

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

适当的算法或者多种算法相结合的方法求解。

5 协同优化调度策略

5.1 日前经济调度策略

日前经济调度策略属于全局优化的重要部分。在日前时间点里，它以未来的24小时内全系统的总发电成本最低作为主要目的，在考量了电力需求、可再生发电量预测以及电网电价等其他因素之后制定了电源、储能和负荷的调节计划^[7]。计划确定了常规分布式机组启停的状态及出力的基点，安排储能系统在低谷充盈、峰段排空的基本策略，并同可调负荷用户达成次日负荷调整时长、能力的相关协议，为次日电网经济运行打下基础。

5.2 日内滚动调整策略

日内滚动调整策略主要是应对不确定性。运行日不断推移，在此期间根据最新的超短期风光出力及负荷预测数据，对未来的数个小时的调度计划做滚动优化。该策略对日前计划做偏差校正，比如实际光伏发电量大于预测时可以令储能系统少放电或者多充电；也可以减少从主网购电。负荷突然增加的时候，储能可以快速放电，或者调用需求侧资源。该策略明显提升了调度计划对现实情况的适应能力，增加了系统稳定性。

5.3 实时平衡控制策略

实时平衡控制策略为保障系统的安全稳定运行的最后一道防线，以实时量测信息为基础数据，在分钟或秒的尺度上运行，采取基于电网实测数据的快速本地或者分布式控制办法，对于系统出现的一时性的功率短缺或盈余做出补偿。用储能系统毫秒级的快速响应能力去抑制频率的变化，或者利用预设好的负荷控制指令切除非重要负荷。实时控制策略侧重于响应速度以及控制的可靠性，可以作为日前、日内调度的有效补充，二者一起构成了一个完整的协同优化调度体系。

6 策略分析与验证

6.1 优化结果分析

分析优化调度策略的结果，以判断该策略的有效性。需要把重点放在优化前后的系统关键指标对比上。重点考察系统总的运行成本变化的趋势，分析出成本节约的原因到底是来源于购电费用的降低、设备利用率的提高还是网损的减少^[8]。并且需要对可再生能源的消纳率展开详细的剖析工作，查看弃风弃光的现象是否已经得到很好的缓解，在调度计划

里面也要仔细研究各个单元输出功率的变化趋势，并检查储能系统的工作方式、柔性负荷的表现情况能否达到预定的标准要求，以此来评定协同方法是不是切实可行且有效。

6.2 系统性能评估

系统性能评估要从全方位衡量出协同优化调度给增量配电网运行质量所起到的改善效果。应该包含安全方面的数据指标，比如各个节点电压是否保持在标准范围内、各条输电线路是否出现了过负荷的现象以及整个电力系统的稳定性如何等。除了总成本这个经济性指标之外还可以用资产利用程度、投资收益等作为经济性指标，而供电可靠率是否因为优化调度有了提高，则是衡量可靠性的一项标准。对这些多维的性能指标进行整体评价，可以公允地体现“源-网-荷-储”协同工作产生的综合效益。

6.3 与传统调度方式对比

与传统的调度方式相比，用提出的协同优化调度方法来突出优势。而传统调度方式一般采取“源随荷动”的刚性调度模式，并不能很好地应对分布式能源和负荷的波动性，常常会表现出较高的运行成本、有限的可再生能源接入能力以及紧张的系统运行裕度等弊端^[9]。用相同边界的仿真进行对比，能定性地表现出协同调度对于减少运行费用、提高新能源接纳能力、增加系统调峰的灵活性、保障供电稳定的作用明显，能够论证其先进性和必要性。

7 结语

本文对增量配电网中源、网、荷、储的协调优化调度问题进行了系统的研究，并构建了完整建模和优化框架。利用了多种时间尺度下的协同控制算法从而实现了系统的经济性、稳定性以及低碳性的最佳优化效果，从研究结果中可以看出，该方法可以有效的提升对新能源的消耗能力并且使得电力网络供应更稳定^[10]。本文给增量配电网优化运行提供理论支撑以及实践指导，未来将在提高预测精度、市场规则设计、人工智能技术运用等方面展开更深入研究，推动“源-网-荷-储”协同技术继续发展。

参考文献

- [1] 袁桂丽,丁宁,杨彪,等.源网荷储协同优化的主动配电网日前调度[J].科学技术与工程,2024,24(24):10337-10347.
- [2] 陈将宏,李雪莲,袁腾,等.源网荷储协同的主动配电网多时间尺度优化调度[J].重庆理工大学学报(自然科学),2024,38(03):343-353.
- [3] 范馨予,黄媛,吴疆,等.考虑源网荷储协同优化的配电网韧性提升策略[J].电力建设,2023,44(04):63-73.