

废弃矿井残余煤层气开采多能互补直流微电网关键技术及瓶颈问题

王浩^{1,2}, 李斌^{1,2}, 王雨婷¹, 李绍令^{1,2}, 张国澎^{1,2}, 杨大山³, 白利军⁴, 王聪⁵

(1. 河南理工大学 电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454003; 2. 河南省煤矿装备智能检测与控制重点实验室, 河南 焦作 454003; 3. 煤炭科学技术研究院有限公司, 北京 100013; 4. 山西蓝焰煤层气集团有限责任公司, 山西 晋城 048204; 5. 中国矿业大学(北京) 机电与信息工程学院, 北京 100083)

摘要:从废弃矿井残留能源与空间资源协同利用出发,在废弃矿井绿色低碳多能互补体系框架下,统筹考虑废弃矿井采空区煤层气开采活动用电需求与采煤沉陷区可再生能源发电潜力,以及低浓度瓦斯发电和储能作为补充,提出探索构建集成风-光-气-储的废弃矿井残余煤层气开采多能互补直流微电网系统。相较于普通直流微电网,低系统惯量、弱电网连接、分布式发电随机波动和周期变工况负荷大扰动等多重不利因素叠加使得废弃矿井残余煤层气开采多能互补直流微电网系统稳定运行面临更加严峻的挑战。为此,有必要围绕废弃矿井残余煤层气开采多能互补直流微电网系统这一废弃矿井残留能源与空间资源协同利用潜在场景涉及的关键技术及背后的瓶颈问题展开系统梳理与探讨。首先,阐述了废弃矿井残余煤层气开采多能互补直流微电网系统的拓扑结构与组成单元,并从能量流动模型出发探讨了在寻求系统容量优化配置过程中需要考虑的约束条件。接着,提炼出煤层气抽采机电动机周期变工况负荷分析、低浓度瓦斯发电机电气-电转换环节耦合、电压稳定控制及协调运行等破解废弃矿井残余煤层气开采多能互补直流微电网系统可靠稳定及协调运行难题涉及的关键技术,总结和回顾了已有研究进展,分析了目前工作存在的难点和问题,同时探讨了可能的解决方法及后续工作建议。进一步指出亟待攻克低浓度瓦斯发电机电气-电耦合长时间尺度与风光储短时间尺度联合建模,以及低惯量、弱连接、大扰动等多重不利因素作用导致的电压振荡机理等关键技术背后的核心瓶颈问题。最后,从已有工作基础、研究进展及经济效益评估等方面展望了构建废弃矿井残余煤层气开采多能互补直流微电网系统的可行性及应用前景。

关键词:废弃矿井;煤层气;多能互补;直流微电网;关键技术;瓶颈问题;可行性

中图分类号:TD612 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2023)04-1798-16

Key technologies and bottlenecks of multi-energy complementary DC microgrid for residual coalbed methane drainage in abandoned mine

WANG Hao^{1,2}, LI Bin^{1,2}, WANG Yuting¹, LI Shaoling^{1,2}, ZHANG Guopeng^{1,2}, YANG Dashan³, BAI Lijun⁴, WANG Cong⁵

收稿日期: 2022-09-06 修回日期: 2023-03-24 责任编辑: 郭晓炜 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2022.1289

基金项目: 河南省自然科学基金资助项目(212300410147); 河南省高校基本科研业务费专项资金资助项目(NSFRF230419); 河南理工大学青年骨干教师计划资助项目(2022XQG-15)

作者简介: 王浩(1988—),男,河南焦作人,讲师,硕士生导师,博士。E-mail: wangh@hpu.edu.cn

通讯作者: 张国澎(1981—),男,河南焦作人,副教授,硕士生导师,博士。E-mail: zhangguopeng@hpu.edu.cn

引用格式: 王浩,李斌,王雨婷,等.废弃矿井残余煤层气开采多能互补直流微电网关键技术及瓶颈问题[J].煤炭学报,2023,48(4):1798-1813.

WANG Hao, LI Bin, WANG Yuting, et al. Key technologies and bottlenecks of multi-energy complementary dc microgrid for residual coalbed methane drainage in abandoned mine[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(4): 1798-1813.



移动阅读

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2. Henan Key Laboratory of Intelligent Detection and Control of Coal Mine Equipment, Jiaozuo 454003, China; 3. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 4. Shanxi Lanyan Coal-bed Methane Group Co., Ltd., Jincheng 048204, China; 5. School of Mechanical Electronic & Information Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In terms of the collaborative utilization of residual energy and space resources in abandoned mines, under the framework of a green low-carbon multi-energy complementary system, a multi-energy complementary DC microgrid integrating wind-solar-gas-storage for residual CBM drainage in abandoned mine was proposed and constructed with the consideration of both the electricity demand of coalbed methane (CBM) in the abandoned mine goaf and the power generation potential of renewable energies in coal mining subsidence areas, as well as the low-concentration gas power generation and energy storage as supplements. Compared with the common DC microgrids, the superposition of multiple unfavorable factors such as low system inertia, weak grid connection, random changes in distributed power generation and large fluctuations in periodically variable working condition load makes the stable operation of the multi-energy complementary DC microgrid for residual CBM drainage face become a more severe challenges. Therefore, it is necessary to systematically discuss and investigate the key technologies and bottlenecks involved in the multi-energy complementary DC microgrid for residual CBM drainage in abandoned mine which is a potential scenario of collaborative utilization of residual energy and space resources in abandoned mines. First, the topology and components of a multi-energy complementary DC microgrid for residual CBM drainage were described, and the constraints that need to be considered in the system capacity optimization were discussed based on an energy flow model. Then, the key technologies including periodically variable working condition load analysis of CBM pumping motor, coupling of gas-electric conversion link of low-concentration gas generator, voltage stabilization control and system coordinated operation involved in achieving reliable, stable and coordinated operation of multi-energy complementary DC microgrid for residual CBM drainage in abandoned mine were concluded. The recent research progresses were summarized and reviewed, the difficulties and problems existed in the current work were analyzed, and some possible solutions and suggestions for following work were discussed. Furthermore, it is pointed out that it is urgent to address the bottleneck issues behind the key technologies such as the joint modeling method of both gas-electric coupling long-time scale of the low-concentration gas generator and short-time scale of wind-solar-storage, as well as the bus voltage oscillation mechanism caused by multiple unfavorable factors such as low inertia, weak connection and large disturbance. Finally, the feasibility and application prospect of constructing a multi-energy complementary DC microgrid for residual CBM drainage in abandoned mine were prospected from the aspects of existing work basis, research progress and economic benefits assessment.

Key words: abandoned mine; coalbed methane; multi-energy complementarity; DC microgrid; key technologies; bottlenecks; feasibility

近年来,由于煤炭资源持续开采及淘汰落后产能需要,一批资源枯竭及产能落后煤矿加速关闭,废弃矿井数量日益增加。“十三五”期间,全国累计淘汰落后煤矿约5500处,预计到“十四五”末将有1.5万处煤矿关闭退出。废弃矿井蕴藏资源丰富,具备较大开发潜力和利用价值^[1]。据估算,目前废弃矿井赋存煤炭资源量高达420亿t以上,残余煤层气近5000亿m³,此外还有丰富的水、地热和空间资源等。加快推进废弃矿井能源资源开发利用,释放负碳增能潜力,对促进煤炭资源高效回收、增强能源安全保障能力和科学有序实现“双碳”目标具有重要意义^[2]。

围绕废弃矿井能源资源开发利用这一关键问题,目前主要从地下空间开发、尾矿资源开采和可再生能

源利用等方面开展研究。谢和平院士等^[3]从煤炭开采形成的巨大地下空间出发,提出利用废弃矿井开采空间发展井下抽水蓄能电站的构想。梁杰等^[4]从深部煤炭气化开采出发,提出利用煤炭地下气化技术实现废弃矿井遗留煤炭资源原位开采的思路。孟召平等^[5]通过研究废弃矿井采空区煤层气赋存特征,探索出适合废弃矿井煤层气抽采的参数优化方法。浦海等^[6]从发挥顶板垮落后采空区储水优势出发,提出废弃矿井地热资源循环利用新途径。此外,采煤沉陷区光伏发电、地下空间油气存储及压缩空气储能等也正成为废弃矿井能源资源优化利用的重要方向^[7-9]。然而,以往的研究更加关注废弃矿井残余能源或空间资源的单一开发利用,忽略了2者的协同。尽管井下抽水蓄

能实现了采煤沉陷区光伏发电与开采空间的有效结合^[10],但仍属于废弃矿井空间资源纵向利用的范畴。

为此,袁亮院士等^[11]在对废弃矿井绿色低碳多能互补体系建设深度思考的基础上,凝练了包括废弃矿井分布式智能电网在内的7个主要研究方向,为利用废弃矿井可再生能源发电及发展多能互补微电网指明了典型应用场景和具体实施路径。因此,笔者在废弃矿井绿色低碳多能互补体系框架下,从废弃矿井残留能源与空间资源协同利用角度出发,统筹考虑废弃矿井采空区煤层气开采活动用电需求和采煤沉陷区可再生能源发电潜力,辅以低浓度瓦斯发电和储能作为补充,提出探索构建集成风-光-气-储的废弃矿井残余煤层气开采多能互补直流微电网系统。该直流微电网系统通过联合风-光-气-储多能互补取代传统煤层气开采交流输电系统,不仅可以避免交流系统无功损耗和电能质量恶化,还能发挥采煤沉陷区风光资源优势,最大程度实现绿色低碳能源供应。此外,通过低浓度瓦斯就地转化利用实现风-光-气-储多能互补,还能有效满足废弃矿井采空区残余煤层气开采活动所需电能,这对推动废弃矿井残留能源与空间资源协同利用及促进多能互补微电网发展具有积极的示范意义。

与普通直流微电网不同,废弃矿井残余煤层气开采多能互补直流微电网除高渗透可再生能源和高比例电力电子装置接入导致的系统转动惯量小及自身调压能力不足外^[12],还面临与大电网弱连接甚至无连接从而缺乏有效外部支撑的困难^[13]。此外,驱动煤层气抽采机运行的电动机在一个周期内交替工作于重载、轻载、空载和发电状态,使得反映在逆变器-电动机-煤层气抽采机系统端口呈现的周期变工况负荷引起母线电压剧烈波动^[14]。综上所述,低系统惯量、弱电网连接、分布式发电随机波动和周期变工况负荷大扰动等多重不利因素叠加使得废弃矿井残余煤层气开采多能互补直流微电网系统安稳运行面临更加严峻的挑战。

