

分布式综合能源管理系统需求响应调度优化

吴尚润¹ 高庆忠²

1. 华能新能源辽宁分公司, 辽宁 沈阳 110000

2. 沈阳工程学院, 辽宁 沈阳 110136

[摘要]文中研究了多生命力互补分布式综合能源管理系统的负荷特性、负荷需求弹性以及分时电价对负荷特性的影响。通过对配电网分时电价优化的建模和仿真分析,结合电力需求的分时电价弹性,建立配电网分段电价优化模型,并采用粒子群优化算法求解优化模型。最后,得出了分时电价对多能源互补分布式综合能源管理系统负荷特性的影响。结果表明,文中提出的需求响应方法可以改变负荷特性,减小峰谷差,提高电力生产效率,提高电网运行的可靠性,减少温室气体排放。

[关键词]分布式; 能源管理; 优化

DOI: 10.33142/sca.v7i11.14212

中图分类号: TM721

文献标识码: A

Optimization of Demand Response Scheduling for Distributed Integrated Energy Management System

WU Shangrun¹, GAO Qingzhong²

1. Huaneng New Energy Liaoning Branch, Shenyang, Liaoning, 110000, China

2. Shenyang Institute of Engineering, Shenyang, Liaoning, 110136, China

Abstract: This article studies the load characteristics, load demand elasticity, and the impact of time of use electricity prices on the load characteristics of a multi vitality complementary distributed integrated energy management system. By modeling and simulating the optimization of time of use electricity prices in the distribution network, combined with the elasticity of time of use electricity prices in electricity demand, a time of use electricity price optimization model for the distribution network is established, and the particle swarm optimization algorithm is used to solve the optimization model. Finally, the impact of time of use electricity prices on the load characteristics of a multi energy complementary distributed integrated energy management system was determined. The results indicate that the demand response method proposed in the article can change load characteristics, reduce peak valley differences, improve power production efficiency, enhance the reliability of power grid operation, and reduce greenhouse gas emissions.

Keywords: distributed; energy management; optimization

引言

能源绿色低碳转型是当今世界共同面临的重大课题,能源互联网是支撑以新能源为主体的新型能源系统的重要手段,也是实现我国能源转型和碳达峰碳中和的重要途径。综合能源系统是能源互联网的基本物理载体。在传统能源系统中,电网、热网、天然气网、交通网等分属不同公司管理和运营,不同能源系统相对独立,存在能源竖井,能源使用效率总体不高。综合能源系统通过电、热、冷、气等多种能源的互联互通,通过科学化管理实现多能互补及源网荷储协同,打破传统不同能源系统之间相互割裂的情形,在安全供能前提下最大化不同类型的效益,从而提升综合能源效率,促进可再生能源消纳,降低用能成本、提高用能可靠性,减少或延缓投资和建设等。

当前国内开展了许多综合能源系统的示范和应用,但由于综合能源系统横跨多个学科、多个系统和设备厂家、多个管理运营主体,许多项目存在“综合有余、智慧不足”的特点,其运行控制仍然以“被动式数字监控”为主,没有给予运行人员足够的分析决策帮助,没有实现“主动式

智能调控”,未能够充分发挥多能互补的效益。主要原因在于缺乏一个智慧能源大脑——综合能量管理系统(Integrated Energy Management System, IEMS)对实时运行中的电、热、冷、气进行智慧化的分析和决策。

城市在能源转型发展过程中面临着能源科技创新相对割裂、缺乏实证,能源产业数字化、智慧化滞后,能源行业壁垒众多,可再生能源送出和消纳困难等诸多挑战。由于城市范围大,尤其是海量分布式资源接入,需要进行协调优化调度的对象的种类繁多、数量庞大、控制方式多样。因此如何在保证系统安全运行的基础上协同多能流,适应多参与主体的需求,需要跳出电力行业边界,挖掘热、气、氢、煤与电能之间的互补性,激活多能间的灵活性,面对灵活性资源呈现出巨量、分布和异质的新特征,迫切需要突破能源互联网技术,实现横向的多能互补和纵向的源网荷储协同。在能源互联网的顶层方案设计中,涉及到各种能流(电、煤、气、热、交通等)的综合分析、溯源计算、综合减排和协同优化问题等,各种能流间相互耦合,其中专业性、综合性较强的多能流、溯源、优化、管理等

