

大规模可再生能源发电友好并网与 运行调控技术研究综述*

王维庆, 李笑竹, 褚龙浩

(新疆大学 电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017)

摘要: “双碳”目标下大规模可再生能源系统的友好并网与稳定运行问题被广泛关注, 但受精确的发电不确定性建模技术与科学的并网调控策略制约。为解决这一问题, 从可再生能源发电预测与不确定性建模、可再生能源系统并网运营模式、可再生能源系统并网控制方法三个方面进行梳理和总结, 讨论了不同时间尺度下发电不确定性预测技术、针对多场景运行需求的不确定性建模技术; 从可再生能源-储能系统、可再生能源集群-独立储能系统、多能源互补系统三个角度分析总结了目前并网运营模式; 在此基础上, 分析总结了跟网型与构网型两种并网控制策略。最后展望了高比例可再生能源系统在未来电网形态演变中的发展方向, 以期为新型电力系统中可再生能源与电网协同发展的研究和技术应用提供借鉴。

关键词: 可再生能源; 友好并网; 不确定性; 运营模式; 运行调控

DOI: 10.13568/j.cnki.651094.651316.2024.01.15.0001

中图分类号: TM73 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2024)02-0129-016

引文格式: 王维庆, 李笑竹, 褚龙浩. 大规模可再生能源发电友好并网与运行调控技术研究综述[J]. 新疆大学学报(自然科学版中英文), 2024, 41(2): 129-144+156.

英文引文格式: WANG Weiqing, LI Xiaozhu, CHU Longhao. A review of research on friendly grid connection and operation control technology for large scale renewable energy generation[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2024, 41(2): 129-144+156.

A Review of Research on Friendly Grid Connection and Operation Control Technology for Large Scale Renewable Energy Generation

WANG Weiqing, LI Xiaozhu, CHU Longhao

(School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017, China)

Abstract: The field of grid-connected renewable energy systems has attracted wide attention, scientific and accurate generation uncertainty modeling technology and control strategy limit its grid-connected stability, and its inexperienced operation mode impedes its sustainable development. To this end, this paper summarizes and analyzes the uncertainty prediction and modeling analysis of renewable energy power generation, the grid-connected operation mode analysis of renewable energy systems, and the grid-connected control method analysis of renewable energy systems, and discusses the uncertainty prediction technology of power generation under different time scales and the uncertainty modeling technology for multi-scenario operation demand. From the perspectives of renewable energy-energy storage systems, renewable energy clusters-independent storage systems, and multi-energy complementary systems, this study comprehensively analyzes and summarizes the current operational models of renewable energy grid integration; Building upon this foundation, the study analyzes and summarizes network-type and structure-type operational control strategies. Furthermore, it envisions the development direction of high-proportion renewable energy systems in the future evolution of the power grid, aiming to provide insights for the research and technological applications of the coordinated development of renewable energy and the grid in novel power systems.

Key words: renewable energy; grid-connected; uncertainty; operation mode; operation regulation

* 收稿日期: 2024-01-15

基金项目: 国家自然科学基金“配置储能的新能源场站并网调控关键技术研究”(52267005),“新能源场站群集中式共享储能规划运行方法与激励机制设计”(52307108)。

作者简介: 王维庆(1959—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事大型风力发电机组关键部件研制、整机智能控制及检测、继电保护和并网送出技术的研究, E-mail: wq59@xju.edu.cn.

0 引言

在“双碳”目标的引领下,可再生能源产业飞速发展,传统电力系统逐渐向新型电力系统转变,可再生能源逐步由增量补充转换为增量主体.但随着可再生能源发电规模的不断飞速发展,电网保供与其消纳等问题日益凸显.近年来,上述问题虽有了一定程度的改善,但面临我国多年位居世界第一的可再生能源装机规模/发电量与发展风、光基地的重要举措使得电力系统继续接纳可再生能源的比例依然十分受限的问题,不能满足能源革命在保障能源安全、提高能源效率和促进可再生能源消纳等方面的要求^[1].

为此我们从可再生能源发电预测与不确定性建模分析、可再生能源系统并网运营模式分析、可再生能源系统并网控制方法分析阐述了大规模可再生能源系统并网运行调控关键技术的研究现状与面临的挑战;基于国家政策与能源互联网发展趋势,从三个角度总结了可再生能源-储能系统、可再生能源集群-独立储能系统、多能源互补系统的运营机制;结合现有研究分析总结了可再生能源系统跟网型与构网型运行控制策略;讨论了大规模可再生能源系统在未来新型电力系统动态演变中的发展方向.

1 可再生能源发电预测与不确定性建模分析

在以大规模风、光发电等可再生能源为主体的新型电力系统中,电源侧出力随机性和波动性的特征愈发明显.如何准确预测可再生能源出力并科学刻画系统的发电不确定性对电力系统的安全稳定至关重要.鉴于此,我们从预测出力与刻画发电不确定性两个维度对现有研究现状进行总结.

1.1 可再生能源发电预测

1.1.1 中长期预测

可再生能源发电的中长期预测为电网规划提供参考依据,并用于确定火电等大型传统机组的停机检修与运行计划等.长期预测数据呈单调变化、具有无周期性特征,通常利用序列法进行预测^[2].文献[3]考虑风资源的区域特征,利用长短期记忆法进行中长期风电趋势预测.文献[4]利用具有大数据样本特性的历史数据刻画风电出力的长期波动性;文献[5]在历史数据的持续功率曲线基础上构建包括风电、光伏电站群的等值输出功率模型.文献[6]利用改进的在线序列极限学习机在小数据样本特征下对光伏的中长期输出功率进行预测,使其具有学习速度快、泛化能力强的优点.文献[7]利用数据特征间的先验关系,提出一种基于图卷积神经网络(GCN)、风速差分拟合(DF)、粒子群优化算法(PSO)的中长期风功率预测模型.

上述研究虽有效提高了预测精度,为电网规划调度提供一定的理论指导.然而在工程实际中,对于新建可再生能源装机的规划往往由于缺乏历史数据使得对于发电功率的中长期预测无法直接套用短期预测的方法.文献[8]为解决常规时序法在长序列预测场景下表现较差的问题,基于Informer网络的多头注意力机制实现了序列长期依赖特征的挖掘、通过CNN模块及GRU模块分别实现了长时间序列的融合.文献[9]利用反演法得到拟规划的风电场输出功率的概率密度曲线,为在历史数据缺失下的中长期预测提供了新思路.

1.1.2 短期及超短期预测

短期及超短期预测用于安排日内系统中火电等传统机组的开停机计划与系统多类型能源的发电计划,用于日前/实时经济调度,预测数据具有明显的周期性特征,受气象信息影响明显,通常有物理预测法与统计预测法两种类型.

物理预测法^[10]原理简单,无需大量的历史数据,但在建模过程中需要详细的位置、高度信息,风光发电组件特性参数及安装信息.例如:文献[11]基于物理分析法,通过模拟太阳辐照强度的传递和光伏组件发电的物理过程实现功率超短期预测;文献[12]计及天气预报的数据质量对于预测结果的影响,提出一种基于预报数据实测数据融合的风速误差修正方法;文献[13]明确指出可再生能源发电的特殊地理环境(地形地貌复杂、地形加速效应)以及某些特定物理现象(如尾流效应、地转风、湍流强度等)通常难以被精确描述.因此,基于物理方法的短期及超短期预测针对性强、普适性较差,不适用于极端情况^[14].

统计预测法是利用历史数据进行分析,通过挖掘历史数据的周期性规律进行预测.该方法的准确度取决于历史数据的选取以及模型对功率与影响因素间映射关系的科学性^[15].目前常用方法有持续预测法^[16]与智能学习技术^[17].例如:文献[18]利用支持向量回归(Support Vector Regression, SVR)的功率预测方法,在具有小样本数据特征的学习中具有良好表现;但该方法中的间隔带为人工设定的经验值.在不同的预测场景下各类型预

测模型的适应性不同,很难利用单一模型进行有效探究.部分学者以集成学习来获得较单一模型更好的预测效果^[19].但组合优化的预测模型虽能提高精度,但却以训练效率为代价,且也易陷入局部最优或过拟合的状态.

综合上述分析,将不同时间尺度可再生能源发电功率预测的作用、数据特点、主要方法与目前存在的问题进行总结,如表1所示.

表 1 不同时间尺度可再生能源发电功率预测的对比

时间尺度	作用	数据特点	主要方法	存在问题
中长期	用于提供电网规划的基础数据,确定年度检修计划、运行方式等	呈单调变化、具有无周期性特征	序列法(线性预测模型、自回归滑动平均预测模型、马尔可夫链、灰色理论模型)	1) 历史数据缺失;无法直接套用现有短期功率波动的分析方法 2) 常规时序法在长序列预测场景下表现较差
	用于安排日开停机计划与发电计划,日前/实时经济调度	呈明显周期性特征,受气象信息影响显著	物理预测法 统计预测法	1) 精度依赖模型和参数的选择 2) 针对性较强、普适性较差,不适用于极端情况 1) 普适性较差 2) 易陷入局部最优或过拟合的状态

1.2 可再生能源发电不确定性建模方法

现有研究可再生能源发电不确定性建模方法主要归纳为:备用整定法、随机优化法、机会约束规划法与鲁棒优化法.

