

岩溶地面塌陷灾害点采用回填灌浆、梁板跨越、地基加固等措施：中小型溶洞采用砂、水泥浆回填灌浆加固；大型溶洞

采用梁板跨越结构，使管道支承于稳定地层；塌陷区地基采用 CFG 桩加固，提升地基密实度^[4]。

表 1 管道湿陷性黄土区段风险评估结果

隐患点编号	灾害类型	地质灾害危险性评分	管道易损性评分	防控难度评分	综合风险值	风险等级
1	黄土湿陷+滑塌	86	72	68	78.5	高风险
2	地面沉降	71	69	65	68.3	中风险
3	黄土湿陷	83	70	66	75.2	高风险
4	边坡滑塌	75	68	63	69.1	中风险
5	地面沉降	62	65	60	62.7	低风险
6	黄土湿陷	80	71	64	73.8	高风险
7	边坡滑塌	73	67	62	67.9	中风险
8	地面沉降	60	64	59	61.2	低风险
9	黄土湿陷	70	66	61	66.4	中风险
10	地面沉降	58	63	58	59.8	低风险

4.2 管道本体加固与抗变形技术

对受地质灾害影响轻微、已产生变形的在建及已建管道开展本体加固与抗变形改造，提升管道自身防灾能力。对于弯管变形、应力轻微超标管道，采用机械校正+局部补强加固工艺：使用管道校正器校正变形部位，粘贴碳纤维布或安装钢制套管进行局部加厚补强，恢复管道承载能力；对于接口破损、防腐层损坏管道，更换密封垫、修补防腐层，同时安装软接头，提升接口变形协调能力，分散土体变形应力，防止接口再次开裂。对于地质灾害高风险区段的已建与新建管道，宜选用抗变形能力强的柔性管材，并适当加大管道埋深，将管顶埋深控制在 2.0m 及以下，以此减小地表变形对管道的直接影响；同时在管道外壁与周边土体之间设置缓冲垫层，利用垫层的变形与耗能作用消散土体变形产生的附加应力，缓冲地质灾害对管道的冲击作用，提升管道在复杂地质条件下的抗变形与抗破坏能力。在管道应力敏感位置布设应力监测传感器，实现管道应力实时监测、早发现早处置。

4.3 监测预警与长效运维保障技术

构建空地一体监测预警体系，实现地质灾害超前预警，结合长效运维管理，形成“提前防护+持续监测+动态管控”模式。地面监测采用分布式光纤应变传感器、孔隙水压力传感器、位移传感器，实时监测灾害易发边坡、湿陷区段的应变变形、土体含水率、管道应力等数据；空中监测采用无人机 LiDAR、InSAR 等遥感技术，定期扫描管道沿线地表形变，预判地质灾害隐患。建立监测预警阈值体系，数据接近限值时及时发出预警，为应急处置预留时间^[5]。建立长效运维机制：地质灾害易发区段执行定期巡检制度，高风险区段缩短巡检周期，雨季、汛期加大巡检力度；建立隐患台账，定期检查防护加固工程质量，及时维修破损部位；定期开展运维

人员专业培训，提升应急处置能力，保障防护加固工程长效发挥作用。该技术体系应用于西北黄土管道案例后，高风险点灾害隐患得到有效控制，管道形变控制在允许范围内，未再发生湿陷、滑塌致管道损伤情况，防护效果显著。

5 结语

长输油气管道地质灾害易发区段风险防控是保障能源运输“生命线”安全的基础。定向风险评估技术可精准识别地质灾害风险点、划分风险等级，为防护加固提供依据；分类靶向防护加固技术可有效抵御地质灾害，降低灾害对管道的损伤程度，提升油气管道防灾安全性与运行可靠性。未来应持续推进大数据、人工智能与地质灾害风险评估技术融合，提升风险识别与预测精度；研发绿色高效、耐久的防护加固材料与施工技术，控制工程经济成本；强化全流程风险管理，逐步实现长输油气管道地质灾害事前精准预报、事中有效防控、事后高效养护，为管道地质灾害防治提供全方位技术支撑。

参考文献

- [1] 蓝明新.长输油气管道单体泥石流灾害风险评估研究[J].管道保护,2026,3(01):47-52+71.
- [2] 王宇.长输油气管道地质灾害防治统筹管理浅析[J].化工矿产地质,2021,43(04):356-363.
- [3] 王珀,姜垣良,刘英吉.中缅油气管道(缅甸段)地质灾害防治工程管理与实践[J].中国石油和化工标准与质量,2021,41(01):92-94.
- [4] 薛俊卓,詹辉,张国良,等.长输油气管道河沟段水毁灾害气象风险评估研究[J].安全与环境工程,2020,27(02):168-174.
- [5] 宋一纯.长输油气管道安全影响因素分析及安全监控管理体系研究[J].石油化工安全环保技术,2021,37(06):16-19+5-6.