因此,笔者试图对废弃矿井残余煤层气开采多能互补直流微电网这一废弃矿井残留能源与空间资源协同利用潜在场景涉及的关键技术及瓶颈问题进行梳理、总结与探讨。首先,阐述了废弃矿井残余煤层气开采多能互补直流微电网系统的拓扑结构与组成单元,并从能量流动模型出发探讨了在寻求系统容量优化配置过程中需要考虑的约束条件。接着,提炼出煤层气抽采机电动机周期变工况负荷分析、低浓度瓦斯发电机电-电转换环节耦合、电压稳定控制及协调运行等破解废弃矿井残余煤层气开采多能互补直流

微电网系统可靠稳定及协调运行难题涉及的关键技术,总结和回顾了已有研究进展,分析了目前工作存在的难点和问题,同时探讨了可能的解决方法及后续工作建议。进一步指出亟待攻克低浓度瓦斯发电机电-电耦合长时间尺度与风光储短时间尺度联合建模,以及低惯量、弱连接、大扰动等多重不利因素作用导致的电压振荡机理等关键技术背后的核心瓶颈问题。最后,从已有工作基础、研究进展及经济效益评估等方面展望了构建废弃矿井残余煤层气开采多能互补直流微电网系统的可行性及应用前景。

1 废弃矿井残余煤层气开采多能互补直流微电网系统

1.1 拓扑结构

集成风-光-气-储的废弃矿井残余煤层气开采多能互补直流微电网系统,如图1所示。该多能互补直流微电网系统除利用采煤沉陷区构建风光发电及储能单元,并通过直流母线向逆变器-电动机-煤层气抽采机系统供电外,还通过回收煤层气抽采机排采出来的低浓度瓦斯(体积分数小于30%),采用瓦斯发电向系统回馈电能。在这其中,风机和光伏分别通过buck变换器和boost变换器与直流母线连接,且均工作于最大功率点跟踪模式(Maximum Power Point Tracking, MPPT);蓄电池储能通过双向buck/boost变换器与直流母线连接,从而工作于充电/放电模式;直流母线通过逆变器向电动机供电,从而驱使后者拖动煤层气抽采机运行;对于煤层气抽采机排采出来的煤层气,一部分(体积分数小于30%)通过瓦斯发电向系统回馈电能,另一部分(体积分数大于30%)通过输气管网外送。

需要注意的是,废弃矿井残余煤层气开采多能互补直流微电网可运行于孤岛或并网模式,但由于煤层气开采区大多位于偏远地区,传统交流送电线路距离长,线路阻抗大,交流主网较弱,煤层气地面开采直流微电网表现为与交流主网连接较弱或无连接,因此研究孤岛模式下的系统稳定控制及协调运行更具实际价值。此外,受自身容量限制及分布式电源输出功率随机波动影响,孤岛模式下难以长时间满负荷甚至超负荷运行。因此,该文更加关注在系统容量范围内煤层气抽采机电动机周期变工况负荷及分布式发电随机波动引起的母线电压振荡及应对措施。

1.2 容量配置

废弃矿井残余煤层气开采多能互补直流微电网系统的容量配置及优化需以能量流动模型为依据,如图2所示,其中, f_{CPU} 为煤层气抽采机抽采出来的瓦斯

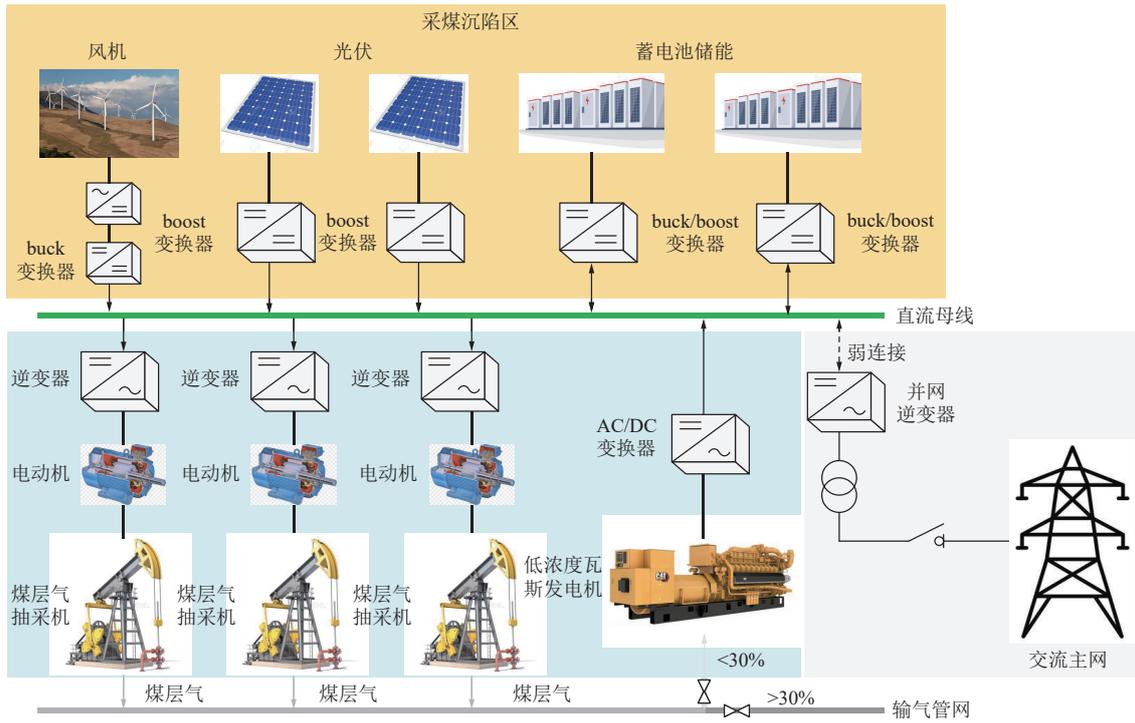


图 1 废弃矿井残余煤层气开采多能互补直流微电网

Fig.1 Multi-energy complementary DC MG for residual CBM drainage in abandoned mine

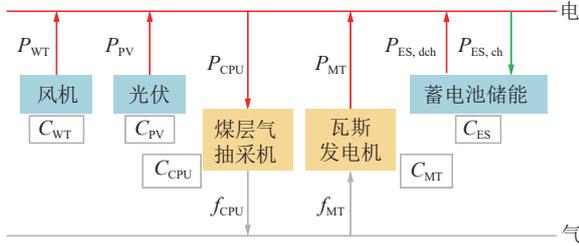


图 2 能量流动模型

Fig.2 Energy flow model

气体流量; f_{MT} 为低浓度瓦斯发电机获取的瓦斯气体流量。

结合图 2 所示能量流动模型, 考虑系统功率平衡、各发电单元出力、储能单元荷电状态及微电网自治能力等因素^[15], 一种可能的约束关系如下:

$$P_{WT} + P_{PV} + P_{MT} + P_{ES,dch} = P_{CPU} + P_{ES,ch} \quad (1)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{WT} \leq C_{WT} \\ 0 \leq P_{PV} \leq C_{PV} \\ 0 \leq P_{MT} \leq \eta_{MT} C_{MT} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{ES,ch} \leq \gamma_{ch} C_{ES} \\ 0 \leq P_{ES,dch} \leq \gamma_{dch} C_{ES} \\ Q_{min} \leq Q \leq Q_{max} \end{cases} \quad (3)$$

$$\frac{P_{WT} + P_{PV}}{P_{CPU}} \geq \beta \quad (4)$$

式中, P_{WT} 、 P_{PV} 和 P_{MT} 分别为风机、光伏和瓦斯发电

机的输出功率; P_{CPU} 为煤层气抽采机负荷功率; C_{WT} 、 C_{PV} 、 C_{MT} 和 C_{ES} 分别为风机、光伏、瓦斯发电机和蓄电池储能的装机容量; η_{MT} 为瓦斯发电机的发电效率; $P_{ES,ch}$ 、 $P_{ES,dch}$ 分别为蓄电池储能充/放电功率; γ_{ch} 、 γ_{dch} 分别为蓄电池储能最大充/放电倍率, 即最短充/放电时间的倒数, 因此 $\gamma_{ch} C_{ES}$ 、 $\gamma_{dch} C_{ES}$ 分别为最大充/放电功率; Q 、 Q_{min} 、 Q_{max} 分别为蓄电池储能的荷电状态及荷电状态上、下限; β 为微电网自治能力约束的下限。

同时, 在系统运行过程中, 光伏和风机等可再生能源发电通过相应接口变换器实现功率输出, 蓄电池储能单元通过双向接口变换器与直流母线进行能量交互。因此, 在优化配置过程中还应考虑电力电子变换器容量约束条件。具体地, 上述各分布式发电与储能接口变换器可根据系统内能量盈亏, 通过功率指令 P_{cmd} 调节各出力单元传输功率大小, 在达到各自接口变换器容量极限时, 以额定功率运行。约束条件可表达为

$$P_j = \begin{cases} 0, & P_{j,cmd} = 0 \\ P_{j,cmd}, & |P_{j,cmd}| \leq P_{j,rate} \\ P_{j,rate}, & |P_{j,cmd}| > P_{j,rate} \end{cases} \quad (5)$$

式中, P_j 为各出力单元传输功率, 且 $j=P_{V}$ 、 WT 、 ES ; $P_{j,cmd}$ 为各接口变换器功率指令; $P_{j,rate}$ 为各接口变换器额定功率。

此外, 蓄电池使用寿命随充/放电次数、深度及环境温度影响, 在达到有效循环次数后, 蓄电池组将失

效并需要进行更换。因此,为使优化配置更加合理,有必要在上述约束条件基础上考虑蓄电池储能寿命评估模型,并计入优化配置过程。通常采用的寿命评估方法包括曲线拟合法^[16]、雨流计数法^[17]、等效电量权重法^[18]等。基于以上约束条件,以等年值投资成本和全年运营成本为优化目标函数,可采用多目标粒子群优化算法(MOPSO)深入寻找系统容量配置优化方案。

2 废弃矿井残余煤层气开采多能互补直流微电网系统关键技术

2.1 煤层气抽采机电动机周期变工况负荷分析

驱动图3所示煤层气抽采机运行的电动机在一个周期内交替工作于重载、轻载、空载和发电状态,图3中, R 、 P 、 A 和 C 分别为四连杆的曲柄、连杆、游梁前臂和游梁后臂; L 为曲柄圆周到 O_1 之间的距离; K 为曲柄圆心 O 到 O_1 之间的距离; H 、 I 分别为 K 的垂直和水平投影; α 为 K 与 H 之间的夹角; β 为 L 与 K 之间的夹角; β_1 为 C 与 P 之间的夹角; γ 为 L 与 C 之间的夹角; φ 为 C 与 K 之间的夹角; θ_2 为 R 与 K 之间的夹角; θ_3 为 P 与 K 之间的夹角; θ 、 θ_4 分别定义为曲柄角位移和游梁后臂角位移。使得反映在逆变器-电动机-煤层气抽采机系统端口呈现的周期变工况负