1.2.1 备用整定法

备用整定法通常利用N-1准则与负荷百分比准则进行整定,一般计算方式如式(1):

$$R_i = \frac{1}{3} \left(\frac{C_i}{\sum_{i=1}^N C_i} + \frac{C_i^{\max}}{\sum_{i=1}^N C_i^{\max}} + \frac{L_i^{\max}}{\sum_{i=1}^N L_i^{\max}} \right) \quad (1)$$

其中: R_i 表示区域*i*的备用容量, C_i 、 C_i^{\max} 、 L_i^{\max} 分别表示区域*i*的总装机容量、次年最大单机容量与最大电力需求预测值. N 表示所考虑区域电网的个数.

基于此,文献[20]为了实现多个运行场景下发电运行、备用成本最小的目标,提出了一种基于可靠性指标的运行备用容量协调优化模型;文献[21]计及区外受电功率按照区域备用容量应大于网内最大单机容量与峰值负荷加合的2%进行配置.上述方法在应对简单的负荷波动和机组故障时具有较好效果,但在具有复杂形态演化、源网荷多重不确定性为特点的高比例可再生能源并网的背景下较难得到可靠结果.为解决上述问题,文献[22]利用电网风险承受模型中耦合失负荷概率作为系统日前运行备用容量预留依据;文献[23]基于历史运行数据,利用峰值负荷、新能源装机容量与预测净负荷表征系统备用容量,得出由新能源预测偏差带来的备用容量经验公式.上述方法保守度较高且经验系数难以确定,使得备用压力增大,不利于资源合理配置与新能源消纳.

为应对新能源发电带来的功率不确定性,备用整定法可通过两种思路进行改进,一种是基于历史数据进行离散与聚类以此生成多类型簇来描述功率的不确定性,上述方法从本质上来看是多离散场景的随机优化方法,详细见1.2.2节分析;另一种思路是对具有随机性的新能源出力功率进行概率特性分析,从而得到多重随机变量耦合下的系统不确定变量概率密度函数,在此基础上允许系统运行约束在一定小概率值下被违背,这本质是一种机会约束规划,具体见1.2.3节分析.

1.2.2 随机优化法

随机优化依据不确定变量(可再生能源实际与预测功率误差)从服从的概率分布中生成随机场景并进行抽取,进而将连续的概率分布离散化为多个场景集合的形式,在此基础上对每个离散的场景分别求解确定性优化问题,并以最小化各场景下成本的加权平均值为决策目标,以定量分析在不确定场景下的高比例可再生能源系统运行过程.一般形式表述如式(2):

$$\min_{x \in X} (f(x) \equiv E_{\xi} [F(x, \xi)]) \quad (2)$$

其中: $F(x, \xi)$ 为优化问题的目标函数, x 为决策变量, 参数 ξ 是一个随机变量, 其变化范围为 χ .

随机优化法利用运行场景集来制定系统运行策略, 因此场景集的生成与构建对所得优化运行方案影响显著. 蒙特卡洛法^[24]、拉丁超立方抽样法^[25]、自回归滑动平均模型^[26]被广泛用于可再生能源发电运行场景的生成. 文献[27]采用随机优化处理风、光伏发电不确定性, 提出考虑风、光相关性和分布随机特性的VPP热电联合优化调度模型; 文献[28]利用藤Copula模型分析了风、光荷间的相关性, 并基于蒙特卡洛算法, 在预测场景和抽样场景共同作用下建立混合交直流主动配电网的随机规划优化调度模型. 由于场景数量很大, K-medoids聚类^[29]、场景削减技术^[30]被用来减少场景数目, 并利用Benders分解等加速求解方法. 目前研究中各种场景缩减方法虽然降低了随机优化法的计算量, 但由于不能遍历所有类型场景, 使得该方法在可能出现的极端情况下的决策结果仍存在一定风险. 结果受削减后的场景个数制约、多场景描述不确定性的计算复杂, 计算速度与求解精度之间始终难以均衡.

1.2.3 机会约束规划法

机会约束规划针对随机优化中可能存在不能遍历与涵盖所有类型场景的问题, 考虑在该情况下违背约束条件的情况, 将约束条件设置为在某一置信水平下成立. 根据次描述, 机会约束规划的一般形式如式(3):

$$\begin{aligned} \min_{x \in \chi} f(x) \\ \text{s.t. } P(g(x, \xi) \leq 0) \geq 1 - \varepsilon \end{aligned} \quad (3)$$

其中: $P(\cdot)$ 代表随机变量 ξ 的概率分布, $\varepsilon \in (0, 1)$ 是给定的置信水平. 文献[31]在场景概率与随机规划理论的基础上, 利用随机机会约束规划建立电动汽车与分布式光伏的协同优化运行模型; 文献[32]将风电出力的不确定性模糊化, 利用可信度作为约束, 建立了基于模糊机会约束规划的优化调度模型. 文献[33]考虑电动汽车车主驾驶模式的不确定性, 利用点估计的概率方法来研究电动车充电桩的规划问题; 点估计法基于大数定理分析不确定性的概率分布特征, 电力系统中被广泛的应用于概率潮流计算^[34]、寿命预测^[35]等方面.

但机会约束规划需事先明确不确定变量服从的概率分布, 在假设随机变量服从正态分布等较简单的情形外, 机会约束在数学上一般具有非凸、非线性特性, 难以有效求解. 利用智能算法^[36]又会出现无法平衡全局解与局部最优解, 从而陷入局部最优解, 无法在有限时间内得到确定解, 也无法证明解的收敛性与准确性; 若采用抽样平均逼近法求解, 则其模型与随机优化较相似, 同样面临求解速度和求解精度之间的矛盾.

1.2.4 鲁棒优化法

鲁棒优化通过设定不确定变量的随机性波动范围, 寻找极端最恶劣情景下的决策方案. 一般形式如式(4):

$$\begin{cases} \min \sup \{f(x, \xi) : \xi \in U\} \\ \text{s.t. } g(x, \xi) \in K, \forall \xi \in U \\ x \in \Xi \end{cases} \quad (4)$$

其中: $\xi \in U$ 为参数向量, $x \in X$ 是决策变量, Ξ 是决策变量 x 的抽象集合. 文献[37]利用鲁棒不确定模型建立风电出力的不确定性合集, 进而构建多区域间的发电机组与联络线的鲁棒优化调度模型, 虽然可以得到可靠结果, 但需采集大量场景, 从而影响了优化调度模型的计算效率. 文献[38-39]考虑了发、用电功率的不确定性, 采用预先设定好的不确定合集描述不确定性, 研究在最恶劣工况时最经济的运行方案, 但当不确定合集构建过大时, 调度计划变得过于保守, 反之当不确定合集较小时, 计划又会变得不可靠.

分布鲁棒优化结合随机优化与鲁棒优化的优点, 包含不确定变量概率分布参数向量的统计信息, 克服了鲁棒优化对不确定合集中因参数变量估计不精确导致的随机性, 是准确描述不确定性的绝佳技术手段. 一般形式如式(5):

$$\begin{cases} \min \sup_{P \in \Theta} E_P \{f(x, \xi) : \xi \in U\} \\ \text{s.t. } \inf_{P \in \Theta} \text{Prob } P \{g(x, \xi) \in K\} \geq 1 - \varepsilon \end{cases} \quad (5)$$

其中: ε 为风险参数. 文献[40]构建基于Wasserstein距离的加氢站氢气需求分布鲁棒模型, 用于解决移动氢能系统制-储-运-氢协同优化问题, 但Wasserstein距离选取主观性大还会加大模型在转换过程中的求解难度; 文献[41]采用基于生成对抗网络的分布鲁棒优化, 实现在新能源出力最劣概率分布下的储能容量规划, 但决策结果很大程

度上受聚类场景数量、聚类算法迭代次数、初始概率分布的影响^[42]; 文献[43]将KL散度作为筛选极端风电出力场景的控制条件, 并以此构建风电出力的模糊集, 但是该方法包含更多的概率分布形式, 使得优化问题求解耗时较长. 文献[44]创新提出利用贝叶斯模型构造发电功率的不确定合集, 弥补分布鲁棒中概率分布模糊集构建较为主观且仅针对单一时间断面下不确定量表征的缺陷, 但该方法需要大量的历史数据进行拟合, 在样本缺失的情况下无法得到准确模糊集.

综合上述分析, 将不同可再生能源发电不确定性建模方法的适用性与优缺点归纳总结, 如表2所示.

表 2 不同可再生能源发电不确定性建模方法对比

建模方法	适用范围	优点	缺点
备用整定法	基于N-1准则与负荷百分比准则进行备用整定	计算简单, 方法通用	具有复杂形态演化、多重不确定性为特点的系统, 较难得到可靠结果
随机优化法	依据概率分布抽取场景, 将概率分布离散化, 对每个场景分别求解确定性优化问题	可定量分析在不确定场景下的电力系统运行过程	结果受场景个数制约、多场景描述不确定性计算复杂, 场景数量与求解精度之间始终难以均衡
机会约束规划法	所作决策在不利的情况下可能不满足约束条件, 允许约束在以一定概率被违背	具有明确的物理意义, 容易为电力系统调度人员所接受	在数学上一般为非凸, 难以有效求解; 面临场景数量和求解精度之间的矛盾
鲁棒优化法	通过设定不确定变量的波动范围, 寻找最恶劣情景下的决策方案	模型具有较强的鲁棒性, 不需要不确定参数的分布模型	无法量化系统鲁棒性, 从而直观平衡系统经济性与保守性
Wasserstein距离		包含不确定变量概率分布参数	Wasserstein球半径选取主观性大, 对决策结果有重要影响
分布鲁棒	克服了鲁棒优化对不确定合集中因参数变量估计不精确导致的随机性	向量的统计信息, 克服了鲁棒优化对不确定合集中因参数变量估计不精确导致的随机性	分布概率为离散形式, 在主优化问题中需尽可能包含所有场景, 导致求解耗时较长
KL散度			决策结果很大程度上受聚类场景数量、聚类算法迭代次数、初始概率分布的影响
多离散场景			

2 可再生能源系统并网运营模式分析

单独利用可再生能源并网发电具有随机性强、间断性大、效率低、并网难等问题, 将多种可再生能源及其它能源网综合利用的混合发电系统能够平抑可再生能源发电波动性, 提高其友好并网能力. 根据其资源所属关系, 可将高比例可再生能源参与的混合发电系统分为可再生能源-储能系统、可再生能源集群-独立储能系统、多能源互补系统.