工作,都需要能够支撑城市级大规模综合能源系统分析和优化的多能流能量管理技术支持。

1 区域综合能源管理系统建设方案

区域综合能源管理系统平台应结合工程实际的实际需求,采用一体化调控体系,建设区域综合能源管理平台,提高电网调控能力和大范围优化配置资源能力。区域综合能源管理系统应用系统分别部署在安全区 I (实时区)、安全区 II (非实时区)、安全区 III (管理信息大区),并按中华人民共和国国家发展和改革委员会令 14 号《电力监控系统安全防护规定》要求设置安全防护设备。安全区 I 系统主要由采集通信服务器、SCADA 服务器、数据库服务器、能源管理服务器、MMI 子系统以及系统网络组成。安全区 II 系统主要由采集通信服务器、数据库服务器、功率预测服务器、能效管理服务器、能源交易服务器、MMI 子系统以及系统网络组成。主要功能包括实时监控与分析类应用、调度计划、能源调度管理、能源交易和能效监测等。主要实现对电源、储能站的调度和升压站的集中监控,实施集中统一操作、维护、检修管理,达到减员增效降低电网运行成本、提高经济效益的目标。各厂站计算机监控系统通过电力专网将信息送至能源运行监测交易中心,实现能源运行监测交易中心的远程监控。视频信息通过数据通信网送至能源运行监测交易中心,便于运行人员远程监控各站点。用户侧数据可通过公网或专线方式将信息送至能源运行监测交易中心。同时,区域综合能源管理系统具备与当地电网调度端通信接口。

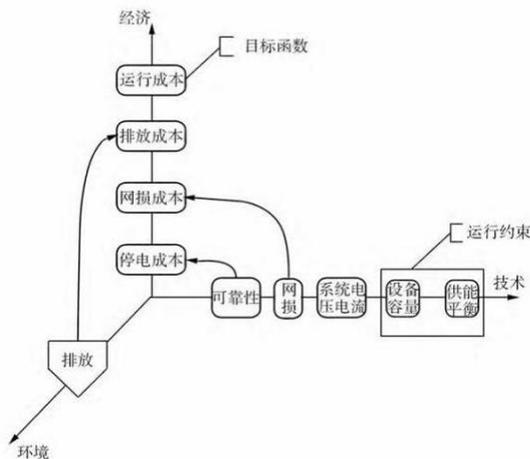


图1 能量管理的技术、经济和环境因素分析

2 综合能源管理系统设计

IES (Integrated Energy System, 综合能源系统) 的优化调度是一个复杂的技术问题,它涉及到多种能源的协同运行和优化管理,以实现能源效率的最大化和成本的最小化。IES 优化调度需要综合考虑风力、光伏、燃气轮机、燃气内燃机、燃气锅炉、余热回收系统、吸收式制冷机、电制冷机、蓄电池等多种能源设备。

主要目标是最小化 IES 的运行成本,包括燃气成本、

碳排放惩罚成本和失电负荷惩罚成本等。本文系统采用粒子群算法等智能优化算法来求解 IES 的优化调度问题,这些算法能够处理多个设备和能源类型的复杂性。通过多能互补,IES 能够实现不同能源形式之间的优势互补,提高能源利用效率并降低成本。多能互补集成优化的关键技术包括多能流混合建模、多能源流综合评估、多能流交易、商业运营模式、多能融合信息系统等。随着大数据和机器学习技术的发展,数据驱动的方法在 IES 的建模、评估以及动态调度中发挥着越来越重要的作用。