荷引起母线电压剧烈波动。深入开展周期变工况负荷这一有别于恒功率或恒转矩负荷的分析及模拟研究,是揭示母线电压振荡机理的基础,也是废弃矿井残余煤层气开采多能互补直流微电网系统亟待攻克的首要关键技术问题。

针对周期变工况负荷分析及模拟,目前主要采用包括基于悬点载荷的离线计算和基于负载扭矩的实时补偿2种方法。离线计算以四连杆侧悬点载荷变化规律为基础,通过离线求解考虑杆柱震动的一维波动方程,为抽采机行为预测及结构优化提供参考,但由于运算耗时长,无法满足负荷模拟的实时性要求^[19]。实时补偿以电机侧负载扭矩为参考,通过调整平衡配重及井下摩擦力参数值大小补偿模型误差,实现对抽采机动态负荷的精确在线模拟^[20]。为了进一步分析不同运行条件下的系统能耗状况,文献[21]在模拟游梁式抽油机动态负荷的基础上,建立了考虑电机磁路饱和及杆柱波动的有杆泵排采系统仿真模型。文献[22-23]从采用断续供电技术判定断电时刻出发,通过参数辨识进一步跟踪动态负荷变化及电动、发电工况持续时间。然而,上述方法运算量大,硬件要求高,且缺少算法优化。

综上所述,由于煤层气抽采机与油田抽油机在结构上具有相似之处,目前以油田抽油机为主的研究可为煤层气抽采机周期变工况负荷分析及模拟提供一定参考。但是,煤层气排采条件与石油天然气矿场存在较大差别,具有井浅、沉没度低、排液量小、冲程小和冲次低等特点^[24],需围绕煤层气抽采机周期变工况负荷分析及模拟开展专门研究及技术攻关。

进一步地,从建立废弃矿井残余煤层气开采多能互补直流微电网多时间尺度模型出发,根据四连杆几何关系和质块运动模型推导煤层气抽采机等效负载转矩及运动方程,从端口特性出发利用复转矩分析理论构造逆变器-电动机-煤层气抽采机系统的复电路,通过坐标变换建立极坐标下的逆变器-电动机-煤层气抽采机系统的广义阻抗模型,或是一种可行的研究思路。这其中需要解决的问题包括复转矩分析模型建立、复电路构造及坐标变换参考角确定等。

2.2 低浓度瓦斯发电机电-电转换环节耦合

开展低浓度瓦斯发电机电-电转换环节耦合研究这一废弃矿井残余煤层气开采多能互补直流微电网系统亟待攻克的第2个关键技术难题,是实现系统可靠稳定运行的基础。低浓度瓦斯发电机本质上是一种实现不同类型能源转换的耦合单元,涉及描述耦合单元能源转换的方法主要有能量枢纽模型和等效电路模型2种。

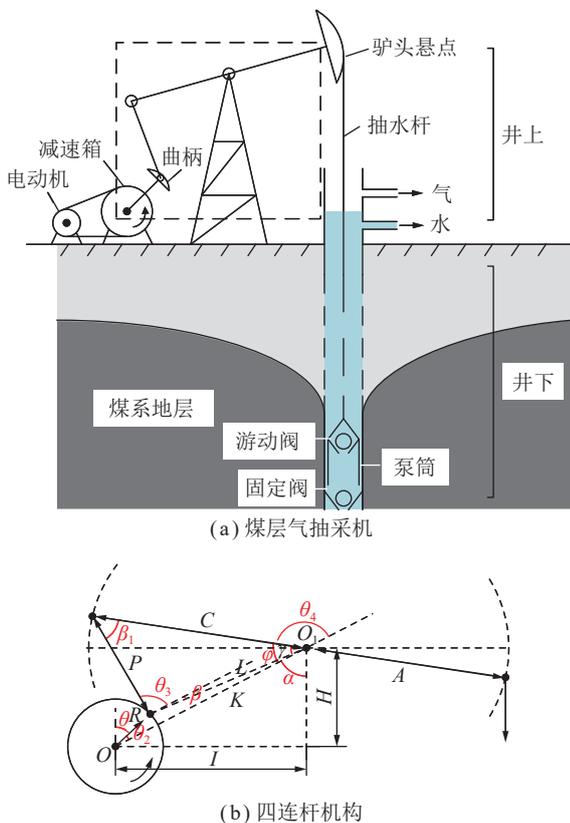


图3 煤层气抽采机及其四连杆机构

Fig.3 CBM pumping unit and its four-bar linkage

2.2.1 能量枢纽模型

能量枢纽 (energy hub, EH) 是描述多种形式能源输入输出及存储、耦合关系的端口模型^[25], 利用耦合矩阵给出的能量枢纽模型表达式如下:

$$\mathbf{L} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{P} \quad (6)$$

式中, \mathbf{L} 为能量输出向量, 且 $\mathbf{L} = (L_1, L_2, \dots, L_m)^T$, 其中 $L_i (i=1, 2, \dots, m)$ 为不同类型的能量; \mathbf{P} 为能量输入向量, 且 $\mathbf{P} = (P_1, P_2, \dots, P_n)^T$, 其中 $P_j (j=1, 2, \dots, n)$ 为不同类型的能量; \mathbf{C} 为耦合矩阵, 且

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{m1} & c_{m2} & \dots & c_{mn} \end{pmatrix}, \text{ 其中 } c_{ij} (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n) \text{ 为耦合系数。}$$

耦合矩阵 \mathbf{C} 包括能量输入输出过程中的分配和转换, 其中能源分配是指输入能源按一定比例分配到不同的能源转换设备, 能源转换是指输入能源通过能源转换环节转换为其他类型或形式的能源, 这一过程中存在某 2 种形式能源之间的分配比例和转换效率^[26]:

$$c_{ij} = \lambda_{ij} \eta_{ij} \quad (7)$$

式中, λ_{ij} 为输入能源 i 到输出能源 j 的分配系数; η_{ij} 为输入能源 i 到输出能源 j 的转换效率。其中分配系数 λ_{ij} 需满足:

$$\sum_{j=1}^n \lambda_{ij} = 1 \quad (0 \leq \lambda_{ij} \leq 1) \quad (8)$$

由于低浓度瓦斯发电机是一单输入多输出能量转换装置, 因此利用上述基于耦合矩阵的能量枢纽模型可表示为

$$\begin{pmatrix} L_1 \\ L_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} \\ c_{21} \end{pmatrix} P_1 = \begin{pmatrix} \lambda_{11} \eta_{11} \\ \lambda_{21} \eta_{21} \end{pmatrix} P_1 \quad (9)$$

式中, L_1 、 L_2 分别表示作为输出能源形式的电和热; P_1 表示作为输入能源形式的瓦斯; c_{11} 、 c_{21} 为对应的耦合系数; λ_{11} 、 λ_{21} 和 η_{11} 、 η_{21} 分别为对应的分配系数和转换效率。

2.2.2 等效电路模型

尽管从能量枢纽思路出发建立了表征能源转换环节的输入输出静态关系模型, 但无法反映多能动态耦合特性^[27]。因此, 从准确刻画多能耦合动态特性出发, 一种参考思路是将低浓度瓦斯发电机气-电转换环节解耦为电气子系统、热力子系统和气动子系统^[28], 并对其中的热力、气动子系统进行等效电路建模。这其中的难点是如何揭示动态耦合机理、如何划分不同子系统及寻找合适划分依据。一种可能的子系统划分结构如图 4 所示。

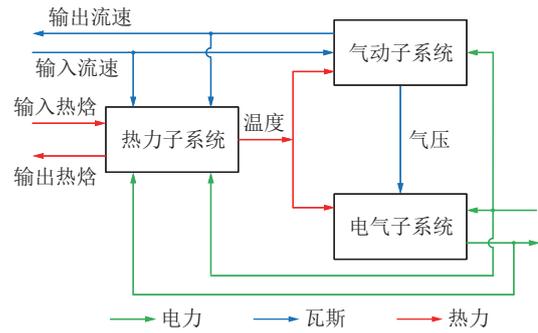


图4 子系统结构

Fig.4 Subsystem configuration

在等效电路建模过程中, 需思考如何计及电、气、热的多时间尺度动态特性, 热力子系统需考虑分钟级及以上时间尺度动态, 如温度对动态特性的影响^[29], 气动子系统需考虑秒级时间尺度动态, 如进气口压力对动态特性的影响、延迟特性和管存效应等^[30]。以热力子系统为例, 一种可能的热力学方程形式^[31]为

$$\begin{cases} C_{th} \frac{dT_{MT}}{dt} = H_{I_{MT}}(H_2) + H_{I_{MT}}(O_2) - H_{I_{MT}}(H_2O) - \\ \quad Q_{conv,an} - Q_{conv,ca} - P_e \\ Q_{conv,an} = k_{an} A_{an} (T_{MT} - T_{n,an}) \\ Q_{conv,ca} = k_{ca} A_{ca} (T_{MT} - T_{n,ca}) \\ P_e = V_{MT} I_{MT} \end{cases} \quad (10)$$

式中, V_{MT} 、 I_{MT} 和 P_e 分别为端电压、输出电流和输出功率; T_{MT} 、 C_{th} 分别为燃料堆温度和等效热容; $H_{I_{MT}}(H_2)$ 、 $H_{I_{MT}}(O_2)$ 和 $H_{I_{MT}}(H_2O)$ 分别为燃烧过程中氢、氧和水的焓值, 大小与气体流速有关^[32]; $Q_{conv,an}$ 、 $Q_{conv,ca}$ 分别为节气门和歧管的对流传热; $T_{n,an}$ 、 $T_{n,ca}$ 分别为节气门和歧管的温度; A_{an} 、 A_{ca} 分别为节气门和歧管的换热面积; k_{an} 、 k_{ca} 分别为节气门和歧管的对流换热系数。

在此基础上, 利用电路比拟法对温度、热传导率、热阻和热容等热力参量进行类电量化处理^[33], 从而构造热力子系统的等效电路模型。热力参量类电量化处理及热力子系统等效电路模型如图 5 所示。

2.3 电压稳定控制

2.3.1 模型建立及稳定性分析

模型建立及稳定性分析是实现电压稳定控制的前提, 针对多变流器互联阻抗不匹配及恒功率负荷欠阻尼引起的系统失稳, 目前主要采用的方法包括小信号分析法和大信号分析法 2 种。