2.1 可再生能源-储能系统

储能是实现我国“双碳”目标、促进我国向清洁能源结构转型的重要基础装备, 是平滑新能源出力波动性与随机性、为电网提供灵活调峰容量与调频里程的主要技术手段之一. 目前全国大部分地区要求可再生能源强配储能, 包括山东、甘肃、陕西、青海、湖北等多个省份发布了强制配储比例, 明确储能容量占可再生能源装机容量的比例不低于5%~30%^[45]. 图1为可再生能源-储能系统的运行框架.

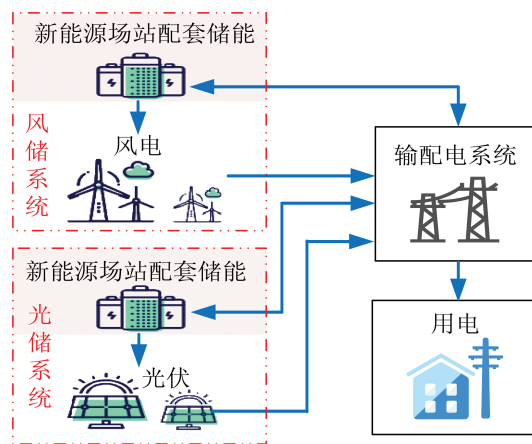


图 1 可再生能源-储能系统的运行框架

目前全国大部分地区要求可再生能源强配储能, 包括山东、甘肃、陕西、青海、湖北等多个省份发布了强制配储比例, 明确储能容量占可再生能源装机容量的比例不低于5%~30%^[45]. 图1为可再生能源-储能系统的运行框架.

图1中配套储能在电网侧与场站侧都有着极高的应用价值. 在电网侧, 高比例可再生能源系统转动惯量大大幅度降低, 关键运行指标的支撑和调节能力逐步下降, 系统安全稳定运行面临巨大挑战^[46]. 文献[47]提出一种风储系统与等容量同步发电机等惯量响应能力的协调运行策略, 旨在使得电网惯量响应能力和调频能力不变; 文献[48]利用储能维持系统惯性大小以及一次调频能力, 以达到新能源替换传统机组接入后系统中的惯性大小和一次调频能力保持不变. 在场站侧, 一般应用于风力/光伏储能和自动发电控制调频电站, 主要任务是改善新能源技术的消纳问题, 提升电能质量, 参与电力市场辅助服务, 跟踪场站预测功率, 平抑场站并网电量波动性等. 文献[49-50]分别利用截断正态分布法与计算跟踪计划允许误差带法对储能补偿新能源功率预测误差场景开展配套储能运行研究. 文献[51]以满足电力供需为目标, 确定风、光储联合发电系统的整体并网功率, 借助蒙特卡洛仿真计算得到风、光储各机组的组合策略.

但目前对于综合考虑经济性和提升系统灵活性、可再生能源利用率等需求的储能功能定位及配置原则尚不清晰, 存在配套储能利用率低、缺乏成本疏导渠道等发展瓶颈. 因此, 兼顾经济性与多场景应用需求的新能源场站储能配置方案是亟需进一步研究的关键问题. 文献[52]提出了储能双层优化配置模型, 上层以储能综合投资成本最小为目标优化储能容量, 下层以系统总运行成本最小为目标, 实现系统运行的经济优化, 在建模过程中兼顾了储能的投资成本与系统的安全保供. 文献[53]将锂电池与液流电池的优势相结合, 根据实际需求所设的技术指标, 结合储能平均使用成本最小化的目标函数, 得到了功率型、容量型的储能综合配置. 文献[54]建立了计及储能“低储高发”服务、电价补贴、再回收利用价值、投资成本、运维成本的全方位多维度的全寿命周期储能成本效益模型. 上述研究, 虽从电网侧联合火电、风电、光伏等多种能源参与调峰、调频, 从新能源场站侧协同新能源发电计划出发配置集中式储能的容量, 但未充分发挥储能资源的时空互补特性, 多数仅针对单一应用场景应对单一需求的储能配置研究. 对于多应用场景的储能配置原则无法清晰界定, 并且模型构建时对于经济性的考虑偏多, 较少对系统需求的鲁棒性进行考虑.

综合上述分析, 可再生能源场站配套储能是平滑新能源出力波动性与随机性、为电网提供灵活调峰容量与调频里程的重要技术手段. 但也存在明显问题, 其中配套储能利用率低是当前最为突出的核心问题, 此外同质化配储要求缺乏科学依据, 单一新能源场站分散的配置方式也难以充分发挥储能的作用与投资中的规模化效应. 因此, 亟需探索优化储能资源配置的新方法与新模式.

2.2 可再生能源集群-独立储能系统

为解决目前大规模新能源消纳困难、系统调节能力不足、储能盈利模式单一、利用率较低等问题, 国家出台了《关于加快推动新型储能发展的指导意见》《“十四五”新型储能发展实施方案》等政策, 明确提出探索共享储能新模式, 各省区市也逐步增加了独立储能发展要求. 图2为可再生能源集群-独立储能系统的运行框架.

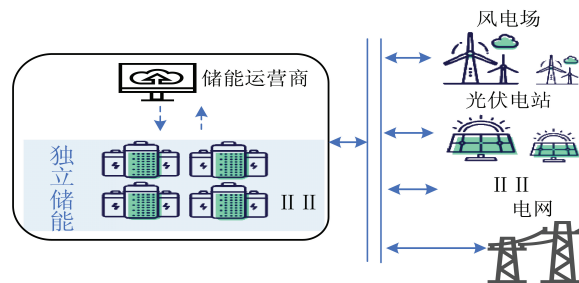


图2 可再生能源集群-独立储能系统的运行框架

图2所示独立储能一般安装在大规模可再生能源发电汇集处, 通常为单体容量较大的储能系统. 独立储能通过储能运营商进行集中管控和分配, 利用多场站与电网调节需求的时空互补特性, 通过分时空复用向多个储能使用者提供多种调节需求^[55], 以提高储能利用率^[56]、降低储能资源投资与运行的经济性. 储能运营商根据独立储能使用者需求的利益等级, 充分考虑各需求间的时空互补特性, 设置最优储能使用优先级. 储能运营商根据使用优先级向各储能使用者提供电量或容量服务, 以最大限度满足多类型调节需求或最大化独立储能利润. 基于图2的运行框架, 文献[57]提出基于误差分配原则的发电侧独立储能共享运行模式, 为其规模化应用提供了参考. 文献[58]提出新能源场站和独立储能运营商组的合作共享运行方案, 解决场站配套储能投资意愿低的基础问题. 文献[59]基于现货市场环境提出一种独立储能以租赁或共享的形式为风电、光伏电站提供平衡服务并

参与能量-调频市场的运行策略. 文献[60]基于区块链技术建立储能共享运营模型,以提高储能利用率,增加储能运营商的收益.

现有研究中,独立储能多为第三方出于盈利为目的投资建设的利益驱动型储能,因此,兼顾储能使用者、储能所有者多方利益诉求的运营机制、公平高效的储能共享运营定价策略成为制约独立储能模式规模化可持续发展的关键问题. 文献[61]利用分时电价,借鉴用户用电电价与时间的关系,将共享储能电价在22:00至06:00设置为谷时电价0.307元/千瓦时,在06:00至22:00设置为峰时电价0.617元/千瓦时. 文献[62]依据历史用户用电情况,制定储能充放电策略,决定共享储能的分时电价以平衡用户与储能的利益. 上述定价方式虽保证了共享储能的合理收益,但未有效利用价格与储能利益的激励关系,抑制了独立储能规模化参与市场交易的主动性与发展潜力. 文献[63]设计共享储能的拍卖定价机制,容量与价格均由用户与拍卖商间的Stackelberg博弈决定,但拍卖存在过度竞争、竞价者间不正当的合作与非真实信息披露三方面机制缺陷. 文献[64]基于改进的Vickey法捕获共享储能参与方的互动,并利用非合作博弈确定共享储能容量比例与交易价格,但该方法侧重于信息完全的理想模式,未结合现实情况研究信息不完全时各参与者的策略行为,也未探讨个体利益与整体利益间的交互影响规律.

综合上述分析,可再生能源集群-独立储能系统通过实现储能资源的分时空复用,提高资源利用率、充分发挥储能作用;又能鼓励各类能源企业建立独立储能电站,利用规模效益降低投资成本、实现多方共赢. 但共享模式涉及众多异质性主体,各主体间利益交互错综复杂,使得储能资源与能量需求匹配存在滞碍. 该模式也面临储能运营商收益无法保障、差异性需求下多方效益难以均衡等发展瓶颈.

