng, NABNEY I T, et al. Wind power forecasts using Gaussian processes and numerical weather prediction[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2): 656-665.
- [135] WANG Kejun, QI Xiaoxia, LIU Hongda, et al. Deep belief network based k-means cluster approach for short-term wind power forecasting[J]. Energy, 2018, 165: 840-852.
- [136] DONG Xia, SONG Deng, DONG Wang. A short-term power load forecasting method based on k-means and SVM[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2022, 13, (11): 5253-5267.
- [137] ZHAO Zhenyu, ZHANG Yao, YANG Yujia, et al. Load forecasting via Grey Model-Least Squares Support Vector Machine model and spatial-temporal distribution of electric consumption intensity[J]. Energy, 2022, 255: 124468.
- [138] ZHANG Guoqiang, GUO Jifeng. A novel method for hourly electricity demand forecasting[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(2): 1351-1363.
- [139] HE Yaoyao, YAN Yudong, XU Qifa. Wind and solar power probability density prediction via fuzzy information granulation and support vector quantile regression[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 113: 515-527.
- [140] TANG Lei, WANG Xifan, WANG Xiuli, et al. Long-term electricity consumption forecasting based on expert prediction and fuzzy Bayesian theory[J]. Energy, 2019, 167: 1144-1154.
- [141] HONG Yingyi, RIOFLORIDO C L P P. A hybrid deep learning-based neural network for 24-h ahead wind power forecasting[J]. Applied Energy, 2019, 250: 530-539.
- [142] JU Yun, SUN Guangyu, CHEN Quanhe, et al. A model combining convolutional neural network and LightGBM algorithm for ultra-short-term wind power forecasting

- [J]. IEEE Access, 2019, 7: 28309-28318.
- [143] ABDEL-NASSER M, MAHMOUD K. Accurate photovoltaic power forecasting models using deep LSTM-RNN[J]. Neural computing and applications, 2019, 31(7): 2727-2740.
- [144] KONG Weicong, DONG Zhaoyang, JIA Youwei, et al. Short-term residential load forecasting based on LSTM recurrent neural network[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 841-851.
- [145] CHEN Bo, WANG Jianhui, LU Xiaonan, et al. Networked microgrids for grid resilience, robustness, and efficiency: a review[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(1): 18-32.
- [146] 杨挺, 刘亚闯, 刘宇哲, 等. 信息物理系统技术现状分析与趋势综述[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(12): 3393-3406.
- ANG Ting, LIU Yachuang, LIU Yuzhe, et al. Review on cyber-physical system: technology analysis and trends [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2021, 43(12): 3393-3406(in Chinese).
- [147] ENG Yuhuai, JOLFAEI A, YU Keping. A novel real-time deterministic scheduling mechanism in industrial cyber-physical systems for energy internet[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(8): 5670-5680.
- [148] NASCIMENTO F A O. Hartley transform signal compression and fast power quality measurements for smart grid application[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(6): 4134-4144.
- [149] KOLAKALURI V K, AALAM M N, SARKAR V. Sampling time modulation of a photovoltaic power tracking controller based upon real-time monitoring of converter dynamics[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(2): 2822-2834.
- [150] DJENOURI Y, BELHADI A, SRIVASTAVA G, et al. Fast and accurate deep learning framework for secure fault diagnosis in the industrial internet of things [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(4): 2802-2810.
- [151] WANG Jiqian, MA Feng, BOURI E, et al. Volatility of clean energy and natural gas, uncertainty indices, and global economic conditions[J]. Energy Economics, 2022, 108: 105904.
- [152] CAO Yingping, ZHOU Bin, CHUNG C Y, et al. Dynamic modelling and mutual coordination of electricity and watershed networks for spatio-temporal operational flexibility enhancement under rainy climates [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(5): 3450-3464.
- [153] AZAD M A, BAG S, PERERA C, et al. Authentic caller: self-enforcing authentication in a next-generation network[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(5): 3606-3615.
- [154] SMITH M D, PATE-CORNELL M E. Cyber risk analysis for a smart grid: how smart is smart enough? a multiarmed bandit approach to cyber security investment [J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 2018, 65(3): 434-447.
- [155] OBATA S, KOBAYASHI K, YAMASHITA Y. Sensor scheduling-based detection of false data injection attacks in power system state estimation[J]. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 2022, E105.A(6): 1015-1019.
- [156] 杨挺, 闫鹏, 蔡绍堂, 等. 基于主动割集的电力信息物理系统饱和和防御方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 475-486.
- YANG Ting, YAN Peng, CAI Shaotang, et al. Research on saturation defense method of power cyber-physical system based on active cut set[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 475-486(in Chinese).
- [157] LI Yuancheng, WANG Yuanyuan, HU Shiyan. Online generative adversary network based measurement recovery in false data injection attacks: a cyber-physical approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(3): 2031-2043.
- [158] JORJANI M, SEIFI H, VARJANI A Y, et al. An optimization-based approach to recover the detected attacked grid variables after false data injection attack[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 5322-5334.
- [159] 中国政府网. 发展改革委 能源局关于推进多能互补集成优化示范工程建设的实施意见[R]. 北京: 发展改革委, 国家能源局, 2016.
- [160] 人民日报. 智能电网, 提供强劲电力支撑[EB/OL]. 中国政府网, (2022-08-04)[2024-03-26]. https://www.gov.cn/xinwen/2022-08/04/content_5704179.htm.
- [161] 国家能源局. 首批科技创新(储能)试点示范项目正式发布[R]. 北京: 国家能源局, 2023.
- [162] 国家能源局. 新型电力系统发展蓝皮书[R]. 北京: 国家能源局, 2023.