(1) 小信号分析法。

小信号分析是指通过平衡点附近的线性化处理, 利用 Bode 图、Nyquist 判据和根轨迹等经典控制理论对线性化模型进行分析, 进而指导控制器参数设计。

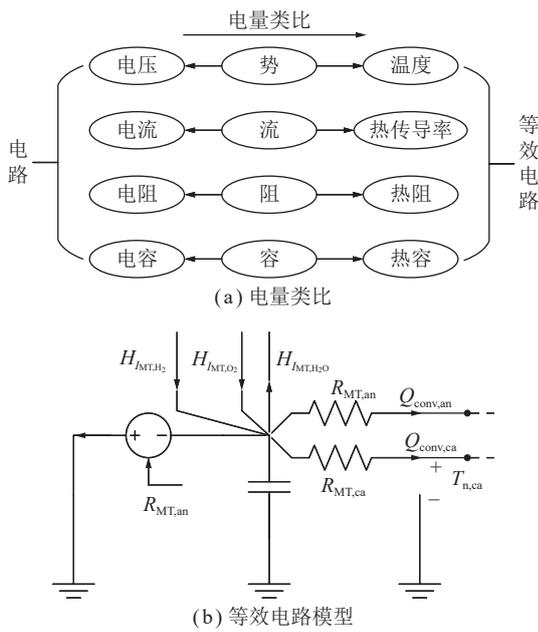


图 5 类电量化处理及等效电路模型

Fig.5 Electricity analogy processing and equivalent circuit modeling

文献 [34] 通过建立两相同步旋转坐标系下的风电直流微电网小信号模型, 利用阻抗比判据详细分析了孤岛模式下的级联系统稳定性。文献 [35] 采用小信号方法建立了含源端双有源桥变换器直流微电网的阻抗模型, 分析了储能元件不同工作模式对系统稳定性的影响。文献 [36] 通过构建基于灵活虚拟惯性控制的六端直流微电网小信号模型, 利用灵敏度计算及根轨迹分析揭示了主要控制参数变化对系统虚拟惯性及直流电压稳定性的影响规律。

进一步地, 文献 [37] 针对柔性互联交直流微电网集群的就地稳定问题, 通过建立交直流微电网集群柔性控制小信号模型, 深入分析了控制器参数对系统稳定性的影响。文献 [38] 从恒功率负荷大量接入可能导致的系统振荡出发, 通过分析恒功率负荷聚合接入引起的系统失稳机理, 提出了一种基于 Nyquist 判据的直流微电网稳定估计方法。文献 [39] 针对混联多微电网系统低频范围小信号稳定性, 通过建立并网和孤岛运行状态下的混联微电网多输入多输出模型, 重点分析了由多微电网接入导致的动态交互作用及其对系统稳定性的影响。

然而, 上述从建立直流微电网小信号模型出发, 利用根轨迹或阻抗比判据分析主导极点变化规律的方法, 无法保证大扰动条件下的系统稳定性。此外, 以往的研究重点多聚集在各接口变换器控制器小扰动问题的探讨上, 鲜有系统层面的稳定性分析, 且利用小信号方法指导控制器设计存在动态特性与稳定

裕度之间的矛盾。

(2) 大信号分析法。

为了解决小信号分析存在的固有缺陷, 同时应对分布式电源功率随机波动和负荷频繁投切等大扰动场景, 从大信号角度出发研究模型建立及稳定性分析已成为一种可行方案, 目前主要采用相平面法、Takagi-Sugeno 模糊模型法、混合势函数法和 Lyapunov 直接法等大信号分析方法。

文献 [40] 以平均电流控制的 buck 变换器为研究对象, 通过建立平均大信号模型, 利用相平面法对含恒功率负荷与含电阻性负荷时变换器的起动过程进行了分析比较, 然而, 相平面法本质上是利用图解法求解二阶微分方程, 通过描绘运动轨迹分析系统稳定性, 不适用于高阶复杂系统。文献 [41] 通过采用 Takagi-Sugeno 多模型法分析直流微电网群的大信号稳定性, 揭示了电路参数、潮流和拓扑变化对系统稳定性的影响, 但是, Takagi-Sugeno 模糊模型法是通过将复杂网络的非线性状态空间矩阵等效为若干线性定常矩阵的加权和, 从而简化非线性系统的稳定性分析, 随着系统阶数增加, T-S 模型的计算复杂程度将以指数级增长。

为此, 文献 [42-43] 通过推导一种基于混合势函数理论的直流微电网稳定性判据方法, 分析了带恒功率负荷的下垂控制直流微电网的大扰动稳定性。文献 [44] 进一步考虑储能单元充放电特性, 通过建立直流微电网混合势函数模型, 推导得到了大信号稳定性判据和系统渐进稳定域。然而, 上述利用混合势函数法虽可求解得到解析形式的大信号稳定性判据, 但能量函数构建较为困难, 且根据电路形式的不同, 需将混合势函数进行重构。此外, 文献 [45] 采用 Lyapunov 直接法分析了含储能用高增益交错变换器的直流微电网大信号稳定性。文献 [46] 通过建立下垂控制直流微电网的大信号等效模型, 推导了一种基于 Lyapunov 理论的大信号稳定性判据。

尽管上述方法为研究直流微电网大扰动稳定性提供了参考, 但应用场景多以带恒功率负荷的风储、光储或风光储直流微电网为主, 对涉及包含低浓度瓦斯发电的风光气储多能互补直流微电网多时间尺度建模及大扰动稳定性研究较少, 且鲜有关注周期变工况负荷这一有别于恒功率负荷的建模问题。此外, 传统状态空间方程中状态变量与控制输入之间存在非线性、强耦合关系, 控制器设计面临挑战。因此, 需要在参考国内外已有研究成果的基础上, 依据废弃矿井残余煤层气开采多能互补直流微电网特点开展模型

建立及稳定性分析适应性研究。

2.3.2 电压波动抑制

(1) 增强惯性/阻尼补偿。

由于直流微电网本质上是一类多变换器级联系统,其电压波动主要来自于多电力电子变换器低惯量、互联阻抗不匹配及恒功率负荷欠阻尼。为此,传统上采用增强惯性和阻尼补偿等方法来抑制电压波动。

为了解决直流微电网多变换器系统低惯量问题,可以通过模拟传统电力系统同步发电机来增大系统转动惯量。文献[47-48]利用并网接口变换器模拟虚拟同步发电机,提出了一种直流微电网虚拟惯性控制策略增强系统惯性。文献[49]从平衡储能单元荷电状态出发,提出了一种基于储能单元虚拟直流电机的直流微电网惯性增强方法。针对由间歇性可再生能源、柴油发电机组和蓄电池储能系统组成的风光柴多能互补独立微电网,文献[50]提出了一种提高系统频率稳定性的虚拟同步发电机控制策略。

进一步地,以变下垂系数和附加电量控制为代表的惯量模拟技术得到了广泛关注。文献[51]考虑直流微电网混合储能荷电状态约束,提出了一种基于电压分段下垂控制的多模态电压稳定控制策略。文献[52]通过分析换流器暂态电量对系统稳定运行的影响机理,提出了一种基于附加电量的直流微电网动态稳定控制策略。

此外,针对恒功率负荷负阻抗特性及其欠阻尼效应,通过无源或有源方式补偿系统阻尼已成为一种有效途径。文献[53]通过在主电路附加无源元件,提出了一种无源阻尼方法提高系统阻尼,但不可避免地会增加系统体积和成本。为此,文献[54]通过修改控制回路来模拟无源元件,提出了一种直流微电网有源阻尼控制方法。进一步地,文献[55]通过建立含电力弹簧直流微电网的完整小信号模型,利用特征值分析控制参数变化对系统主导极点的影响,提出了一种基于虚拟RC并联阻抗的有源阻尼控制方法。然而,上述增加转动惯量或补偿系统阻尼的方法均依赖于所建立的直流微电网小信号模型,且仅能保证工作点附近的系统稳定性。

(2) 非线性方法。

为了解决增强惯性和阻尼补偿等传统线性方法的局限性,同时考虑功率变换器和恒功率负荷的非线性,已有文献从非线性控制角度研究电压波动抑制方法。文献[56]提出了一种基于能量缓冲器的直流微电网模糊模型预测控制策略,但需要额外的硬件。文

献[57]针对含恒功率负荷的buck变换器,提出了一种滑模占空比控制策略平抑大范围扰动。文献[58]针对向恒功率负荷供电的boost变换器,提出了一种基于输入输出反馈线性化的电压鲁棒控制策略。文献[59]以含恒功率负荷的滑模控制boost变换器为研究对象,提出了一种自适应下垂控制策略解决环流和电压偏差问题。

然而,目前非线性控制方法多以单一变换器带恒功率负荷为主要研究对象,未考虑系统层面的电压稳定控制,且对以电动机驱动煤层气抽采机运行为代表的周期变工况负荷接入引起的电压波动机理及抑制方法研究不足。此外,少有涉及水风光或光储柴多能互补微电网,更鲜有关注多能互补微电网特别是包含煤层气抽采机周期变工况负荷的风光气储多能互补直流微电网的电压稳定控制研究。因此,在借鉴国内外相关文献特别是直流微电网大信号分析及非线性控制方面的研究进展基础上,需着力破解瓦斯与风光储多时间尺度联合建模及电压振荡机理等关键瓶颈问题,并提出废弃矿井残余煤层气开采多能互补直流微电网电压稳定控制方法。

综上,对目前已有稳定性分析及电压波动抑制方法进行总结与比较,见表1。

2.4 协调运行

2.4.1 短时间尺度风-光-气-储多能互补微电网协调运行

短时间尺度协调运行从构建风-光-气-储多能互补微电网协调调度模型出发,通过模型求解风-光-气-储多能互补微电网协调控制策略。围绕建立多能互补协调调度模型这一关键问题,目前主要从不确定性描述和约束条件这2方面开展研究工作。

(1) 不确定性描述。

通常采用场景模拟和不确定集合等不确定量化分析方法描述风光出力,并在此基础上构建风-光-气-储多能互补联合调度模型。在这其中,场景模拟属于随机优化范畴,不确定集合属于鲁棒优化范畴。

随机优化需通过大量原始数据支撑或事先假设不确定性变量获取准确概率分布,然后将连续概率分布的随机变量离散为场景集合,一般采用蒙特卡洛抽样^[60]、拉丁超立方^[61]、连续概率离散化^[62]等方法。随机优化的重点在于如何得到准确的概率分布,这在实践中往往较难满足。鲁棒优化无需考虑不确定性变量的分布统计信息,通过构造不确定集合及可行域量化风光出力不确定因素,但优化结果过于保守,因此如何调整不确定集合边界成为关键^[63]。分布式鲁棒

表 1 稳定性分析及电压波动抑制方法比较

Table 1 Comparison of stability analysis and voltage fluctuation suppression methods