2.3 多能源互补系统

随着电网形态的不断演变,能源互联网技术的不断发展,多能源耦合是未来能源-电力系统发展的必然趋势. 各能源系统相互链接,保持各自系统安全稳定运行的同时,提高协作的灵活性,为电力系统消纳高比例可再生能源提供新的思路. 图3为多能源互补系统的运行框架.

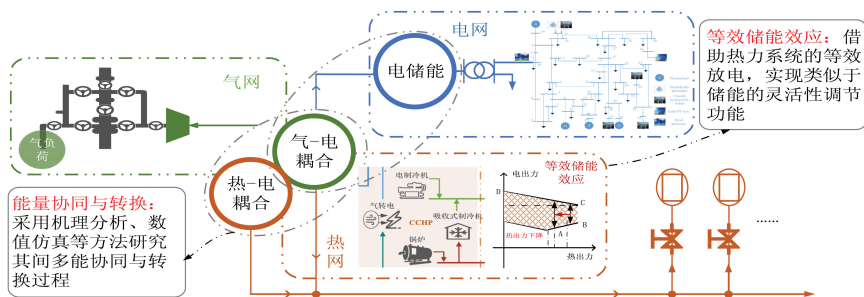


图3 多能源互补系统的运行框架

图3中多能源互补系统涉及集中式与分布式共同管理、多种能量之间协同转换,是供给侧与需求侧相互配合的新型能量生态体系^[65]. 文献[66]提出将电网内部功率波动转移至具有较大惯性的热网,并证明所提方法具有较好的削峰填谷效果;文献[67]对电-气耦合系统进行评价,结果证明该系统可以提高可再生能源的灵活性,文献[68]提出合理利用弃风的电-气综合能源系统实现互联系统之间的能源双向耦合与传递,文献[69]利用电转气(P2G)实现电力系统与天然气系统双向能量流动,是促进风电消纳平滑功率需求的有效途径. 多能源互补系统就能量差异特性来看,不同能量惯性差异较大,对此文献[70]提出包含需求响应资源、系统调度目标和源荷预测精度在时间尺度上的差异,设计多时间尺度运行方案;文献[71]为减小发电不确定性对系统的影响同时提升可再生能源发电系统的功率平抑能力,提出考虑多能互补的多时间尺度优化调度策略.

随着高效能量转换设备的普及与电网形态的不断转变,多个能源系统交互耦合不再是单独运行,传统能源市场割裂运行的模式不能很好地发挥资源调配能力. 因此,公平高效的能源共享交易新模式与新机制亟需研究. 文献[72]研究了不受限制竞争与受交易价格和规模限制的Stackelberg竞争两种市场条件下多产消者在能量共享时的竞争关系,基于非合作博弈提出多能源在多参与主体间的交易模式;文献[73]提出双边交易价格的新策略,该策略能够减少交易中双方达成可交易价格的谈判次数,获得比传统双边交易更高的市场效率;文献[74]提出分布式储能双层合作共享策略,通过两次利益再分配应对目前分布式储能成本高、利用率低的挑战,解决用户数量增加带来的隐私保护问题与模型求解中面临的维数灾难问题. 但当前研究大多只考虑信息完全公开的理想

情况,实际中参与者存在为低价或优先获取能量服务而存在的非真实信息披露(谎报真实意愿)和信息不完整(隐私保护)的情况。

综上所述,多能源互补系统可灵活调动多方资源,极具发展潜力,但各能源系统隶属于不同管理方,且多能源交易的相关市场模式、定价机制尚不成熟,涉及多能源参与市场下的有效组织形式还有待进一步研究。

综合上述分析,将可再生能源-储能系统、可再生能源集群-独立储能系统、多能源互补系统的适用场景,以及优点与发展瓶颈进行对比总结,如表3所示。

表 3 可再生能源系统并网运营模式对比

类型	适用范围	优点	发展瓶颈
可再生能源-储能系统	自行配置储能,具有较大发电规模的可再生能源场站	平滑新能源出力波动性与随机性,为电网提供灵活调峰容量与调频里程	1) 配套储能利用率低 2) 同质化配储要求缺乏科学依据 3) 单一新能源场站分散的配置方式难以充分发挥储能的作用与投资的规模化效应
可再生能源集群-独立储能系统	大规模可再生能源发电汇集处,通常为单体容量较大的储能系统	独立储能通过储能运营商进行集中管控和分配,向多个储能使用者提供多种调节需求	1) 储能资源与能量需求匹配存在障碍 2) 储能运营商收益无法保障 3) 差异性需求下多方效益难以均衡
多能源互补系统	用户侧多能互补/综合利用的多个微网或园区系统	能源系统相互链接,保持各自系统安全稳定运行的同时,提高协作灵活性	1) 多能源交易的相关市场模式、定价机制尚不成熟 2) 多能源参与市场下的有效组织形式尚不明确

3 可再生能源系统并网控制方法分析

风、光等大规模可再生能源发电接入使得整个电网形态发生演变,出现不同于传统电网的可再生能源并网变换器的稳定运行新问题与新挑战。工程中可大致分为跟网型与构网型控制^[75],其中跟网型控制采用锁相环检测并网点的电压相角,以此为参考值进行电流控制以实现输出功率的调节;构网型控制则模拟了同步电机的外特性,可生成相角参考值,构建类似同步电机的输出电压,从而发挥参与电网电压与频率的调节作用。

3.1 同步跟网型并网变换器控制策略

跟网型并网变换器控制系统通常由功率外环、电流内环和锁相环组成,具有对并网功率调节快速、稳定性强、鲁棒性高等优点^[75]。此外,功率外环、电流内环和锁相环间的控制环路可相互解耦,可独立进行控制参数的整定与解耦。文献[76]为实现快速提取电网电压的基波正负序分量,提出一种基于复数滤波器矩阵解耦的锁相策略。文献[77]提出一种风电并网锁相环控制策略,利用一阶线性自抗扰控制器,以解决受可再生能源出力波动影响引发的跟网型变流器的振荡问题。文献[78]针对负序电流严重影响并网逆变器输出电能品质的问题,提出一种基于虚拟矢量的无锁相环控制策略。

但随着可再生能源渗透率的不断升高,可再生能源机组不断挤压传统机组空间,使得具有稳定支撑能力的传统机组占比不断降低,电网呈现“弱电网”特性^[79],锁相环同步跟网型并网变换器与电网之间的多时间尺度动态交互会导致可再生能源发电注入电网的电流发生谐振,严重时甚至脱网。为解决上述问题,学者们从阻抗分析法^[80]与线性状态空间分析法阐述了锁相环引起的负阻效应对系统稳定性的机制。例如:文献[81-83]基于阻抗分析法研究了不同频次谐波线性化方法与不同截断次数下的MIMO与SISO模型,以直观分析并网变换器与电网交互引起的谐波振荡问题。文献[84]考虑直流侧二次谐波影响,将无穷维导纳矩阵截断降维至 7×7 进行分析;文献[85]则删除奇次谐波项进一步给出 3×3 维导纳矩阵进行简化。在此基础上,文献[86-88]通过增加电压前馈滤波器、导纳补偿项、相角补偿项等方式改善变换器阻尼的低频特性,增加弱电网系统的鲁棒性与抗扰动能力。上述方法中补偿项的确定较为主观,精确的补偿相位、相角等依然难以获得;文献[89-90]比较了不同积分器(OSG)结构对弱电网稳定性的影响,但此类自适应的算法或结构层出不穷,现有研究未能归纳总结不同方法间的本质差别,也未对其策略协同针对的工程特性进行深入分析。

综合上述分析,在高比例可再生能源接入的弱电网情形下,跟网型并网变换器与电网之间存在多时间尺度

动态耦合效应,系统面临失稳风险,加之故障情况下并网需要多重控制策略间的切换,稳定性问题凸显。

3.2 构网型并网变换器控制策略

构网型并网技术具有电压支撑和主动惯性支持特性,可代替同步电机实现电网支撑,维持电力系统频率稳定^[91],电池储能系统主要采用下垂控制^[92]和虚拟惯性控制^[93]两种构网型控制技术参与电网调频^[94]。

传统下垂控制受输电线路的阻抗影响,在多灵活性调节资源并存下功率的精确分配常常难以实现^[92],为解决上述问题,文献[95]在下垂控制模型的基础上,引入了虚拟频率的概念,利用计算不同灵活性调节资源的虚拟频率来确定下垂控制系数,从而提高功率分配的精确程度。文献[96]为了兼顾并网点频率与电压的稳定性,提高并网点频率和电压的恢复能力,提出了一种将下垂控制与虚拟阻抗控制相结合的控制策略。为使虚拟惯性控制更好模拟同步发电机惯性特性,文献[97]提出了一种根据频率偏差和频率变化量的符号,自适应调节控制参数的方法,使其更好地抑制频率变化。文献[98]引入了自调节惯量的指标计算方法,提高了可再生能源系统对电网频率的支撑能力。但是,单一的控制策略均存在不足,例如:文献[99]对储能系统参与调频的互联两区电力系统进行仿真,结果表明虚拟惯性控制可有效抑制频率偏差变化率,但单一的方法对频率恢复效果不佳。文献[100]模拟了低惯性网络中大型发电机的频率损失事件,并对比几种控制策略在频率损失中的恢复情况。对比结果表明:采用下垂控制有助于减小稳态频率偏差,在提高频率稳定性方面具有优势。文献[101]使用灵敏度分析的方法,证明了虚拟惯性控制在抑制频率偏差变化率方面更具优势,下垂控制在减小稳态频率偏差方面也具优势。在此基础上,文献[102]将下垂控制和虚拟惯性控制优势互补,进而从频率与电压两方面提高并网点稳定性,提出了一种针对储能电源参与电网一次调频的综合控制模式。但该方法也存在一个比较严重的弊端,就是在两种控制策略切换时容易出现储能从最小到最大输出功率的跃变,降低了储能使用寿命。为了解决该问题,部分学者引入模糊控制方法,对两种控制参与比重进行自适应调节,从而避免因控制模式切换造成的电池出力跃变。

