

基于共享聚合相变储能系统的 区域联合削峰填谷策略

张超¹, 贾长杰¹, 何文俊¹, 钟泰军¹, 冯忠楠²

(1.湖北省电力勘测设计院有限公司,湖北武汉 430040;2.华中科技大学强电磁工程与新技术国家重点实验室,湖北武汉 430074)

摘要:相变储能系统作为一种新型的具备高弹性、高可靠性与绿色性的分布式储能形式,能够以柔性可调负荷形式为电网提供灵活可靠的辅助服务。为进一步挖掘相变储能系统的应用潜力,提出一种基于共享聚合相变储能系统的区域联合削峰填谷策略。首先,构建分布式相变储能单元的聚合可控模型,在此基础上,设计一种基于共享相变储能的区域联合控制可行架构;然后,在非合作博弈、合作博弈等不同商业模式下,建立区域内及区域间的联合削峰填谷控制策略;最后利用量子粒子群算法对所提控制策略进行有效求解。算例仿真结果验证所提策略在降低负荷方差及区域电力系统运行成本等方面的优越性,可作为电网辅助服务的一种新手段。

关键词:相变储能;聚合储能;共享储能;区域联合削峰填谷;量子粒子群优化

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.05.003 中图分类号:TM732 文章编号:1673-9140(2022)05-0025-10

Regional-joint peak-load shifting strategy based on the aggregated systems of sharing phase change material energy storage

ZHANG Chao¹, JIA Changjie¹, HE Wenjun¹, ZHONG Taijun¹, FENG Zhongnan²

(1.Power China Hubei Electric Engineering Co., Ltd., Wuhan 430040, China; 2.State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: As a distributed energy storage with high flexibility, high reliability, and a green economy, the energy storage system with phase change materials can provide flexible and reliable auxiliary services for the grid as a kind of adjustable load. For the purpose of further investigating the application potential of distributed energy storage systems with phase change material, a kind of regional-joint peak-load shifting strategy is presented based on the aggregated system with shared phase change energy storage. Firstly, an aggregated controllable model for units of distributed phase change material energy storage is proposed. After that, a feasible regional-joint control architecture based on shared phase change energy storage is designed. Then, a joint peak-load shifting strategy of intra-regional and inter-regional joint peak-shaving and valley-filling control strategies is established under different business models such as the non-cooperative game and the cooperative game. Finally, the proposed control strategy is effectively solved by the quantum particle swarm algorithm. The simulation results verify the feasibility and effectiveness of the proposed joint peak-shaving strategy in reducing the load variance and regional economic cost. The proposed method is also a new ap-

收稿日期:2020-12-17;修回日期:2021-06-18

基金项目:湖北省电力勘测设计院科技项目(K2020-2-02)

通信作者:冯忠楠(1998—),女,博士研究生,主要从事新能源发电、储能系统运行与控制研究;E-mail:fengzhongnan@hust.edu.cn

proach to grid auxiliary service.

Key words: phase change material energy storage; aggregated storage; shared energy storage; regional-joint peak-load shifting; quantum particle swarm optimization

近年来,随着中国电力行业尤其是清洁能源发展迅猛,电源以及网架结构发生重大变化,导致电网调峰问题日益突出,这对系统安全、经济运行提出了更高要求^[1-3]。传统电网主要依靠抽水蓄能电站、部分水电站出力灵活安排以及尚未大量应用的火电厂深度调峰等,但这类电源侧集中式削峰填谷手段都存在不同程度的应用局限。例如抽水蓄能电站显著依赖地形,投资费用高,并不能完全适应电力市场环境下辅助服务的发展趋势和应用要求。在构建坚强智能电网的呼声下,灵活多样的储能技术应运而生,储能系统参与削峰填谷服务也迅速成为研究热点。

除抽水蓄能等机械、电磁物理储能外,电化学储能以其能量密度高、投资建设方便、技术成熟可靠等优异性能,得到了业界广泛青睐。为了延长电池使用寿命,文献[3]提出一种基于动态规划的实时修正优化控制策略,并已成功应用于南方电网兆瓦级锂离子电池储能示范工程;文献[4]提出采用恒功率充放电策略控制电池起始放电时间以跟随负荷实时变化,其有效性已在深圳宝清电池储能站现场测试中得到了验证;文献[5]运用电池储能和需求响应作为两类主要调峰手段构建了工业园区参与调峰的电池储能—需求响应联合规划;文献[6]从电力系统调峰调频双重需要出发,提出了一种兼顾混合储能调频需求的独立微电网投资优化方法;文献[7]计及储能调频降低火电厂机组磨损收益与储能调峰延缓投资,基于全寿命周期理论对配置储能系统的火电厂进行经济效益评价。

上述研究成果为电化学储能在电网辅助服务方面的应用奠定了良好的理论与工程实践基础,但现有集中式电池储能仍存在着较多局限性与不可忽视的技术问题,如单一电池类型难以兼顾多种辅助服务的需求、高密度电池本体安全性尚未完全解决、大容量储能电站需占用宝贵的城区用地^[8]等。事实上,从能源存储的角度来看,安全可靠、灵活可调、廉价环保的储能技术并不是幻想,相变储能系统即是其中一种非常具有应用前景的新型储能形