	稳定性分析	电压波动抑制
小信号分析	① Bode图	① 惯性增强
	② Nyquist判据	② 有源阻尼
	③ 根轨迹	③ 无源阻尼
评价	① 小信号模型无法保证大扰动条件下的系统稳定	① 控制器设计存在动态特性与稳定裕度之间的矛盾
	② 多集中在各变流器控制器小扰动问题的探讨上	② 应用场景多以带恒功率负荷为主
	③ 鲜有系统层面的稳定性分析	③ 依赖小信号模型, 仅能保证工作点附近稳定
大信号分析	① 相平面法	① 模糊模型预测
	② T-S模糊模型法	② 滑模控制
	③ 混合势函数法	③ 反馈线性化
	④ Lyapunov直接法	④ 鲁棒控制
评价	① 相平面法通过描绘运动轨迹, 不适合高阶复杂系统	① 应用场景多以带恒功率负荷为主
	② T-S法随阶数增加, 计算复杂程度以指数级增长。	② 状态变量与控制输入之间存在非线性、强耦合关系
	③ 利用混合势函数法构建能量函数较为困难	③ 控制器设计难度大

优化既克服了随机优化需要完全准确分布函数的局限, 又弥补了鲁棒优化忽略统计信息使得结果过于保守的不足, 因而在多直流馈入受端系统^[64]、风光储微电网^[65]、电-气-热综合能源系统^[66]等不同应用场景下得到广泛关注, 其中, 如何选取鲁棒集合对于结果是否合理至关重要。

此外, 在联合调度模型求解过程中, 一般需考虑下述 3 种优化目标: ① 从系统安全稳定运行出发, 优化目标包括负荷跟踪、电压偏差及分布式发电出力波动等^[67-69]; ② 从运行维护成本出发, 优化目标包括运行支出、设备更替及环境惩罚成本等^[70]; ③ 从风光发电消纳出发, 优化目标包括风光出力及弃风、光量等^[71]。给出一种基于 Lagrange 算子重构的多能互补联合调度优化模型^[67-71]:

$$\min \sum_{o=1}^O s(o) \left[\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left(C_{\text{rest},t}^o - \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T C_{\text{rest},t}^o \right)^2 \right] \quad (11)$$

式中, $s(o)$ 为场景模拟中场景 o 出现的概率; O 为场景总数; $C_{\text{rest},t}^o$ 为场景 o 中 t 时间段的剩余负荷, 与系统负荷及风光出力有关; T 为调度总时段数。

(2) 约束方式。

以风光发电功率预测误差分析作为风-光-气-储多能互补联合调度的约束条件, 重点在于如何确定约束边界。主要研究思路包括: ① 对不确定性问题进行边界化处理, 如根据风光功率预测误差波动范围采取系统容量冗余化措施, 保证功率实时平衡^[72]; ② 进一步从功率不平衡、系统失负荷等可靠性或风险性指标出发强化风光发电功率预测误差分析精度, 合理化短

时间尺度协调调度模型^[73]。一种系统容量冗余及风光发电功率预测误差分析方法^[72-73]如下:

$$\begin{cases} p_{t,\max} - p_t \geq \Delta E_{\max} p_{t,\max} \\ p_t - p_{t,\min} \geq \Delta E_{\min} p_{t,\max} \\ \min_{1 \leq t \leq T} |p_t - p_{t+1}| \geq \Delta E_{\text{pole}} p_{t,\max} \end{cases} \quad (12)$$

式中, p_t 、 $p_{t,\max}$ 、 $p_{t,\min}$ 分别为低浓度瓦斯发电机在 t 时间段的出力及上、下限; ΔE_{pole} 、 ΔE_{\max} 、 ΔE_{\min} 分别为风光发电功率预测极值及极大、极小值。

2.4.2 中长时间尺度风-光-气-储多能互补微电网协调运行

从中长时间尺度出发研究多能互补微电网协调运行, 既要考虑不同类型电源的互补协调, 又要计及风光储短时间尺度与低浓度瓦斯发电机长时间尺度耦合调度。一般研究思路是把多能互补协调运行转化为随机优化问题, 这其中的难点是随机调度模型的建立和求解。文献 [74] 通过建立长时间尺度水光互补协调运行多目标优化模型, 运用随机动态规划方法对模型求解以获得运行决策。文献 [75] 采用自回归滑动平均方法 (auto regressive moving average, ARMA) 建立考虑风光出力时空变化特点的虚拟电厂协同调度模型, 并利用基于概率距离的快速前代消除技术对模型进行优化和求解。此外, 为应对中长时间尺度多能互补协调调度模型规模进一步扩大, 一些基于分阶段、多模块思想的智能求解方法已被用来提高运算效率和精度^[76-77]。一种基于综合效益期望最大的长时间尺度多能互补协调运行多目标优化模型^[74-77]如下:

$$\max \sum_{o=1}^O s(o) \left\{ w_1 \sum_{m=1}^M [p_{PV}^o(m) + p_{WT}^o(m) + p_{MT}^o(m)] \times \right. \\ \left. \Delta t(m) - w_2 \sum_{m=1}^M [p_{PV,s}^o(m) + p_{WT,s}^o(m)] \Delta t(m) - \right. \\ \left. w_3 \sum_{m=1}^M g_m - w_4 \sum_{m=1}^M h_m \right\} \quad (13)$$

式中, $p_{WT}^o(m)$ 、 $p_{PV}^o(m)$ 、 $p_{MT}^o(m)$ 分别为场景 o 下风光瓦斯 m 月的平均出力; $p_{WT,s}^o(m)$ 、 $p_{PV,s}^o(m)$ 分别为 m 月的弃风光能量; g_m 、 h_m 分别为 m 月的向上、向下电力不足损失函数; w_1 、 w_2 、 w_3 、 w_4 为效益系数; $\Delta t(m)$ 为 m 月的小时数。

3 关键技术背后面临的瓶颈问题

3.1 低浓度瓦斯发电机气-电耦合长时间尺度与风光储短时间尺度联合建模

探索低浓度瓦斯发电机气-电耦合长时间尺度与风光储短时间尺度联合建模方法,是突破废弃矿井残余煤层气开采多能互补直流微电网系统多时间尺度协同建模技术背后的核心瓶颈问题。为此,在低浓度瓦斯发电机气-电转换环节耦合机理及动态建模基础上,需从模型解耦及线性化出发开展风光储短时间尺度线性解耦建模研究。由于在分布式发电与储能接口变换器状态空间方程中,状态变量与控制输入之间存在非线性、强耦合关系。因此,需构造基于能量函数的状态变量,推导分布式发电与储能接口变换器线性解耦模型。在这其中,考虑到分布式发电与储能接口变换器不同拓扑结构和空间方程形式,如何通过构造基于能量函数的状态变量,建立具有统一形式的分布式发电与储能接口变换器线性解耦模型,是需要解决的难点问题。以风机接口 buck 变换器为例,大信号状态空间方程及一种线性解耦模型的参考形式^[78]如下:

$$\begin{pmatrix} \dot{i}_{L1} \\ \dot{v}_{C1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{L_1} \\ \frac{1}{C_1} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{L1} \\ v_{C1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{1}{C_1 v_{C1}} \end{pmatrix} p_{o1} + \begin{pmatrix} \frac{V_{in1}}{L_1} \\ 0 \end{pmatrix} d_1 \quad (14)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = y_1 + \delta_1 \\ \dot{y}_1 = u_1 + \sigma_1 \end{cases} \quad (15)$$

式中, i_{L1} 、 v_{C1} 为风机接口 buck 变换器的电感电流和电容电压; L_1 、 C_1 为电感和电容; V_{in1} 、 p_{o1} 为输入电压和输出功率; d_1 为占空比; x_1 和 y_1 为基于 Lyapunov 能量函数形式构造的状态变量,是关于状态变量 i_{L1} 和 v_{C1} 的函数; u_1 为控制输入; δ_1 、 σ_1 为扰动。

在此基础上,利用端口等值实现低浓度瓦斯发电

机气-电耦合长时间尺度与风光储短时间尺度联合建模,从而建立广义电路框架下废弃矿井残余煤层气开采多能互补直流微电网系统多时间尺度协同模型。这其中需要注意的是,多时间尺度既不是统一时间尺度,也不是多个时间尺度的简单叠加,而是在联合建模及构建多时间尺度协同模型过程中,一方面考虑电、气、热的多时间尺度动态特性,如热力子系统的散热特性、气动子系统的延迟特性、管存效应等,动态建模较单一时间尺度微电网将更加复杂;另一方面由于不同时间尺度跨度较大,通过引入分区多速率协同思想构建多时间尺度模型,这其中的难点是如何选择分区接口;此外,由于联合建模前提假设条件直接影响模型建立后的暂态行为,因此需考虑如何选取较为贴近实际的假设条件和模型参数。

3.2 低惯量弱连接大扰动等多重不利因素作用导致的母线电压振荡机理

Lyapunov 直接法是对复杂系统动态模型进行稳定性分析的有力工具,在建立的废弃矿井残余煤层气开采多能互补直流微电网系统多时间尺度协同模型基础上,以系统状态变量 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 为自变量,构造 Lyapunov 函数 U_X :

$$U_X = X^T \Gamma X \quad (16)$$

式中, Γ 为一个正定矩阵,且满足 $A^T \Gamma + \Gamma A = -I$, I 为单位矩阵。

在这其中,如何构造矩阵 X 、 A 和 Γ 的适当形式,得到 Lyapunov 函数 U_X ,进而通过对该 Lyapunov 函数求导,即 $\dot{U}_X(X) = \frac{\partial U_X}{\partial X^T} \dot{X}$,通过分析系统稳定性,揭示低惯量、弱连接、大扰动等多重不利因素作用导致的电压振荡机理这一废弃矿井残余煤层气开采多能互补直流微电网电压稳定控制技术背后的核心瓶颈问题,亟待开展深入研究。

进一步,有限时间收敛技术已在控制领域得到广泛应用,尤其为指导非线性系统扰动观测器设计提供了有力工具,并逐步在电力电子变换器乃至微电网闭环控制系统设计中崭露头角。为此,如何通过有限时间收敛技术设计扰动观测器,并在此基础上利用反馈线性化技术设计前馈控制器,从而实现废弃矿井残余煤层气开采多能互补直流微电网电压稳定控制,需予以重点关注和解决。以风机接口 buck 变换器为例,一种可参考的扰动观测器及前馈控制器设计方法^[79]为

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = y_1 + \hat{\delta}_1 + h_{x1,1} \alpha_{x1} \text{sig}^{1+\mu}(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{\delta}}_1 = \hat{\delta}_1 + h_{x1,2} \alpha_{x1}^2 \text{sig}^{1+2\mu}(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{\delta}}_1 = h_{x1,3} \alpha_{x1}^3 \text{sig}^{1+3\mu}(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{y}}_1 = u_1 + \hat{\sigma}_1 + h_{y1,1} \alpha_{y1} \text{sig}^{1+\mu}(y_1 - \hat{y}_1) \\ \dot{\hat{\sigma}}_1 = h_{y1,2} \alpha_{y1}^2 \text{sig}^{1+2\mu}(y_1 - \hat{y}_1) \end{cases} \quad (17)$$

$$v_1 = -\beta_{x1} \text{sig}^{1+2\mu}(\varepsilon_{x1}) - \beta_{y1} \text{sig}^{\frac{1+2\mu}{1+\mu}}(\varepsilon_{y1}) \quad (18)$$