现有研究针对控制在单一类型储能方面的研究较多,但未详细研究不同类型储能能量密度、功率密度、充放电效率和循环寿命等具体储能特性对控制技术的影响。此外,同一储能承担不同功能时的控制方式的研究尚存欠缺。为此结合两种控制技术,需进一步深入研究储能控制技术与不同储能特性及承担不同功能时的作用机理。

4 可再生能源系统并网运行调控展望

现有可再生能源发电不确定性预测与建模方法、并网运营模式、并网控制方法等方面已有较多研究,但随着新型电力系统的不断发展还存在如下问题需要进一步的完善。

4.1 大规模可再生能源场站参与的建模与求解技术

建立科学的可再生能源场站群与高效的可再生能源场站间互补协同运营机制是大规模可再生能源可持续发展的基础。目前研究为简化计算、减低模型求解的复杂程度,仅针对几个可再生能源场站间复杂的竞争与合作关系进行剖析,由此提出的运营模式和互动机制没有从全局角度出发,与实际情况差距较大。对于应对大规模决策主体的运营策略,以及应对高纬决策空间的大规模并行计算的相关研究尚未涉及,无法为大规模可再生能源场站参与的互补运营、协同调度机制提供有效支撑。

综合上述分析,如何在新型电力系统的未来电网形态演变下,进行具有大规模参与主体间互动行为的分析与建模,并提出考虑海量新能源场站的发电侧运营模式是亟需解决的关键问题。

4.2 促进可再生能源消纳的多类型市场协同交易与联合出清机制

通过绿色市场建设助力能源低碳转型,利用“市场”无形的手,以促进可再生能源电力的消纳。目前包括可再生能源配额、绿电、碳排放权、发电权等多种能量/权益产品的交易,但上述多种交易产品在功能定位、目标导向等方面具有相似性,且其关联关系、产品定位等仍未厘清;不同类型交易标的具有内在联系,不同产品的价值机制也存在一定程度上的联动影响。此外,多种能量/权益产品间的衔接壁垒虽可顺畅打通、为交易主体提供了更多的选择,但加剧了不同类型产品交易时出清的复杂程度。

综合上述分析,亟需分析多类型市场联合交易中不同能量/权益产品的交互与映射关系,开展不同交易标的间衔接互认体系的研究,在此基础上开展多元主体优化决策与多市场协同清算技术的研究,以最大限度发挥

市场对可再生能源电力消纳的潜力.

4.3 多场景并网需求的价值追溯

为提高系统稳定性,可再生能源场站将通过控制策略,依靠自身运行工况与灵活性调节资源起到对电网的稳定支撑作用.此外,随着我国电力市场的不断发展,可再生能源场站间、可再生能源与储能将形成一体化发电系统,联合参与到多级、多尺度电力市场等诸多电能交易中.但目前政策灵活性较为有限,多数研究为单一个体在给定政策激励下的运行调控决策,较少研究涉及一体化发电系统在多类型电能交易中推广应用情况、以及多种因素对该运营模式推广应用的影响.

综合上述分析,亟需分析并网一体化发电系统在不同政策激励下的相应特性,提出兼顾激励成本和可再生能源收益的激励机制设计方法.

5 结语

高比例可再生能源系统并网发电领域广受关注,其并网稳定性受科学精确的发电不确定性建模技术与控制策略制约;此外,随着我国电网形态的不断演化,灵活有序的运营模式可鼓励多元性资源的广泛参与,以期促进其可持续发展.

本文从发电不确定性预测与建模、并网运营模式、并网控制方法三个方面入手,进行了全面、深入的分析 and 展望.首先,讨论了不同时间尺度下发电不确定性预测技术、针对多场景运行需求的不确定性建模技术;然后,基于国家政策与能源互联网发展趋势从可再生能源-储能系统、可再生能源集群-独立储能系统、多能源互补系统三个角度总结了大规模可再生能源系统运营机制;其次,结合现有研究分析总结了可再生能源系统跟网型与构网型运行控制策略;最后,从大规模独立主体的建模与求解技术、多场景并网需求的价值追溯两个角度给出高比例可再生能源系统在未来电网形态演变中的发展方向.

参考文献:

- [1] 肖先勇,郑子萱.“双碳”目标下新能源为主体的新型电力系统:贡献、关键技术与挑战[J].工程科学与技术,2022,54(1):47-59.
XIAO X Y, ZHENG Z X. New power systems dominated by renewable energy towards the goal of emission peak & carbon neutrality: Contribution, key techniques, and challenges[J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(1): 47-59. (in Chinese)
- [2] 康重庆,夏清,张伯明.电力系统负荷预测研究综述与发展方向的探讨[J].电力系统自动化,2004,28(17):1-11.
KANG C Q, XIA Q, ZHANG B M. Review of power system load forecasting and development[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(17): 1-11. (in Chinese)
- [3] WANG X X, LIU Y R, HOU J C, et al. Medium- and long-term wind-power forecasts, considering regional similarities[J]. Atmosphere, 2023, 14(3): 430.
- [4] 穆钢,崔杨,严干贵.确定风电场群功率汇聚外送输电容量的静态综合优化方法[J].中国电机工程学报,2011,31(1):15-19.
MU G, CUI Y, YAN G G. A static optimization method to determine integrated power transmission capacity of clustering wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 15-19. (in Chinese)
- [5] 崔杨,李焕奇,严干贵,等.计及汇聚特性的光伏电站群集中外送输电容量优化配置方法[J].电网技术,2015,39(12):3491-3496.
CUI Y, LI H Q, YAN G G, et al. An optimization method to determine integrated power transmission capacity of clustering photovoltaic plants based on clustering effect[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3491-3496. (in Chinese)
- [6] 钱子伟,孙毅超,王琦,等.基于OS-ELM的光伏发电中长期功率预测[J].南京师范大学学报(工程技术版),2020,20(1):8-14.
QIAN Z W, SUN Y C, WANG Q, et al. Medium and long term photovoltaic power generation forecasting based on OS-ELM[J]. Journal of Nanjing Normal University(Engineering and Technology Edition), 2020, 20(1): 8-14. (in Chinese)
- [7] 陈子含,滕伟,胥学峰,等.基于图卷积网络和风速差分拟合的中长期风功率预测[J/OL].中国电力,2023:1-8.(2023-06-08).
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20230607.1101.004.html>.
CHEN Z H, TENG W, XU X F, et al. Medium and long term wind power prediction based on graph convolutional network and wind velocity differential fitting[J/OL]. Electric Power, 2023: 1-8. (2023-06-08). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20230607.1101.004.html>. (in Chinese)
- [8] 任鑫,王一妹,王华,等.基于改进卷积-门控网络及Informer的两类中长期风电功率预测方法[J/OL].现代电力,2023:1-9.(2023-10-08).
https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=vYzgd5_tBo8-pHMMHOixLCK0c6OhSv7TUhGjhe6l9zYZfRD28

WfCzkaClT2PRMyes31Wuty1NA5zv5Ta1FO8hx3ZMGp7GDhTE8jAT7Qr-AqQQZjig-XSC9u.8l0D8QgpIguZl7OD7CY=&uniplatform=NZKPT&language=CHS.

REN X, WANG Y M, WANG H, et al. Two types of medium-long-term wind power forecasting methods based on improved CNN-GRU and Informer[J/OL]. *Modern Electric Power*, 2023: 1-9. (2023-10-08). https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=vYzgd5_tBo8-pHMMHOixLCK0c6OhSv7TUhGjhe6l9zYZfRD28WfCzkaClT2PRMyes31Wuty1NA5zv5Ta1FO8hx3ZMGp7GDhTE8jAT7Qr-AqQQZjig-XSC9u.8l0D8QgpIguZl7OD7CY=&uniplatform=NZKPT&language=CHS. (in Chinese)