孙秋野

在线出版日期: 2024-08-02。

收稿日期: 2024-01-28。

作者简介:

孙秋野(1977), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为能源互联网的建模与优化运行、多能源综合互补优化、网络控制技术、分布式控制技术、分布式优化分析及其在能源互联网、微电网中的应用等, sunqiuye@mail.neu.edu.cn。

(责任编辑 邱丽萍)

Discussion on Challenges and Countermeasures of “Double High” Power Distribution System

SUN Qiuye¹, YU Xiaohan², WANG Jingao²

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology;

2. School of Information Science and Engineering, Northeastern University)

KEY WORDS: "double high" power distribution system; renewable energies; power electronics; uncertainty; spatial and temporal scale

With the increasing penetration of renewable energy sources, such as wind and solar photovoltaic, as well as power electronic devices like converters, distribution systems with "double high" characteristics are facing numerous issues and challenges. The uncertainty and variability of high-proportion renewable energy output, along with the presence of a large number of power electronic devices in control loops, introduce new problems such as low inertia and weak damping. These factors pose significant challenges to the safe operation of distribution systems. This paper begins by examining the impact of "double high" characteristics on distribution systems across different spatial and temporal scales, summarizing the challenges faced by distribution systems under the new circumstances. It analyzes the underlying mechanisms behind these emerging issues and explores existing solutions. Finally, the paper attempts to provide an outlook on the future development of "double high" distribution systems.

The overall framework of "double-high" distribution systems is shown in Fig. 1. Research on high-proportion renewable energy integration primarily focuses on the

increased system uncertainty resulting from the large-scale integration of renewable sources such as wind and solar power. This research is often centered on methods to reduce uncertainty through control, optimization, planning, and forecasting, with a focus on the steady-state processes of the system. In contrast, research on high-proportion power electronic devices emphasizes the changes in system inertia and damping caused by the large-scale integration of these devices. Current studies mainly address issues such as voltage stability, power angle stability, frequency stability, transmission capability, and absorption capability, concentrating on the transient processes of the system.

This paper explores the origins, manifestations, and solutions of "double high" issues, with a focus on their spatial and temporal scales. It summarizes the problems and mechanisms associated with "double high" distribution systems, reviews phenomena such as low inertia and weak damping, and addresses aspects of system control and optimization. The paper provides an overview of current mainstream solutions and outlines future research directions and areas for further research in "double high" distribution systems.

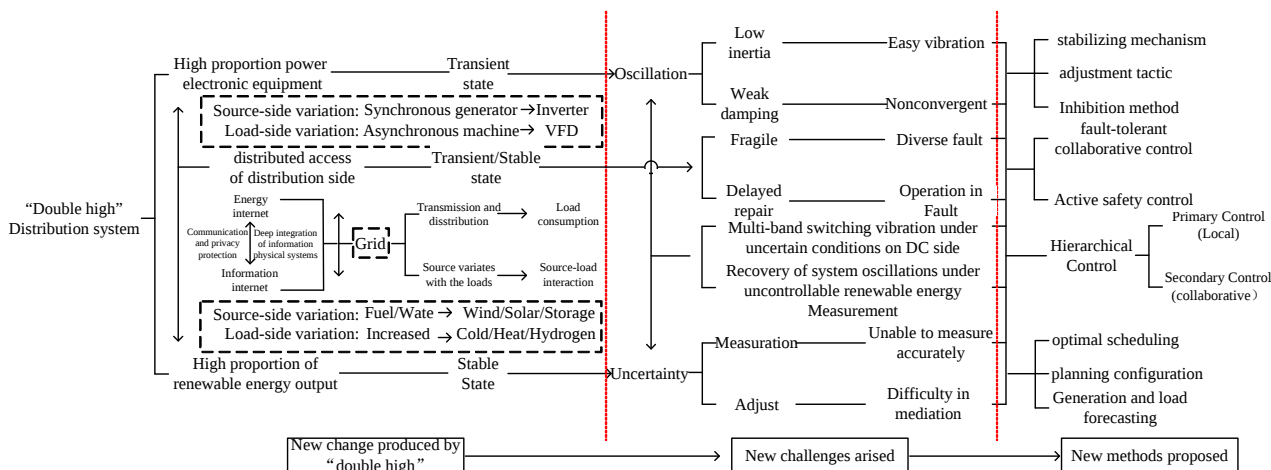


Fig. 1 Overall framework of "double-high" distribution systems