式中, \hat{x}_1 、 $\hat{\delta}_1$ 、 $\hat{\delta}_1$ 、 \hat{y}_1 和 $\hat{\sigma}_1$ 分别为 x_1 、 δ_1 、 δ_1 、 y_1 和 σ_1 的估计; h_{x1_1} 、 h_{x1_2} 、 h_{x1_3} 和 h_{y1_1} 、 h_{y1_2} 分别为 Hurwitz 多项式 $h_{x1}(s)$ 和 $h_{y1}(s)$ 的系数; α_{x1} 、 α_{y1} 为扰动观测器增益, 且 $\alpha_{x1}>1$, $\alpha_{y1}>1$; μ 为收敛系数, 且 $\mu<1$; $\text{sig}^a(\cdot)$ 定义为一种运算, 且 $\text{sig}^a(\cdot) = \text{sign}(\cdot) \times |\cdot|^a$; v_1 和 $(\varepsilon_{x1}, \varepsilon_{y1})^T$ 分别为控制输入 u_1 和状态变量 $(x_1, y_1)^T$ 的中间变量; β_{x1} 、 β_{y1} 为控制器增益, 且 $\beta_{x1}>0$, $\beta_{y1}>0$ 。

需要指出的是, 上述理论和方法无法直接简单照搬, 需针对废弃矿井残余煤层气开采多能互补直流微电网系统多时间尺度协同模型开展适应性研究及专门技术攻关。此外, 在扰动观测器和前馈控制器设计过程中, 观测器增益 α_{x1} 、 α_{y1} 和控制器增益 β_{x1} 、 β_{y1} 如何科学合理取值, 仍有待进一步研究与思考, 同时, 不同参数选择对电压稳定控制效果影响, 亦需深入分析和解释。

4 废弃矿井残余煤层气开采多能互补直流微电网可行性分析及展望

当前, 能源行业特别是煤炭领域加快推动实现碳达峰、碳中和目标任务艰巨, 在此背景下围绕废弃矿井残留能源与空间资源协同利用这一新兴潜在领域开展废弃矿井残余煤层气开采多能互补直流微电网系统关键技术研究具有重要现实和示范意义。笔者所在团队前期依托山西蓝焰煤层气集团有限责任公司郑庄抽采片区初步完成了煤层气地面抽采直流微电网系统设计及平台搭建, 该系统主要包括 10 kW 光伏电池板及其接口电路、100 Ah/12 V 铅酸蓄电池储能及其接口电路、YVP180L-8、11 kW 型矢量控制变频异步电机驱动的 CYJY4-1.5-9HB 型游梁式抽采机以及三相 PWM 并网接口变换器等, 如图 6 所示。

进一步, 针对低系统惯量、弱电网连接、分布式发电随机波动和周期变工况负荷大扰动等多重因素叠加使得废弃矿井残余煤层气开采多能互补直流微电网系统稳定运行面临严峻挑战这一不利局面, 亟待攻关煤层气抽采机电机周期变工况负荷分析、低浓度瓦斯发电机气-电转换环节耦合、电压稳定控制及多能互补协调运行等关键技术, 着力破解低浓度瓦斯发电机气-电耦合长时间尺度与风光储短时间尺度联合建模, 以及低惯量、弱连接、大扰动等多重不利因素作用导致的电压振荡机理等关键技术背后的核心瓶颈问题。课题组前期搭建了煤层气地面抽采直流微电网系统仿真模型(参数见表 2), 通过采用有限时间收敛和反馈线性化技术初步得到了不同工况下随相关



图 6 煤层气地面抽采直流微电网系统平台搭建
Fig.6 Platform construction of DC microgrid for CBM surface drainage

表 2 煤层气地面抽采直流微电网系统仿真参数
Table 2 Parameters of DC microgrid for CBM surface drainage

微电网系统	微电网系统参数	数值
接口电路	直流母线电压参考/V	400
	风机端口输出电压/V	500
	光伏端口输出电压/V	250
	蓄电池端口输出电压/V	300
	风光储额定容量/kW	5
	接口电路电感/mH	3
	电口电路电容/ μ F	500
	开关频率/kHz	20
感应电机	极对数	2
	额定功率/kW	11
	额定电压/V	380
	额定频率/Hz	50
	定子电阻/ $m\Omega$	14.85
	转子电阻/ $m\Omega$	9.295
	定子电感/mH	0.302 7
	转子电感/mH	0.302 7
	互感/mH	10.46
	等效转动惯量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	3.1
煤层气抽采机	游梁前臂/m	105
	游梁后臂/m	1.35
	连杆/m	1.95
	曲柄/m	0.65
	井深/m	515
	泵挂位置/m	461.1
	杆径/mm	19.1
	管径/mm	73
	井液密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 000
	等效曲柄配重/N	11 000

参数变化的直流母线电压波形,如图7所示。由图可知,不同工况下直流母线电压随相关参数变化呈现一定发展趋势,且不同颜色曲线对应不同参数取值。

此外,对经济效益进行评估,传统交流供电系统由于电能质量较差,导致无功处罚成本高。以郑庄片区为例,目前功率因数均值约为0.5,无功罚款在110万元左右,经过供电系统直流化改造能够满足单位功率因数运行,可基本避免无功惩罚^[80]。值得注意的是,尽管从提高功率因数及减少无功处罚角度看,无论是供电系统直流化改造还是加装无功补偿装置,均可实

现较高功率因数运行和较好经济效益,但由于煤层气地面开采具有井多面广、资源分布不均等特点,造成传统交流供电系统存在供电距离长、线路分支多、箱站负荷重等问题,加之线路走廊环境差、极端天气多发等因素,这势必导致:①一次投资和二次运维成本高;②线路损耗大、末端电压低;③供电可靠性低。这些问题通过加装无功补偿装置无法得到根本和有效解决,因此,考虑围绕井口就近部署分布式发电与储能构建煤层气地面抽采直流微电网,从而实现分区块化供电,或许是一种行之有效的解决方案。

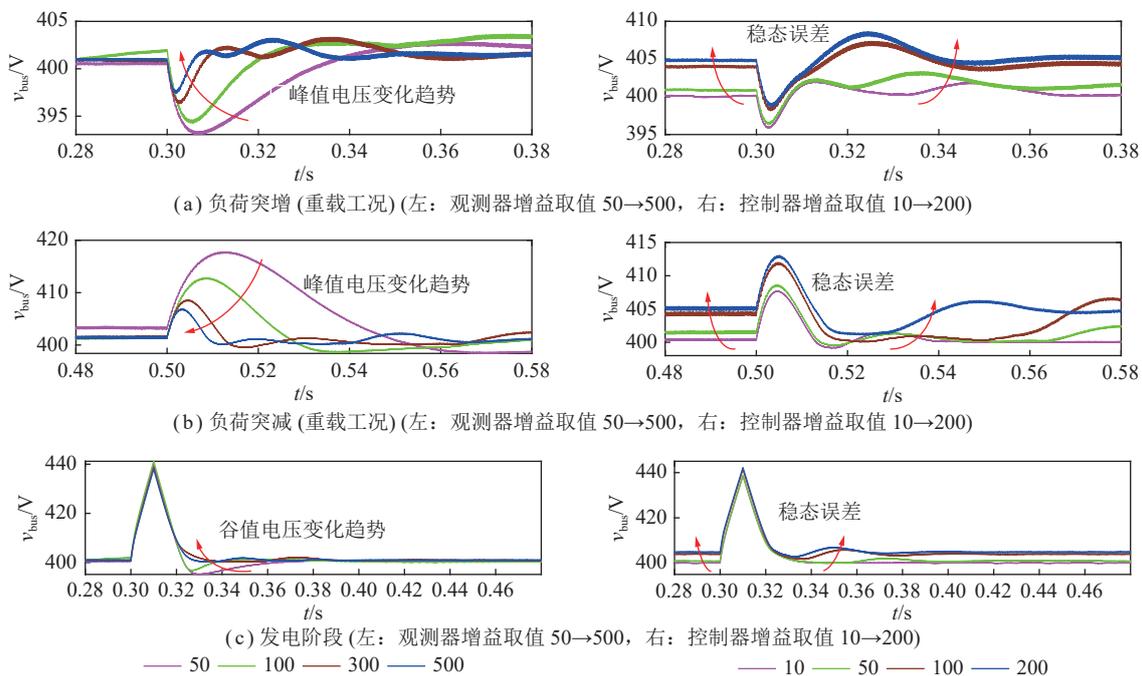


图7 不同工况下随相关参数变化的直流母线电压波形

Fig.7 Waveforms of DC bus voltage with related parameters change under different working conditions

为此,从降低停电事故提高供电可靠性角度进一步评估经济效益,以郑庄片区为例,通过负荷平均停电时间和平均停电次数等指标衡量传统交流系统供电可靠性,目前交流系统年平均停电时间为29 h,平均停电次数3.2次,通过前期方案设计及可行性预研分析粗略估计,经过供电系统直流化改造年平均停电时间可降低至5 h,按照郑庄片区450口井及平均每口井单产840 m³/d计算,一年可增加经济效益约50万元以上,同时考虑微电网从/向交流主网购/售电支出/收益,数年内即可完成供电系统直流化改造投资成本回收。

综上所述,围绕废弃矿井残留能源与空间资源协同利用这一国家重大需求与战略新兴领域,在废弃矿井绿色低碳多能互补体系框架下,统筹考虑废弃矿井

采空区煤层气开采活动用电需求与采煤沉陷区可再生能源发电潜力,探索构建集成风-光-气-储的废弃矿井残余煤层气开采多能互补直流微电网系统,对发展废弃矿井绿色低碳多能互补体系典型应用场景、推动废弃矿井多能互补微电网具体路径实施、助力矿区绿色与低碳转型升级具有重要现实和示范意义,且从长远看具有必要可行性及广阔应用前景。

5 结 论

(1)从废弃矿井残留能源与空间资源协同利用角度出发,在废弃矿井绿色低碳多能互补体系框架下,统筹考虑废弃矿井采空区煤层气开采活动用电需求与采煤沉陷区可再生能源发电潜力,以及低浓度瓦斯发电和储能作为补充,提出构建集成风-光-气-储的

废弃矿井残余煤层气开采多能互补直流微电网系统。

(2) 提炼出煤层气抽采机电动机周期变工况负荷分析、低浓度瓦斯发电机气-电转换环节耦合、电压稳定控制及协调运行等破解废弃矿井残余煤层气开采多能互补直流微电网系统可靠稳定及协调运行难题涉及的关键技术,总结和回顾了已有研究进展,分析了目前工作存在的难点和问题,同时探讨了可能的解决方法及后续工作建议。