- [9] 肖白,邢世亨,王茂春,等.基于改进KDE法和GA-SVM的多风电场聚合后输出功率长期波动特性预测方法[J].*电力自动化设备*,2022,42(2):77-84.
- XIAO B, XING S H, WANG M C, et al. Prediction method of output power long-term fluctuation characteristic for multiple wind farms after aggregation based on improved KDE method and GA-SVM[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(2): 77-84. (in Chinese)
- [10] 李笑竹,王维庆.针对新一代能源系统运行调度的优化算法研究[J].*新疆大学学报(自然科学版)(中英文)*,2021,38(6):739-752.
- LI X Z, WANG W Q. Research on optimization algorithm for operation dispatching of new generation energy system integration[J]. *Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English)*, 2021, 38(6): 739-752. (in Chinese)
- [11] MANDAL P, MADHIRA S T S, HAQUE A U, et al. Forecasting power output of solar photovoltaic system using wavelet transform and artificial intelligence techniques[J]. *Procedia Computer Science*, 2012, 12: 332-337.
- [12] 苗长新,王霞,李昊,等.基于数值天气预报风速误差修正的风电功率日前预测[J].*电网技术*,2022,46(9):3455-3464.
- MIAO C X, WANG X, LI H, et al. Day-ahead prediction of wind power based on NWP wind speed error correction[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(9): 3455-3464. (in Chinese)
- [13] 乔颖,鲁宗相,闵勇.提高风电功率预测精度的方法[J].*电网技术*,2017,41(10):3261-3269.
- QIAO Y, LU Z X, MIN Y. Research & application of raising wind power prediction accuracy[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(10): 3261-3269. (in Chinese)
- [14] LEVA S, DOLARA A, GRIMACCIA F, et al. Analysis and validation of 24 hours ahead neural network forecasting of photovoltaic output power[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2017, 131: 88-100.
- [15] 董存,王铮,白捷予,等.光伏发电功率超短期预测方法综述[J].*高电压技术*,2023,49(7):2938-2951.
- DONG C, WANG Z, BAI J Y, et al. Review of ultra-short-term forecasting methods for photovoltaic power generation[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(7): 2938-2951. (in Chinese)
- [16] 蒋峰,王宗耀,张鹏.基于灰色-加权马尔可夫链的光伏发电量预测[J].*电力系统保护与控制*,2019,47(15):55-60.
- JIANG F, WANG Z Y, ZHANG P. Forecasting power generation of solar photovoltaic system based on the combination of grey model and weighted Markov chain[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(15): 55-60. (in Chinese)
- [17] 孟安波,许炫淙,陈嘉铭,等.基于强化学习和组合式深度学习模型的超短期光伏功率预测[J].*电网技术*,2021,45(12):4721-4728.
- MENG A B, XU X C, CHEN J M, et al. Ultra short term photovoltaic power prediction based on reinforcement learning and combined deep learning model[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(12): 4721-4728. (in Chinese)
- [18] LI W D, YANG X, LI H, et al. Hybrid forecasting approach based on GRNN neural network and SVR machine for electricity demand forecasting[J]. *Energies*, 2017, 10(1): 44.
- [19] WEN S L, ZHANG C, LAN H, et al. A hybrid ensemble model for interval prediction of solar power output in ship onboard power systems[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2021, 12(1): 14-24.
- [20] 黄鹏翔,周云海,徐飞,等.基于负荷与风电出力场景集的运行备用动态调度方法[J].*可再生能源*,2021,39(5):658-665.
- HUANG P X, ZHOU Y H, XU F, et al. Operating reserve dynamic dispatching method based on load and wind power scenario set[J]. *Renewable Energy Resources*, 2021, 39(5): 658-665. (in Chinese)
- [21] CHATTOPADHYAY D, BALDICK R. Unit commitment with probabilistic reserve[C]//2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 02CH37309). New York: IEEE, 2002: 280-285.
- [22] ORTEGA M, KIRSCHEN D. Estimating the spinning reserve requirements in systems with significant wind power generation penetration[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2008, 24(1): 114-124.
- [23] 张楠,黄越辉,刘德伟,等.考虑风电接入的电力系统备用容量计算方法[J].*电力系统及其自动化学报*,2016,28(3):6-10.
- ZHANG N, HUANG Y H, LIU D W, et al. Reserve capacity calculation of power system considering wind power integra-

- tion[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(3): 6-10. (in Chinese)
- [24] SAHIN C, SHAHIDEHPOUR M, ERKMEN I. Allocation of hourly reserve versus demand response for security-constrained scheduling of stochastic wind energy[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(1): 219-228.
- [25] WANG J H, SHAHIDEHPOUR M, LI Z Y. Security-constrained unit commitment with volatile wind power generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 1319-1327.
- [26] MEIBOM P, BARTH R, HASCHKE B, et al. Stochastic optimization model to study the operational impacts of high wind penetrations in Ireland[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1367-1379.
- [27] 李嘉森, 王进, 杨蒙, 等. 基于随机优化的虚拟电厂热电联合经济优化调度[J]. 太阳能学报, 2023, 44(9): 57-65.
LI J S, WANG J, YANG M, et al. Combined heat and power economic optimal dispatching in virtual power plant based on stochastic optimization[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(9): 57-65. (in Chinese)
- [28] 梁海平, 王岩, 刘英培, 等. 计及源荷不确定性的混合交直流主动配电网分层-分布式优化调度[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(12): 62-69+77.
LIANG H P, WANG Y, LIU Y P, et al. Hierarchical-distributed optimal scheduling of hybrid AC/DC active distribution network considering source and load uncertainties[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(12): 62-69+77. (in Chinese)
- [29] 李康平, 张展耀, 王飞, 等. 基于GAN场景模拟与条件风险价值的独立型微网容量随机优化配置模型[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1717-1725.
LI K P, ZHANG Z Y, WANG F, et al. Stochastic optimization model of capacity configuration for stand-alone microgrid based on scenario simulation using GAN and conditional value at risk[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1717-1725. (in Chinese)
- [30] 王华伟, 程小虎, 赵蒙蒙, 等. 面向分布式光伏消纳的中压配电网储能规划模型和求解方法[J]. 电力建设, 2023, 44(9): 58-67.
WANG H W, CHENG X H, ZHAO M M, et al. Method for energy storage planning in medium-voltage distribution networks for distributed photovoltaic consumption[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(9): 58-67. (in Chinese)
- [31] 徐杨杨, 张新松, 陆胜男, 等. 多重随机特性下的电动汽车充电网络机会约束规划[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 30-39.
XU Y Y, ZHANG X S, LU S N, et al. Chance constrained optimization of an electric vehicle charging network with multiple stochastic characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 30-39. (in Chinese)
- [32] 王磊, 张家敏. 基于模糊机会约束规划的跨区直流电网系统优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 12-19.
WANG L, ZHANG J M. Optimal scheduling method for an inter-regional DC grid system based on fuzzy chance constrained programming[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 12-19. (in Chinese)
- [33] 徐睿, 范伟, 田浩, 等. 基于点估计法的配电网电动汽车停车场选址定容方法[J]. 可再生能源, 2021, 39(1): 81-87.
XU R, FAN W, TIAN H, et al. Siting and sizing method for electric vehicle parking in distribution network considering uncertainty of vehicle owner behavior[J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(1): 81-87. (in Chinese)
- [34] 李钰洋, 王增平. 基于高斯求积的智能配电网三相概率潮流点估计法[J]. 电网技术, 2022, 46(2): 709-717.
LI Y Y, WANG Z P. Three-phase probabilistic load flow for smart distribution network based on Gauss-quadrature-based point estimate method[J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 709-717. (in Chinese)
- [35] 宋兆理, 贾祥, 郭波, 等. 基于贝叶斯融合与仿真的系统剩余寿命预测[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(6): 1706-1713.
SONG Z L, JIA X, GUO B, et al. Remaining useful life prediction of system based on Bayesian fusion and simulation[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(6): 1706-1713. (in Chinese)
- [36] 王强强, 姚良忠, 盛万兴, 等. 基于机会约束规划的配电网分布式光伏承载力提升方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(18): 132-141.
WANG Q Q, YAO L Z, SHENG W X, et al. Enhancement method for distributed photovoltaic hosting capacity of distribution network based on chance-constrained programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18): 132-141. (in Chinese)
- [37] LI Z G, SHAHIDEHPOUR M, WU W C, et al. Decentralized multiarea robust generation unit and tie-line scheduling under wind power uncertainty[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(4): 1377-1388.
- [38] 郭尊, 李庚银, 周明, 等. 面向风电消纳的电-气联合系统分散协调鲁棒优化调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(20): 6442-6455.
GUO Z, LI G Y, ZHOU M, et al. A decentralized and robust optimal scheduling model of integrated electricity-gas system for wind power accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(20): 6442-6455. (in Chinese)
- [39] 马丽叶, 刘美思, 尹钰, 等. 主动配电网中多微网鲁棒环境经济调度研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(11): 1-10.
MA L Y, LIU M S, YIN Y, et al. Robust environment economic scheduling of multi-microgrids in active distribution net-