综合能源管理系统中组件的选择对系统建设非常重要。一个好的系统有利于提高能源的经济效益,发挥节能作用。因此,在对综合能源管理系统进行总体设计之前,应做好准备。例如,应详细分析综合能源管理系统中各应用设备的运行效率和策略,加强综合能源管理体系中能源分配的平衡,以提高能源的经济效益,最大限度地发展能源。此外,综合能源管理系统的总体设计应基于设备的选择。实施了与综合能源管理系统相匹配的运营策略,综合能源管理体系的结构如图 2 所示。



图2 典型供能架构

3 用电需求的时间价值弹性

多能源互补分布式集成能源管理系统的不同负载组成赋予了负载可调度特性。需求响应作为此类系统中的关键方法,对用户功耗模式和负载特性有重大影响。用户可以根据其负载特性和供电价格调整用电量。当电价高企时,他们可以减少电力需求,有效降低负荷。在高价时段减少的负荷可以转移到低价时段,从而降低电力成本和与电力购买相关的风险^[8]。需求的价格弹性是需求变化与促使需求转移的价格变化之比。

用户对电价的反应主要有两种方式:单期反应和多期反应。单周期响应涉及用户仅根据特定时间的价格调整其用电量。相比之下,多时段响应需要用户将电力消耗从高价时段转移到低价时段。这种方法不仅考虑了当前价格,还考虑了其他时期的价格。为此,我们采用自弹性系数和交叉弹性系数的概念,其定义如下:

$$\varepsilon = \frac{\Delta P / P}{\Delta \lambda / \lambda} \quad (1)$$

ΔP , $\Delta \lambda$ 分别是用户侧负荷和电价的增量, P , λ 分别

是用户侧电价变化前的负荷电价和电价。

用户对电价的反应主要有两种方式：单期反应和多期反应。单周期响应涉及用户仅根据特定时间的价格调整其用电量。相比之下，多时段响应需要用户将电力消耗从高价时段转移到低价时段。这种方法不仅考虑了当前价格，还考虑了其他时期的价格。为此，我们采用了自弹性系数的概念 ε_{ii} 与交叉弹性系数 ε_{ij} 其定义如下：

$$\varepsilon_{ii} = \frac{\Delta P_i / P_i}{\Delta \lambda_i / \lambda_i}, \varepsilon_{ij} = \frac{\Delta P_i / P_i}{\Delta \lambda_j / \lambda_j} \quad (i \neq j) \quad (2)$$

在一定时期内，由于电价的上涨（下跌），用户将减少（增加）这一时期的用电量，自弹性系数应为负；由于某一时期电价的上涨（下跌），用户在其他时期也会增加（减少）用电量。此时，交叉弹性系数应为正，即：

$$\begin{cases} \varepsilon_{ij} < 0, i = j \\ \varepsilon_{ij} > 0, i \neq j \end{cases} \quad (3)$$

本文将分时电价视为三阶电价，得到以下公式：

$$\begin{bmatrix} P_f \\ P_p \\ P_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_f^0 \\ P_p^0 \\ P_g^0 \end{bmatrix} + \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_f / \lambda - 1 \\ \lambda_p / \lambda - 1 \\ \lambda_g / \lambda - 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_f^0 \\ P_p^0 \\ P_g^0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

公式： $E = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix}$ 是电力需求的分时电价弹性矩阵，

f, p, g 分别为高峰期、正常期和低谷期。 $\lambda_f, \lambda_p, \lambda_g$ 分别是峰值价格、固定价格和使用时间后的谷值价格。 λ 是使用前的统一电价。 P_f, P_p, P_g 分别是分时电价实施后的高峰负荷、平峰负荷和低谷负荷。 P_f^0, P_p^0, P_g^0 分别是实施前的峰值负荷、平稳负荷和谷值负荷。