(3) 进一步指出亟待攻克低浓度瓦斯发电机气-电耦合长时间尺度与风光储短时间尺度联合建模,以及低惯量、弱连接、大扰动等多重不利因素作用导致的电压振荡机理等关键技术背后的核心瓶颈问题。

(4) 从已有工作基础、研究进展及经济效益评估等方面展望了构建废弃矿井残余煤层气开采多能互补直流微电网系统的可行性及应用前景。

参考文献(References):

- 袁亮,姜耀东,王凯,等.我国关闭/废弃矿井资源精准开发利用的科学思考[J].煤炭学报,2018,43(1):14-20.
YUAN Liang, JIANG Yaodong, WANG Kai, et al. Precision exploitation and utilization of closed/abandoned mine resources in China[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 14-20.
- 袁亮,杨科.再论废弃矿井利用面临的科学问题与对策[J].煤炭学报,2021,46(1):16-24.
YUAN Liang, YANG Ke. Further discussion on the scientific problems and countermeasures in the utilization of abandoned mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 16-24.
- 谢和平,侯正猛,高峰,等.煤矿井下抽水蓄能发电新技术:原理、现状及展望[J].煤炭学报,2015,40(5):965-972.
XIE Heping, HOU Zhengmeng, GAO Feng, et al. A new technology of pumped-storage power in underground coal mine: Principles, present situation and future[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(5): 965-972.
- 梁杰,王喆,梁鲲,等.煤炭地下气化技术进展与工程科技[J].煤炭学报,2020,45(1):393-402.
LIANG Jie, WANG Zhe, LIANG Kun, et al. Progress and technology of underground coal gasification[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 393-402.
- 孟召平,李国富,田永东,等.晋城矿区废弃矿井采空区煤层气地面抽采研究进展[J].煤炭学报,2022,50(1):204-211.
MENG Zhaoping, LI Guofu, TIAN Yongdong, et al. Research progress on surface drainage of coalbed methane in abandoned mine gobs of Jincheng mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 50(1): 204-211.
- 浦海,卞正富,张吉雄,等.一种废弃矿井地热资源再利用系统研究[J].煤炭学报,2021,46(2):677-687.
PU Hai, BIAN Zhengfu, ZHANG Jixiong, et al. Research on a reuse mode of geothermal resources in abandoned coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(2): 677-687.
- 陈凯,陈清通,孙庆先,等.大同采煤沉陷区光伏示范基地建设采空区注浆治理技术应用[J].煤矿安全,2018,49(8):169-172.
CHEN Kai, CHEN Qingtong, SUN Qingxian, et al. Application of grouting treatment technology in goaf for photovoltaic demonstration base in Datong coal mining subsidence area[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(8): 169-172.
- 武志德,郑得文,李东旭,等.我国利用废弃矿井建设地下储气库可行性研究及建议[J].煤炭经济研究,2019,39(5):15-19.
WU Zhide, ZHENG Dewen, LI Dongxu, et al. Feasibility study and suggestions on constructing underground gas storage in abandoned mines in China[J]. Coal Economic Research, 2019, 39(5): 15-19.
- 王帅,蒲宝基,蹇军强,等.废弃煤矿压缩空气储能地质安全稳定性分析[J].煤炭工程,2020,52(8):133-137.
WANG Shuai, PU Baoji, JIAN Junqiang, et al. Geological safety and stability analysis on compressed air energy storage of abandoned coal mine[J]. Coal Engineering, 2020, 52(8): 133-137.
- 朱超斌,周跃进,卞正富,等.废弃矿井抽水蓄能句法视角下拓扑模型构建及空间优化[J].煤炭工程,2022,47(6):2279-2288.
ZHU Chaobin, ZHOU Yuejin, BIAN Zhengfu, et al. Topological model construction and space optimization of abandoned mine pumped storage from the perspective of space syntax[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(6): 2279-2288.
- 袁亮,张通,张庆贺,等.双碳目标下废弃矿井绿色低碳多能互补体系建设思考[J].煤炭学报,2022,47(6):2131-2139.
YUAN Liang, ZHANG Tong, ZHANG Qinghe, et al. Construction of green, low-carbon and multi-energy complementary system for abandoned mines under global carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(6): 2131-2139.
- 王浩.构建煤层气地面抽采直流微电网系统的关键技术与可行性分析[J].煤炭学报,2018,43(9):2653-2660.
WANG Hao. Key technologies and feasibility analysis of DC micro-grid system for CBM ground extraction[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(9): 2653-2660.
- 王浩.煤层气井排采设备供电的直流微电网优化与控制关键技术[J].煤炭学报,2019,44(S1):355-361.
WANG Hao. Key technologies of optimization and control of DC micro-grid for drainage equipment of CBM well[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(S1): 355-361.
- 王聪,王浩,白利军.煤层气抽采机感应电机运行最优速度曲线控制策略研究[J].电工技术学报,2016,31(11):75-83.
WANG Cong, WANG Hao, BAI Lijun. Research on control strategy based on optimal speed curve of induction motor for CBM-well pumping units[J]. Transactions of China Electrotechnical, 2016, 31(11): 75-83.
- 杨冬锋,姜超,蔡国伟,等.考虑电热耦合的交直流微电网多目标优化配置[J].电力系统自动化,2020,44(8):124-132.
YANG Dongfeng, JIANG Wei, CAI Guowei, et al. Multi-objective optimal configuration of AC/DC microgrid considering electricity/heat coupling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(8): 124-132.
- POURMOUSAVI S A, SHARMA R K, ASGHARI B. A framework for real-time power management of a grid-tied microgrid to extend battery lifetime and reduce cost of energy[C]//IEEE Innovative Smart Grid Technologies. Washington, 2012: 1-8.

- [17] 王育飞, 叶俊斌, 薛花, 等. 基于改进雨流计数法的梯级利用电池储能系统优化控制[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 39–49.
WANG Yufei, YE Junbin, XUE Hua, et al. Optimal control of energy storage with echelon utilization batteries based on improved rain-flow counting method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 39–49.
- [18] JENKINS D P, FLETCHER J, KANE D. Lifetime prediction and sizing of Lead-Acid batteries for microgeneration storage applications[J]. IET Renewable Power Generation, 2008, 2(3): 191–200.
- [19] SAM G G, DUANE L M. Inferring power consumption and electrical performance from motor speed in oil-well pumping units[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1997, 33(1): 187–193.
- [20] 王博, 赵海森, 李和明, 等. 用于模拟游梁式抽油机电动机动态负荷的测试系统设计及应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(21): 3488–3495.
WANG Bo, ZHAO Haisen, LI Heming, et al. Design and applications of the testing system with dynamic load for beam pumping motor[J]. Proceeding of the CSEE, 2014, 34(21): 3488–3495.
- [21] 王博, 赵海森, 罗应立, 等. 面向用户的有杆采油系统实用仿真模型及应用[J]. 电工技术学报, 2015, 30(6): 133–141.
WANG Bo, ZHAO Haisen, LUO Yingli, et al. Practical simulation model of rod-pumping system for engineering applications[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(6): 133–141.
- [22] 王义龙, 赵海森, 霍承祥, 等. 抽油机电动机断续供电节能技术断电时刻判定方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(11): 182–186.
WANG Yilong, ZHAO Haisen, HUO Chengxiang, et al. Power-off time determination method of intermittent power supply technology for beam pumping motors[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11): 182–186.
- [23] 王义龙, 赵海森, 王泽忠, 等. 游梁式抽油机电动机断续供电节能技术断电时刻准确判定方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4537–4545.
WANG Yilong, ZHAO Haisen, WANG Zezhong, et al. Power-off time precise determination of intermittent power supply technology for beam pumping motor systems[J]. Proceeding of the CSEE, 2018, 38(15): 4537–4545.
- [24] 刘新福, 刘春花, 蔡耀光. 煤层气井排采系统有杆泵运行特性分析[J]. 机械工程学报, 2017, 53(8): 187–193.
LIU Xinfu, LIU Chunhua, QI Yaoguang. Operating performance of sucker rod pump for the pumping system in coalbed methane wells[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(8): 187–193.
- [25] MARTIN G, GAUDENZ K, PATRICK F P, et al. Energy hubs for the future[J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2007, 5(1): 24–30.
- [26] 王毅, 张宁, 康重庆. 能源互联网中能量枢纽的优化规划与运行研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5669–5681.
WANG Yi, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Review and prospect of optimal planning and operation of energy hub in energy internet[J]. Proceeding of the CSEE, 2015, 35(22): 5669–5681.
- [27] 夏越, 陈颖, 杜松怀, 等. 综合能源系统多时间尺度动态时域仿真关键技术[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 97–110.
XIA Yue, CHEN Ying, DU Songhuai, et al. Key technologies for multi-time-scale dynamic time domain simulation of integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 97–110.
- [28] WANG C S, NEHRIR M H. A physically based dynamic model for solid oxide fuel cells[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(4): 887–897.
- [29] 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 Xiangying, HU Yan, GENG Qi, 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.
- [30] 李天格, 胡志坚, 陈志, 等. 计及电-气-氢-热需求响应的综合能源系统多时间尺度低碳运行优化策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 43(1): 16–24.
LI Tiange, HU Zhijiann, CHEN Zhi, et al. Multi-time scale low-carbon operation optimization strategy of integrated energy system considering electricity-gas-heat-hydrogen demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 43(1): 16–24.
- [31] LAN T, STRUNZ K. Multiphysics transients modeling of solid oxide fuel cells: methodology of circuit equivalents and use in EMT-PT-type power system simulation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(4): 1309–1321.
- [32] NAGATA S, MOMMA A, KATO T, et al. Numerical analysis of output characteristics of tubular SOFC with internal reformer[J]. Journal of Power Sources, 2001, 101(1): 60–71.
- [33] 杨经纬, 张宁, 康重庆. 多能源网络的广义电路分析理论——(二)网络模型[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(10): 10–21.
YANG Jingwei, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Analysis theory of generalized electric circuit for multi-energy networks—Part Two network model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 10–21.
- [34] 王晓兰, 李晓晓. 孤岛模式下风电直流微电网小信号稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(5): 92–99.
WANG Xiaolan, LI Xiaoxiao. Small-signal stability analysis of islanded DC microgrid with wind power[J]. Electric power automation equipment, 2017, 37(5): 92–99.
- [35] YE Q, MO R, LI H. Low-frequency resonance suppression of a dual-active-bridge DC/DC converter enabled DC microgrid[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(3): 982–994.
- [36] 孟建辉, 邹培根, 王毅, 等. 基于灵活虚拟惯性控制的直流微电网小信号建模及参数分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(12): 2615–2626.
MENG Jianhui, ZOU Peigen, WANG Yi, et al. Small-signal modeling and parameter analysis of the DC microgrid based on flexible virtual inertia control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(12): 2615–2626.
- [37] 李霞林, 李志旺, 郭力, 等. 交直流微电网集群柔性控制及稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(20): 5948–5961.
LI Xialin, LI Zhiwang, GUO Li, et al. Flexible control and stability analysis of AC/DC microgrids clusters[J]. Proceeding of the CSEE,