- work[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2020, 41(11): 1-10. (in Chinese)
- [40] 丁涛,贾文皓,黄雨涵,等. 基于分布鲁棒机会约束的移动氢能系统制-储-运氢协同优化[J/OL]. *电力系统自动化*, 2023: 1-13. (2023-10-17). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20231012.0923.002.html>.
- DING T, JIA W H, HUANG Y H, et al. Collaborative optimization for hydrogen generation, storage, and transportation in mobile hydrogen energy systems based on distributionally robust chance constraint[J/OL]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023: 1-13. (2023-10-17). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20231012.0923.002.html>. (in Chinese)
- [41] 李运鸿,徐潇源,严正. 基于生成对抗网络的独立微电网光-储容量分布鲁棒优化配置[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(7): 51-62.
- LI Y H, XU X Y, YAN Z. Distributionally robust optimal allocation for capacity distribution of photovoltaic and energy storage units in standalone microgrid based on generative adversarial network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(7): 51-62. (in Chinese)
- [42] TANG R, WANG S W, LI H X. Game theory based interactive demand side management responding to dynamic pricing in price-based demand response of smart grids[J]. *Applied Energy*, 2019, 250: 118-130.
- [43] 刘艳,王建涛,周皖晨,等. 基于KL散度距离处理风电不确定性的负荷恢复分布鲁棒优化[J/OL]. *华北电力大学学报(自然科学版)*, 2022: 1-8. (2022-09-22). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.TM.20220920.0951.004.html>.
- LIU Y, WANG J T, ZHOU W C, et al. Distributionally robust optimization of load recovery employing kullback-leibler divergence distance to handle wind power uncertainty[J/OL]. *Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition)*, 2022: 1-8. (2022-09-22). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.TM.20220920.0951.004.html>. (in Chinese)
- [44] 李笑竹,王维庆. 基于贝叶斯理论的分布鲁棒优化在储能配置上的应用[J]. *电网技术*, 2022, 46(10): 4001-4011.
- LI X Z, WANG W Q. Application of distributed robust optimization based on Bayesian theory in allocation of energy storage[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(10): 4001-4011. (in Chinese)
- [45] 周斌,胡济洲,周志强,等. 可再生能源的配套储能技术原则分析[J]. *电子技术*, 2023, 52(8): 240-241.
- ZHOU B, HU J Z, ZHOU Z Q, et al. Analysis on the principles of supporting energy storage technologies for renewable energy[J]. *Electronic Technology*, 2023, 52(8): 240-241. (in Chinese)
- [46] 李相俊,马会萌,姜倩. 新能源侧储能配置技术研究综述[J]. *中国电力*, 2022, 55(1): 13-25.
- LI X J, MA H M, JIANG Q. Review of energy storage configuration technology on renewable energy side[J]. *Electric Power*, 2022, 55(1): 13-25. (in Chinese)
- [47] 陈长青,李欣然,杨祥,等. 基于风机调频特性的储能配置方法及协调运行策略[J]. *电力建设*, 2022, 43(1): 96-103.
- CHEN C Q, LI X R, YANG Y, et al. Energy storage configuration method and coordinated operation strategy based on wind power frequency-regulation characteristics[J]. *Electric Power Construction*, 2022, 43(1): 96-103. (in Chinese)
- [48] 杨丘帆,王琛淇,魏俊红,等. 提升电网惯性与一次调频性能的储能容量配置方法[J]. *电力建设*, 2020, 41(10): 116-124.
- YANG Q F, WANG C Q, WEI J H, et al. Capacity allocation of energy storage system for improving grid inertia and primary frequency regulation [J]. *Electric Power Construction*, 2020, 41(10): 116-124. (in Chinese)
- [49] 石涛,张斌,晁勤,等. 兼顾平抑风电波动和补偿预测误差的混合储能容量经济配比与优化控制[J]. *电网技术*, 2016, 40(2): 477-483.
- SHI T, ZHANG B, CHAO Q, et al. Economic storage ratio and optimal control of hybrid energy capacity combining stabilized wind power fluctuations with compensated predictive errors[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(2): 477-483. (in Chinese)
- [50] BLUDSZUWEIT H, DOMÍNGUEZ J A. Probabilistic energy storage sizing for reducing wind power forecast uncertainty[J]. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 2010, 1(8): 1153-1157.
- [51] 蔡霖霖. 考虑间歇式能源容量价值的储能规划关键技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- CAI J L. Study on energy storage sizing considering the capacity credit of intermittent energy resources[D]. Nanjing: Southeast University, 2019. (in Chinese)
- [52] 罗晓乐,宋洋,徐翔,等. 计及风电不确定性的综合能源系统储能优化配置研究[J]. *东北电力技术*, 2021, 42(12): 18-25+46.
- LUO X L, SONG Y, XU X, et al. Research on optimal allocation of energy storage of integrated energy system considering wind power uncertainty[J]. *Northeast Electric Power Technology*, 2021, 42(12): 18-25+46. (in Chinese)
- [53] 韩晨阳,张鹏,徐金华. 基于电池特性的风电场综合储能优化配置[J]. *现代电力*, 2023, 40(1): 92-99.
- HAN C Y, ZHANG P, XU J H. Optimal configuration of integrated energy storage for wind farms based on battery characteristics[J]. *Modern Electric Power*, 2023, 40(1): 92-99. (in Chinese)
- [54] 李焱坤. 基于合作博弈的电网侧-用户侧储能系统容量优化配置及经济性评估[D]. 南京: 东南大学, 2020.

- LI Y K. Capacity optimization and economic evaluation of grid-side and user-side energy storage system based on cooperative game[D]. Nanjing: Southeast University, 2020. (in Chinese)
- [55] 李笑竹, 陈来军, 杜锡力, 等. 发电侧共享储能运营机制与交易模式研究综述[J]. 电气工程学报, 2023, 18(1): 188-200.
LI X Z, CHEN L J, DU X L, et al. Research status and prospect of shared energy storage operation mechanism and trading mode on generation side[J]. Journal of Electrical Engineering, 2023, 18(1): 188-200. (in Chinese)
- [56] SUN L L, QIU J, HAN X, et al. Capacity and energy sharing platform with hybrid energy storage system: An example of hospitality industry[J]. Applied Energy, 2020, 280(4): 115897.
- [57] 杨帆, 王维庆, 程静, 等. 基于误差分配原则的发电侧共享储能容量规划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 91-102.
YANG F, WANG W Q, CHENG J, et al. Capacity planning of shared energy storage on the generation side based on the error distribution principle[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 91-102. (in Chinese)
- [58] 刘寅韬, 江全元, 耿光超, 等. 基于合作联盟的电化学储能共享模式研究[J/OL]. 电网技术, 2023: 1-12. (2023-07-18). https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=vYzgd5_tBo_cu9oYTwlhOrT6OK6vIUMHBH6l3H6QeIqdYcdxftsr0OTNqMoqtKjJx7BB-ltIGKEWfD-rwoExFS406HNjZNVxA00fjeTHj84u7_-WfeiOVndSOtReO-6gvCd8j8XNVPSk=&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- LIU Y T, JIANG Q Y, GENG G C, et al. Research on the sharing model of electrochemical energy storage based on cooperative alliance[J/OL]. Power System Technology, 2023: 1-12. (2023-07-18). https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=vYzgd5_tBo_cu9oYTwlhOrT6OK6vIUMHBH6l3H6QeIqdYcdxftsr0OTNqMoqtKjJx7BB-ltIGKEWfD-rwoExFS406HNjZNVxA00fjeTHj84u7_-WfeiOVndSOtReO-6gvCd8j8XNVPSk=&uniplatform=NZKPT&language=CHS. (in Chinese)
- [59] 许高秀, 王旭, 邓晖, 等. 考虑调频需求及风光出力不确定性的储能系统参与能量-调频市场运行策略[J]. 电网技术, 2023, 47(6): 2317-2329.
XU G X, WANG X, DENG H, et al. Optimal operation strategy of energy storage system's participation in energy and regulation market considering uncertainties of regulation requirements and wind-photovoltaic output[J]. Power System Technology, 2023, 47(6): 2317-2329. (in Chinese)
- [60] 王珣, 刘瑾, 沈玮. 基于区块链技术的非合作博弈共享储能交易模型[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2022, 14(5): 595-603.
WANG X, LIU J, SHEN W. Non-cooperative game trading model for shared energy storage based on blockchain[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology(Natural Science Edition), 2022, 14(5): 595-603. (in Chinese)
- [61] 康重庆, 刘静琨, 张宁. 未来电力系统储能的新形态: 云储能[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(21): 2-8+16.
KANG C Q, LIU J K, ZHANG N. A new form of energy storage in future power system: Clode energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 2-8+16. (in Chinese)
- [62] 张青苗, 陈来军, 马恒瑞, 等. 基于主从博弈的共享储能分时电价策略[J]. 智慧电力, 2022, 50(7): 82-88.
ZHANG Q M, CHEN L J, MA H R, et al. Time-of-use price strategy for shared energy storage based on stackelberg game[J]. Smart Power, 2022, 50(7): 82-88. (in Chinese)
- [63] TUSHAR W, CHAI B, YUEN C, et al. Energy storage sharing in smart grid: A modified auction-based approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(3): 1462-1475.
- [64] 孙海霞, 朱立位, 韩钰倩, 等. 基于非合作博弈的微网混合储能容量配置方法[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(5): 454-463.
SUN H X, ZHU L W, HAN Y Q, et al. Capacity configuration method of hybrid energy storage system in microgrids based on a non-cooperative game model[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(5): 454-463. (in Chinese)
- [65] ZHANG W, VALENCIA A, GU L X, et al. Integrating emerging and existing renewable energy technologies into a community-scale microgrid in an energy-water nexus for resilience improvement[J]. Applied Energy, 2020, 279: 115716.
- [66] WANG J J, CHEN Y Z, LIOR N. Exergo-economic analysis method and optimization of a novel photovoltaic/thermal solar-assisted hybrid combined cooling, heating and power system[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 199: 111945.
- [67] GUANDALINI G, CAMPANARI S, ROMANO M C. Power-to-gas plants and gas turbines for improved wind energy dispatchability: Energy and economic assessment[J]. Applied Energy, 2015, 147: 117-130.
- [68] 张儒峰, 姜涛, 李国庆, 等. 考虑电转气消纳风电的电-气综合能源系统双层优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(19): 5668-5678.
ZHANG R F, JIANG T, LI G Q, et al. Bi-level optimization dispatch of integrated electricity-natural gas systems considering P2G for wind power accommodation[J]. Proceeding of the CSEE, 2018, 38(19): 5668-5678. (in Chinese)