Research on the Collaborative Operation and Optimization Scheduling Strategy of “Source-Grid-Load-Storage” Based on Incremental Distribution Network

Shengqi Huang

State Power Investment Corporation Xuchang Comprehensive Smart Energy Co., Ltd., Xuchang, Henan, 461000, China

Abstract

This study investigates operational challenges arising from high renewable energy integration in incremental distribution networks, focusing on coordinated optimization of “source-grid-load-storage” systems. By analyzing system characteristics and operational challenges, the research develops refined models for distributed generation, flexible loads, and energy storage systems. An optimized scheduling framework is established with objectives of cost-effectiveness, stability, and low-carbon performance, incorporating a multi-time-scale collaborative scheduling approach and a full-cycle optimization strategy that includes day-ahead planning, rolling adjustments, and real-time control. The findings demonstrate that this methodology significantly enhances system efficiency, improves renewable energy utilization, and ensures power supply stability, providing theoretical support and practical guidance for optimizing incremental distribution network operations.

Keywords

Incremental distribution network; Source-grid-load-storage coordination; Optimal dispatching; Multi-time scale; Operation strategy

基于增量配电网的“源—网—荷—储”协同运行与优化调度策略研究

黄胜奇

国电投许昌综合智慧能源有限公司，中国·河南许昌 461000

摘要

本文研究增量配电网中高比例新能源接入所引起的运行问题，“源-网-荷-储”协调优化调度的研究。分析系统特性及运行难题，创建分布式电源、柔性负荷和储能系统的精细模型；塑造以经济性、稳定性、低碳性为目标的优化调度模型，规划多时间尺度协同调度框架并给出包含日前计划、日内滚动调整和实时控制的全周期优化策略。研究结果显示，此方法能很好地提高系统的运行效率、改善新能源的利用、保证供电的稳定性，为增量配电网优化操作给出一定的理论支撑及实践指导。

关键词

增量配电网；源-网-荷-储协同；优化调度；多时间尺度；运行策略

1 引言

随着能源转型步伐加快与电力体制改革推进，增量配电网成了配电网侧达成能源改良调配及多种主体互动的关键平台。和传统配电网相比较，增量配电网的结构特征、运行模式以及负荷特性等都存在着明显的区别，大量的高比例分布式能源，多元化的柔性负荷和储能装置被接入之后，使得整个系统的复杂性也极大提高^[1]。因此，“源-网-荷-储”的协同运行及优化调度成为提高系统运行水平、保证电网的

安全稳定以及推动清洁能源利用的重要技术手段，具备很高的理论研究意义和工程实用价值。

2 增量配电网与“源—网—荷—储”系统概述

2.1 增量配电网基本特征

增量配电网就是指除了传统电力公司的存量资产以外的新增配电网部分，一般由社会资本来投资、建设以及运维。基本特点和传统配电网明显不同。在投资和运营主体方面形成多元化态势，多个主体以竞争形式取得特许经营权，从而形成了市场化竞争的机制，并提高了运营效率和服务品质。另外，在网架结构上，增量配电网一般服务新建的工业园区、商业中心或者城镇新区，因而网络规划更具有前瞻性，设备相对比较新，容易接受先进的智能化技术^[2]。最后负荷特性

【作者简介】黄胜奇（1992—），男，中国河南平顶山人，本科，工程师，从事综合智慧能源领域的技术研究与工程实践研究。

方面,增量配电网区域内一般有较多高可靠性的需求或者可调节的工业、商业负荷,为实行需求侧响应和柔性调度创造有利条件。

2.2 “源-网-荷-储”协同体系构成

源、网、荷、储协同系统是一个有机整体,各个部分之间相互影响、互相作用。“源”主要是接入配电网的分布式电源,有光伏发电、风力发电以及天然气分布式能源。它们是清洁能源供应的主要部分,但是其出力具有间歇性、不稳定性。“网”代表增量配电网自身,包括线路、变压器、开关设备及保护、控制和通信系统^[5]。它作为能量传输与分配的物理载体,又是实现协同控制的关键枢纽。“荷”指的是电力负荷,特别有调节能力的柔性负荷比如可中断负荷、可移位负荷等。它们从原来的被动的电能消费者变成了可以参与到系统调节过程中的积极因素。“储”是储能系统的意思,比如电化学储能等,充放电双向性赋予它调峰填谷、充当备用容量的关键灵活功能。