- 2019, 39(20): 5948–5961.
- [38] 郑凯元, 杜文娟, 王海风. 聚合恒功率负荷对直流微电网稳定性影响的阻抗法分析[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 134–143.
ZHENG Kaiyuan, DU Wenjuan, WANG Haifeng. DC microgrid stability affected by aggregated constant power loads based on impedance method[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 134–143.
- [39] 郑凯元, 杜文娟, 王海风. 混联多微电网系统动态交互作用及稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(16): 5552–5568.
ZHENG Kaiyuan, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Analysis on dynamic interactions and stability of hybrid multi-microgrids[J]. Proceeding of the CSEE, 2021, 41(16): 5552–5568.
- [40] 王建华, 张方华, 龚春英, 等. 带恒功率负载的DC/DC变换器启动过程分析[J]. 电工技术学报, 2009, 24(4): 121–125.
WANG Jianhua, ZHANG Fanghua, GONG Chunying, et al. Start-up process analysis of DC/DC converter with constant power load[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(4): 121–125.
- [41] LIU S C, LI X, XIA M Y, et al. Takagi-Sugeno multimodeling-based large signal stability analysis of DC microgrid clusters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(11): 12670–12684.
- [42] 历泽坤, 孔力, 裴玮, 等. 基于混合势函数的下垂控制直流微电网大扰动稳定性分析[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3725–3734.
LI Zekun, KONG Li, PEI Wei, et al. Large-disturbance stability analysis of droop-controlled DC microgrid based on mixed potential function[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3725–3734.
- [43] 历泽坤, 孔力, 裴玮. 直流微电网大扰动稳定判据及关键因素分析[J]. 高电压技术, 2019, 45(12): 3993–4002.
LI Zekun, KONG Li, PEI Wei. Analyses of stability criterion and key factors of DC microgrid under large disturbance[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(12): 3993–4002.
- [44] 滕昌鹏, 王玉斌, 周博恺, 等. 含恒功率负载的直流微电网大信号稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5): 973–982.
TENG Changpeng, WANG Yubin, ZHOU Bokai, et al. Large-signal stability analysis of DC microgrid with constant power loads[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 973–982.
- [45] XU Q W, JIANG W T, BLAABJERG F, et al. Backstepping control for large signal stability of high boost ratio interleaved converter interfaced DC microgrids with constant power loads[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(5): 5397–5407.
- [46] XIE W Q, CAO W Y, GUERRERO J M, et al. System-level large-signal stability analysis of droop-controlled DC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(4): 4224–4236.
- [47] WU W H, CHEN Y D, LUO A, et al. A virtual inertia control strategy for DC microgrids analogized with virtual synchronous machines[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(7): 6005–6016.
- [48] CHEN D, XU Y Z, HUANG A Q. Integration of DC microgrids as virtual synchronous machines into the AC grid[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(9): 7455–7466.
- [49] ZHI N, DING K, DU L, et al. An SOC-based virtual DC machine control for distributed storage systems in DC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2020, 35(3): 1411–1420.
- [50] 石荣亮, 张兴, 刘芳, 等. 提高光储柴独立微网频率稳定性的虚拟同步发电机控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(22): 77–85.
SHI Rongliang, ZHANG Xing, LIU Fang, et al. Control strategy of virtual synchronous generator for improving frequency stability of islanded photovoltaic-battery-diesel microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 77–85.
- [51] 张继红, 赵锐, 高雷, 等. 直流微网母线电压稳定控制策略[J]. 电网技术, 2021, 45(12): 4922–4929.
ZHANG Jihong, ZHAO Rui, GAO Lei, et al. DC bus voltage stabilization control strategy for DC microgrid[J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4922–4929.
- [52] 付媛, 邵馨玉, 赵欣艳, 等. 基于附加电量的直流微电网动态稳定控制策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(5): 136–144.
FU Yuan, SHAO Xinyu, ZHAO Xinyan, et al. Dynamic stability control strategy of DC microgrid based on additional electric quantity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 136–144.
- [53] CESPEDES M, XING L, SUN J. Constant-power load system stabilization by passive damping[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, 26(7): 1832–1836.
- [54] ZHANG X, RUAN X B, ZHONG Q C. Improving the stability of cascaded DC/DC converter systems via shaping the input impedance of the load converter with a parallel or series virtual impedance[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(12): 7499–7512.
- [55] HOSSEINIPOUR A, HOJABRI H. Small-signal stability analysis and active damping control of DC microgrids integrated with distributed electric springs[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(5): 3737–3747.
- [56] VAFAMAND N, KHOOBAN M H, DRAGIČEVIĆ T, et al. Networked fuzzy predictive control of power buffers for dynamic stabilization of DC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(2): 1356–1362.
- [57] ZHAO Y, QIAO W, HA D Y. A sliding-mode duty-ratio controller for DC/DC buck converters with constant power loads[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2014, 50(2): 1448–1458.
- [58] KIM S K, LEE K B. Robust feedback-linearizing output voltage regulator for DC/DC boost converter[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(11): 7127–7135.
- [59] MOKHTAR M, MAREI M I, EL-SATTAR A A. An adaptive droop control scheme for DC microgrids integrating sliding mode voltage and current controlled Boost converters[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(2): 1685–1693.
- [60] 侯雨伸, 王秀丽, 张玥, 等. 考虑维度重要性的电力系统可靠性评估拟蒙特卡洛方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 31–37.
HOU Yushen, WANG Xiuli, ZHANG Yue, et al. Dimensional importance based quasi-Monte Carlo method for power system reliability evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 31–37.
- [61] 付文杰, 王喻玺, 申洪涛, 等. 基于拉丁超立方抽样和场景消减的

- 居民用户基线负荷估计方法[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2298–2307.
- FU Wenjie, WANG Yuxi, SHEN Hongtao, et al. Residential customer baseline load estimation based on latin hypercube sampling and scenario subtraction[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2298–2307.
- [62] COSTA L C, THOME F S, GARCIA J D, et al. Reliability-constrained power system expansion planning: A stochastic risk-averse optimization approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(1): 97–106.
- [63] 袁洪涛, 韦钢, 张贺, 等. 计及充换储一体站的主动配电网鲁棒优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(8): 2453–2467.
- YUAN Hongtao, WEI Gang, ZHANG He, et al. Robust optimal scheduling of active distribution network considering with the charging-swapping-storage integrated station[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(8): 2453–2467.
- [64] 艾洪宇, 王洪涛. 多直流馈入受端系统负荷恢复分布鲁棒优化[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(9): 24–33.
- AI Hongyu, WANG Hongtao. Distributionally robust optimization of load recovery for a multi-infeed HVDC receiving end system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(9): 24–33.
- [65] 魏梅芳, 吴燕, 黎跃龙, 等. 基于分布鲁棒优化的微电网日前经济运行模型与求解方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(12): 81–90.
- WEI Meifang, WU Yan, LI Yuelong, et al. Day-ahead economic operation model of microgrid and its solving method based on distributed robust optimization[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2022, 34(12): 81–90.
- [66] 高晓松, 李更丰, 肖遥, 等. 基于分布鲁棒优化的电-气-热综合能源系统日前经济调度[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2245–2253.
- GAO Xiaosong, LI Gengfeng, XIAO Yao, et al. Day-ahead economical dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system based on distributionally robust optimization[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2245–2253.
- [67] LIANG R H, CHEN Y K, CHEN Y T, et al. Volt/Var control in a distribution system by a fuzzy optimization approach[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2011, 33(2): 278–287.
- [68] LI F F, QIU J. Multi-objective optimization for integrated hydro-photovoltaic power system[J]. Applied Energy, 2016, 167: 377–384.
- [69] FRANCOIS B, BORGA M, CREUTIN J D, et al. Complementarity between solar and hydropower: sensitivity study to climate characteristics in Northern-Italy[J]. Renewable Energy, 2016, 86: 543–553.
- [70] 徐帆, 涂孟夫, 李利利, 等. 促进清洁能源消纳的全网一体化发电计划模型及求解[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(19): 185–208.
- XU Fan, TU Mengfu, LI Lili, et al. Scheduling model and solution of integrated power generation in power grid for clean energy accommodation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19): 185–208.
- [71] 葛晓琳, 郝广东, 夏澎, 等. 高比例风电系统的优化调度方法[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 390–400.
- GE Xiaolin, HAO Guangdong, XIA Peng, et al. An optimal system scheduling method with high proportion of wind power[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 390–400.
- [72] ADEFARATI T, BANSAL R C. Reliability assessment of distribution system with the integration of renewable distributed generation[J]. Applied Energy, 2017, 185: 158–171.
- [73] HUANG H Z, Chung C Y, CHAN K W, et al. Quasi-Monte Carlo based probabilistic small signal stability analysis for power systems with plug-in electric vehicle and wind power integration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3335–3343.
- [74] LI H, LIU P, GUO S, et al. Long-term complementary operation of a large-scale hydro-photovoltaic hybrid power plant using explicit stochastic optimization[J]. Applied Energy, 2019, 238: 863–875.
- [75] 董文略, 王群, 杨莉. 含风光水的虚拟电厂与供电公司协调调度模型[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 75–81.
- DONG Wenlüe, WANG Qun, YANG Li. A coordinated dispatching model for a distribution utility and virtual power plants with wind/photovoltaic/hydro generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 75–81.
- [76] MING B, LIU P, GUO S L, et al. Hydropower reservoir reoperation to adapt to large-scale photovoltaic power generation[J]. Energy, 2019, 179: 268–279.
- [77] MING B, LIU P, GUO S L, et al. Optimizing utility-scale photovoltaic power generation for integration into a hydropower reservoir by incorporating long- and short-term operational decisions[J]. Applied Energy, 2017, 204: 432–445.
- [78] XU Q W, ZHANG C L, XU Z, et al. A composite finite-time controller for decentralized power sharing and stabilization of hybrid fuel cell/supercapacitor system with constant power load[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(2): 1388–1400.
- [79] LIN P F, ZHANG C L, WANG J Y, et al. On autonomous large-signal stabilization for islanded multibus DC microgrids: a uniform nonsmooth control scheme[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(6): 4600–4612.
- [80] 白利军. 煤层气地面开采供电系统直流微网与节能关键技术研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2016: 1–5.
- BAI Lijun. Research on key technologies of CBM surface mining DC micro grid power supply system and energy saving[D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2016: 1–5.