- [69] QU K P, ZHENG B M, YU T, et al. Convex decoupled-synergetic strategies for robust multi-objective power and gas flow considering power to gas[J]. *Energy*, 2019, 168: 753-771.
- [70] 蔡瑶, 卢志刚, 潘尧, 等. 计及多重差异的交直流混合多能微网多时间尺度优化调度[J/OL]. *电工技术学报*, 2023: 1-19. (2023-07-14). https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=vYzgd5_tBo8bP37_jmKvMpiDpebeYbkmZy11FUF58kebRGXgkIaLGcrJ-hS5dOUP47Rt15iv7u9Pu_GBjNBbc3qYdgMoEyO8dg48RtG9If0Sd47llwuyeZsO-Xxsj0Hg-AGkUvLBI3WA=&uniplatform=NZK-PT&language=CHS.
- CAI Y, LU Z G, PAN Y, et al. Multi-time-scale optimal scheduling of AC-DC hybrid multi-energy microgrid considering multiple differences[J/OL]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023: 1-19. (2023-07-14). https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=vYzgd5_tBo8bP37_jmKvMpiDpebeYbkmZy11FUF58kebRGXgkIaLGcrJ-hS5dOUP47Rt15iv7u9Pu_GBjNBbc3qYdgMoEyO8dg48RtG9If0Sd47llwuyeZsO-Xxsj0Hg-AGkUvLBI3WA=&uniplatform=NZKPT&language=CHS. (in Chinese)
- [71] 汤翔鹰, 胡炎, 耿琪, 等. 考虑多能灵活性的综合能源系统多时间尺度优化调度[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(4): 81-90.
- TANG X Y, HU Y, GENG Q, et al. Multi-time-scale optimal scheduling of integrated energy system considering multi-energy flexibility[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(4): 81-90. (in Chinese)
- [72] ZHENG B S, WEI W, CHEN Y, et al. A peer-to-peer energy trading market embedded with residential shared energy storage units[J]. *Applied Energy*, 2022, 308: 118400.
- [73] 陈岑, 武涛涛, 康慨, 等. 基于改进Owen值法的分布式储能双层合作博弈优化策略[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(11): 3924-3936.
- CHEN C, WU C T, KANG K, et al. Optimal strategy of distributed energy storage two-layer cooperative game based on improved Owen-value method[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(11): 3924-3936. (in Chinese)
- [74] 黄森, 姚骏, 钟勤敏, 等. 含跟网和构网型新能源发电单元的混联电力系统暂态同步稳定分析[J/OL]. *中国电机工程学报*, 2023: 1-14. (2023-08-02). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20230801.1732.002.html>.
- HUANG S, YAO J, ZHONG Q M, et al. Transient synchronization stability analysis of hybrid power system with grid-following and grid-forming renewable energy generation units[J/OL]. *Proceedings of the CSEE*, 2023: 1-14. (2023-08-02). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20230801.1732.002.html>. (in Chinese)
- [75] 马文杰, 张波, 丘东元, 等. 跟网型并网逆变器的稳定域重塑控制策略研究综述[J]. *电气工程学报*, 2023, 18(2): 34-51.
- MA W J, ZHANG B, QIU D Y, et al. Control strategy to reshape the stable region for grid-following converter: An overview[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2023, 18(2): 34-51. (in Chinese)
- [76] 苏文涛. 非理想电网下LCL型并网逆变器控制技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- SU W T. Study on the control technology of LCL grid-connected inverter under non-ideal power grid[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2020. (in Chinese)
- [77] 杨天翔, 程志江, 杨涵棣, 等. 基于自抗扰控制的风电并网逆变器锁相环设计[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(4): 147-155.
- YANG T X, CHENG Z J, YANG H D, et al. Design of phase-locked loop of grid connected converter based on active disturbance rejection control[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2023, 44(4): 147-155. (in Chinese)
- [78] 周野, 崔双喜, 樊小朝, 等. 应用于负序电流补偿的无锁相环并网逆变器控制策略[J]. *电气传动*, 2022, 52(15): 46-52.
- ZHOU Y, CUI S X, FAN X C, et al. Grid-tied inverter control strategy without PLL for compensating negative sequence current[J]. *Electric Drive*, 2022, 52(15): 46-52. (in Chinese)
- [79] 张兴, 李明, 郭梓暄, 等. 新能源并网逆变器控制策略研究综述与展望[J]. *全球能源互联网*, 2021, 4(5): 506-515.
- ZHANG X, LI M, GUO Z X, et al. Review and perspectives on control strategies for renewable energy grid-connected inverters[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2021, 4(5): 506-515. (in Chinese)
- [80] 季一宁, 王海风. 包含串补的并网直驱风电场振荡稳定性及可行域分析[J]. *电工技术学报*, 2024, 39(3): 686-698.
- JI Y N, WANG H F. Analysis of oscillation stability and feasible region of parameters in grid-connected direct-drive wind farm with series compensation[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024, 39(3): 686-698. (in Chinese)
- [81] 钱强, 张犁, 谢少军, 等. 基于谐波传递函数矩阵的单相并网系统建模研究[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(12): 4132-4144.
- QIAN Q, ZHANG L, XIE S J, et al. Research on the modeling of single-phase grid-connected system based on the harmonic transfer function matrix[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(12): 4132-4144. (in Chinese)
- [82] SUN J. Small-signal methods for AC distributed power systems: A review[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, 24(11): 2545-2554.
- [83] GELB A, VELDE W E V. Multiple-input describing functions and nonlinear system design[M]. New York: McGraw-Hill, 1968.

- [84] ZHANG C, MOLINAS M, FØYEN S, et al. Harmonic-domain SISO equivalent impedance modeling and stability analysis of a single-phase grid-connected VSC[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(9): 9770-9783.
- [85] QIAN Q, XIE S J, XU J M, et al. Output impedance modeling of single-phase grid-tied inverters with capturing the frequency-coupling effect of PLL[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(5): 5479-5495.
- [86] 张旻, 陈新, 王昀, 等. 弱电网下并网逆变器的阻抗相角动态控制方法[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(1): 97-106.
ZHANG Y, CHEN X, WANG Y, et al. Impedance-phased dynamic control method of grid-connected inverters under weak grid condition[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(1): 97-106. (in Chinese)
- [87] 杨思为, 张兴, 毛旺, 等. 弱电网下级联H桥光伏并网逆变器稳定性分析[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(1): 398-405.
YANG S W, ZHANG X, MAO W, et al. Stability analysis of CHB photovoltaic grid-connected inverter in weak grid[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2022, 43(1): 398-405. (in Chinese)
- [88] 杜燕, 崔林波, 杨向真, 等. 并网逆变器的阻抗自适应控制方法[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(6): 120-127.
DU Y, CUI L B, YANG X Z, et al. Adaptive control method of impedance for grid-connected inverters[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(6): 120-127. (in Chinese)
- [89] HUANG R M, ZHANG M Y, LI Z Z, et al. Influence of SOGI bandwidth on stability of single phase inverter in weak grid[C]//IECON 2020 - The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Singapore. IEEE, 2020: 3779-3784.
- [90] XU J M, QIAN Q, ZHANG B F, et al. Harmonics and stability analysis of single-phase grid-connected inverters in distributed power generation systems considering phase-locked loop impact[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2019, 10(3): 1470-1480.
- [91] 屈子森. 高比例新能源电力系统电压源型变流器同步稳定性分析与控制技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
QU Z S. Synchronizing stability analysis and control technology of voltage source converters in power system with high-penetration renewables[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021. (in Chinese)
- [92] 孙孝峰, 王娟, 田艳军, 等. 基于自调节下垂系数的DG逆变器控制[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(36): 71-78+11.
SUN X F, WANG J, TIAN Y J, et al. Control of DG connected inverters based on self-adaptable adjustment of droop coefficient[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(36): 71-78+11. (in Chinese)
- [93] 曾正, 邵伟华. 基于线性化模型的虚拟同步发电机惯性和阻尼辨识[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(10): 37-43+81.
ZENG Z, SHAO W H. Estimation of inertia and damping for virtual synchronous generator based on linearized model[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(10): 37-43+81. (in Chinese)
- [94] 刘彦呈, 庄绪州, 张勤进, 等. 基于虚拟频率的直流微电网下垂控制策略[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(8): 1693-1702.
LIU Y C, ZHUANG X Z, ZHANG Q J, et al. A virtual current-frequency droop control in DC microgrid[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(8): 1693-1702. (in Chinese)
- [95] KULKARNI S V, GAONKAR D N. Improved droop control strategy for parallel connected power electronic converter based distributed generation sources in an islanded microgrid[J]. *Electric Power Systems Research*, 2021, 201: 107531.
- [96] SHI K, CHEN C, SUN Y X, et al. Rotor inertia adaptive control and inertia matching strategy based on parallel virtual synchronous generators system[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2020, 14(10): 1854-1861.
- [97] TURK A, SANDELIC M, NOTO G, et al. Primary frequency regulation supported by battery storage systems in power system dominated by renewable energy sources[J]. *The Journal of Engineering*, 2019, 2019(18): 4986-4990.
- [98] MENG L X, ZAFAR J, KHADEM S K, et al. Fast frequency response from energy storage systems: A review of grid standards, projects and technical issues[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(2): 1566-1581.
- [99] 崔曦文. 电池储能电源辅助电网一次调频的控制模型与策略研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
CUI X W. Study on the control models and strategy of battery energy storage participating in primary frequency regulation[D]. Changsha: Hunan University, 2019. (in Chinese)
- [100] 黄际元, 李欣然, 曹一家, 等. 考虑储能参与快速调频动作时机与深度的容量配置方法[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(12): 454-464.
HUANG J Y, LI X R, CAO Y J, et al. Capacity allocation of energy storage system considering its action moment and output depth in rapid frequency regulation[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(12): 454-464. (in Chinese)