2.3 协同运行面临的挑战

高效的源-网-荷-储协同运行存在很多困难。一是由于分布式电源的强不确定性、波动性导致的。高比例新能源接入使净负荷曲线难以预测,给系统功率平衡及安全稳定运行造成巨大压力。二是多主体之间存在利益协调和信息交互的复杂性。电源、电网、用户、储能可以属于不同的所有者,它们的目标函数也不相同,怎样设计出一个合适的市场机制或者协调策略来满足各个方面的利益需求并且使得整个系统的效益达到最大值,这是需要解决的问题。三是协同控制的实时性强。系统状况变化很快,需要对大量的信息做迅速的处理,并及时地作出判断决策,因此对于通信网络来说可靠性要高,对运算方法来讲效率需要很高,对操纵信号而言精度要强。

3 系统建模与特性分析

3.1 分布式电源建模

精确建立分布式电源模型是实现优化调度的前提条件。光伏出力受光照、温度以及太阳能电池组件自身影响而产生变化,其数学表达式可以用上述几个变量之间的关系来描述,出力曲线具有一定的日内波动及季节性特点^[4]。风力发电机的输出功率与风速高度有关,并且一般服从某种概率分布,其出力具有较强的随机性和反调峰特性。微型燃气轮机可控分布式电源需要建立燃料消耗、出力范围、爬坡率等约束模型来描述其可控性能。

3.2 柔性负荷特性分析

柔性负荷属于“源、网、荷、储”协调系统中的一种可调节资源,依据它的反应特性可以分出大略三类。一是可中断负荷,在系统出现紧急情况的时候可以断开的负荷,为电力系统提供备用保障,模型的核心就是中断的时间长度和补偿方式。二是可以移动负荷,例如电动汽车的充电、部分

生产工艺等,用电总量固定,但用电的时间段可选择在规定时间内调节使用,有利于削峰填谷。三是可调负荷,例如中央空调、储能式电采暖等,在一定范围内可以连续调节自己的功率,给电网供应持续的功率。

3.3 储能系统运行模型

储能系统在协同运行中起着调节器、稳定器的作用,因此对它的运行模型要能准确地反映它的工作状态以及能量的变动情况。数学模型需要有荷电状态方程来描述其内部能量储存的状态,这可以保证储能系统能够安全地运作。需要创建一个充放电功率和效率模型,充放电功率会受其额定功率的影响,并且充放电的过程中会有效率损失^[5]。除此之外还有最大最小荷电状态约束以及循环寿命损耗约束等。这些模型组成了在调度中对储能系统行为的描述。

4 协同运行优化模型构建

4.1 优化目标与约束条件

协同运行优化模型属于一个多目标优化问题,主要的核心优化目标为使系统的总运营成本最优化,在该过程中要兼顾购电成本、燃料费、设备运维费和需求响应补偿费用等各个方面;其次是要将网络损耗降至最低限度;最后是要最大限度地消化可再生能源;这样可以使得清洁能源得以被充分利用。这些目标一般需要利用加权等方式转成单目标问题来解决。约束条件保证了优化的结果可靠有效,系统需要满足功率平衡的限制,这是基本的物理法则^[6]。网络结构要符合节点电压约束和线路传输容量约束等安全运行的要求,各个单元的运行还要遵守自身的技术限制,比如分布式电源出力的上下限,储能系统的SOC限制、柔性负荷响应能力的限制等。

4.2 多时间尺度调度框架

为解决可再生能源预测精度随时间尺度缩短而提高的特点,需采用多时间尺度调度框架。该框架通常包含日前调度、日内滚动调整和实时控制三个层级。日前调度以未来24小时为周期,基于预测数据制定初步的调度计划,确定各单元大致的出力曲线和启停状态。日内滚动调整以小时或15分钟为周期,利用更新的预测数据对日前计划进行修正,以应对预测误差。实时控制则以秒或分钟级运行,基于超短期预测和实时测量数据,对机组出力和负荷进行微调,确保系统的实时功率平衡。

4.3 模型求解算法

所建立的优化模型往往具有高维、非线性、多约束等特点,要选用合适的求解方法。对于可以近似为线性的模型来说,使用线性规划或者混合整数线性规划是比较好的选择。非线性模型要使用非线性规划或者智能优化算法来实现,遗传算法、粒子群算法等都属于这一类算法,它们都有很强的全局搜索能力,可以解决复杂非线性问题,但是运算量较大。根据模型的复杂程度以及对计算速度的要求来选择