本文通过电力需求价格弹性矩阵最大化用户响应，在确保平均用户成本不上升的同时，维护供电公司的利益至关重要。鉴于模型的复杂性和众多变量，需要重复迭代求解，电力需求价格弹性矩阵是一种工具，用来衡量不同用户或用户群体对电价变化的敏感度。通过这种矩阵，供电公司设计需求响应（Demand Response, DR）策略，激励用户在电价高时减少用电，而在电价低时增加用电，以此达到电网负荷平衡、提高能源效率和降低成本。在确保平均用户成本不上升的同时，维护供电公司的利益，基于粒子群优化（Particle Swarm Optimization, PSO）的方法进行迭代求解。首先定义优化目标，目标是最大化用户响应，同时确保平均用户成本不上升，并考虑供电公司的利益。建立电力需求模型，利用电力需求价格弹性矩阵来表示不同用户对电价变化的响应。确定不同时间段的电价、用户的用电策略等优化变量。随机生成一组解作为粒子群的初始位置和速度。计算每个粒子所代表的解的适应度值，即满足优化目标和约束条件的程度。如果当前粒子的解比粒子历史上任何解都好，更新粒子的“个人最佳位置”。

如果当前粒子的解比群体历史上任何解都好，更新群体的“全局最佳位置”。根据个体经验和群体经验更新粒子的位置和速度。迭代求解重复更新步骤，直到满足停止条件，如达到最大迭代次数或解的改进小于某个阈值。最后输出最优的电价策略和用户响应策略，这些策略在满足所有约束的同时，最大化了用户响应。本文在实际电网中实施优化策略，收集反馈数据以评估效果和进行进一步的调整。粒子群优化是一种模拟鸟群觅食行为的优化算法，它通过群体内个体的协作和信息共享来寻找全局最优解。在电力需求响应优化问题中，PSO 有效地处理多变量和多约束的问题，为供电公司和用户提供双赢的解决方案。

粒子群改进的基本思路中主要在粒子群算法的本身参数上进行优化改进，能改进其算法的性能，但也局限于算法的性能，性能提升度有限，在应用多目标优化问题时其鲁棒性能可能较差。为使算法在微电网优化调度中能表现更好算法性能，本文在改进粒子群参数的基础上改进粒子群算法的粒子速度变换。具体的为改进粒子群算法优化过程中粒子速度变化的过程的改进。

4 示例分析结果

图3显示某地区500辆电动汽车的未优化负荷功率曲线与居民原始电力负荷功率的叠加结果。从图3可以看出，在20:00左右的用电高峰期，负荷功率峰值过高，负荷波动率过大，影响了电网的稳定性。同时，这一时期的电价也处于峰值，用户的充电成本过高。

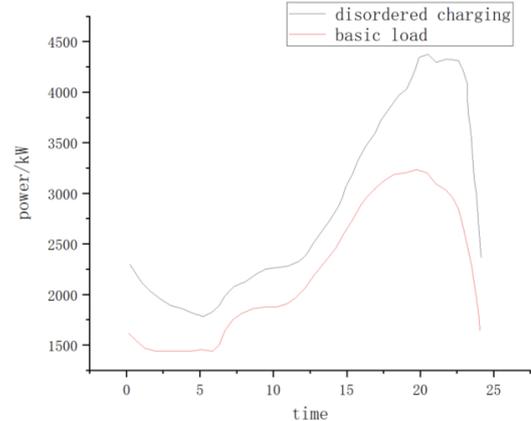


图3 无序充电下的负载曲线

低谷电价设定为 0.36 元/kWh，时间段为夜间 10 点到次日早晨 6 点，此时工业生产和商业活动较少，居民用电也处于较低水平。正常电价为 0.86 元/kWh，时间段为早晨 6 点到上午 9 点，下午 5 点到晚上 10 点，此时是日常活动较为频繁的时期，但不是用电最高峰。高峰电价为 1.38 元/kWh。时间段为上午 9 点到下午 5 点和晚上 10 点到午夜，此时时段包括了工作时间和晚高峰，用电需求较大。

图4对所提出的方法、传统粒子群优化算法和遗传算法进行了比较，并求解了所提出的目标函数。结果表明，在无序充电条件下，负载的峰谷差分别为 2588.02kW、

2277.21kW、2270.64kW 和 1707.11kW，负载波动率分别为 56.38%、54.68%、54.37%和 52.06%。收费费用分别为 8746.25 元、8574.98 元、8490.69 元、8211.07 元。从仿真结果可以看出，使用本文方法的优化结果是最优的，这验证了本文方法的有效性。

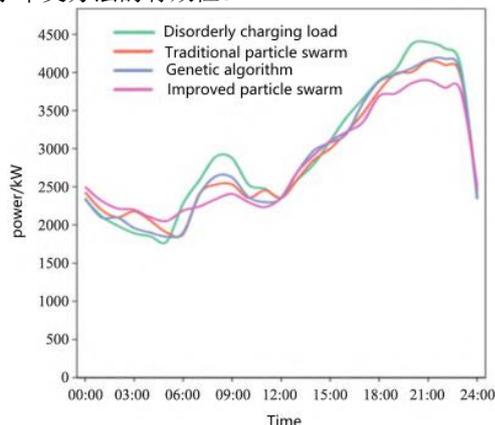


图4 不同优化方法下的载荷曲线

5 结论

本文研究了多能源互补分布式综合能源管理系统的负荷特性、需求弹性和分时电价的影响。通过对配电网分时电价的优化建模和仿真，考虑电力需求的弹性，建立分时电价优化模型，并使用粒子群优化算法求解。然后分析了这种定价对系统负载特性的影响。优化分时电价可以减少峰谷差。不同的定价周期和电价制定可以改变用户的消费习惯，改善整体负荷特性。在配电网调度过程中，这些负载特性可以帮助缓解传统网络调度压力。在高需求时期提高峰值负荷价格会鼓励用户转移一些负荷，从而减轻网络的运营压力并提高可靠性。

在需求侧管理中实施可中断负荷项目可以降低峰值

负荷，调整电网负荷分布，减少配电网建设投资。未来的研究可以将实时负载变化整合到电价设定中，以进一步完善电动汽车充电策略。

多能互补分布式能源系统能将多种具有互补性的分布式能源集中于同一网络中，从而提高整个区域能源系统的能源利用率、经济性与稳定性。文中基于实际工程情况，提出把各分布式能源、各能源负荷以及区域内的能源服务作为整体考虑，按照独特的运行模式进行一体化能量管理调控。基于所提出的区域多能互补分布式能源循环经济体系的构想，建立能源综合管控中心，搭建综合能源管理系统平台，在保证区域内电力系统稳定、安全、可靠的前提下，对各类分布式能源系统进行多能互补、优化调度，以便实现整个系统能源利用效率的最大化以及经济效益的最大化。

基金项目：沈阳市科技计划项目（22-322-3-29）。

【参考文献】

- [1]胡志毅. 多能互补分布式能源系统架构及综合能源管理系统研究[J]. 能源与节能, 2019, 10(169): 57-58.
- [2]蔡世超. 智慧能源多能互补综合能源管理系统研究[J]. 应用能源技术, 2017, 10(228): 1-4.
- [3]侯嘉麒. 基于能源管理的新能源系统运行数据综合处理分析[J]. 电气应用, 2023, 42(10): 35-42.
- [4]陈锦宏. 综合智慧能源管理系统的设计和实现研究[J]. 中国新通信, 2023, 25(24): 3-4.
- [5]赵志强, 李寿祥. 综合智慧能源管理系统的设计和实现[J]. 自动化应用, 2022(12): 172-174.

作者简介：吴尚润（1995.12—），毕业于沈阳工程学院，自动化专业，就职于华能新能源辽宁分公司，运维员，助理工程师。