式^[9]。文献[10]证实了相变复合材料的高储能性能和耐久性能,在夏季可显著降低空调负荷,在电力调峰方面大有潜力;文献[11]基于太阳能和相变储能将电热负荷全部转移到夜间低谷电价时段,所提技术已成功应用于京天能投总部办公大楼零碳馆围护结构节能改造示范工程中。在供暖方面,文献[12]提出了一种直膨式太阳能热泵联合相变储能地板供暖系统,可保证室内温度在20℃左右连续供暖10 h。相较于化学储能,相变储能更易就地化配置,且在安全性方面具有显著优势,更突出的是相变储能系统具有的大热惯性,使其在兼顾温控调节时仍能灵活参与电力系统优化运行。若将分布式相变储能单元聚合形成相当体量的柔性可控负荷,则可在电网削峰填谷、新能源消纳中作为重要的灵活调节资源,实现辅助服务支持。但遗憾的是,当前针对这方面的研究成果寥寥,亟需深入开展相变储能参与电力系统优化运行控制策略的研究。

针对前述需求,本文提出一种基于共享聚合相变储能系统的区域联合削峰填谷策略。遵循“构建模型—策略设计—算法仿真”的正文结构展开:首先,构建一种分布式相变储能单元聚合模型;其次,基于非合作博弈、合作博弈等模式,通过动态调节、投切相变储能单元等方式,设计就地及临近区域间共享相变储能系统的联合削峰填谷策略及利益分配方法;最后,基于深圳电网实际工程数据仿真,证实本文所提策略能够显著减小负荷曲线方差,提升电网运行可靠性及区域供电经济性。

1 相变储能系统及其聚合

1.1 相变储能系统基本原理及特性

相变储能系统的主要组分包括热泵、相变储能墙体、制冷剂、风扇等,其具体工作原理:相变储能墙体以制冷剂作为媒介,通过热泵将富余电能转换为热能,并储存于墙体内相变材料中,墙内存在制冷剂流循环管道,其气隙可供空气流通换热;墙内安装有风扇,可灵活调节强制空气循环强度,以

增强室内与相变墙内气隙空气的流动性,实现室内温度的可靠控制,如图 1 所示。

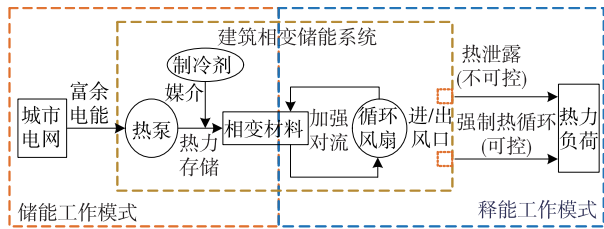


图 1 相变储能系统工作原理

Figure 1 Operating principle of energy storage system with phased change materials

作为一类新型储热系统,相变储能存在储能和释能 2 种工作模式:储能模式下,相变储能系统开启热泵,将电能转化为热能,以制冷剂为媒介存储于相变材料中;释能模式下,相变储能系统减小热泵功率或停用热泵,依托自身储存热量,并通过循环风扇风速调节实现可控的室内温度控制。由图 1 可知,相变储能系统与空调系统的组成、换热环节及其过程基本相同,故其能效比与空调基本相当,可达到 3.5 左右。此外,由于相变材料特殊的热力学性质,相变储能能量密度已经达到化学储能数量级,使其能够在温度基本不变的情况下通过相变过程转移大量热能,控温稳定性强。

因此,建筑相变储能系统可视为一种可调节、可转移、可中断的分布式负荷。与大电网相比,单个房间墙体的相变储能容量毕竟有限,但如果能够将区域内成百上千个相变储能单元聚合形成灵活的、可直接由电网控制的弹性负荷,即可为电网提供一种足够强大的新型辅助服务手段。实际上,类似的思想已经在化学储能上得到了应用,如将原本分散在用户侧的储能装置集中到云端,基于分布式化学储能实现云储能^[13]应用,可为大量用户提供分布式储能服务。

1.2 相变储能单元电—热模型

为实现上述构想,首先需对单个相变储能单元进行合理准确建模。为便于分析,将相变储能系统热力网络简化为如图 2 所示,采用热网络分析法进行建模。各围护结构间、围护结构与室外、热泵与相变材料间通过冷凝剂的热量交换等热对流、热辐射过程,均以热阻等效^[14-15],各围护结构自身的储热以热容等效。

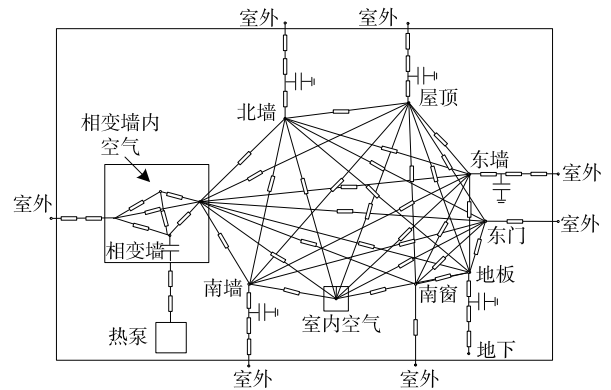


图 2 相变储能系统简化热力网络模型

Figure 2 Simplified thermal network model for energy storage system with phase change materials

因此,可构建相变储能系统热力模型为

$$Q_{ar}(t) = Q_{pa}(t) + Q_{on}(t) + Q_{ia}(t) \quad (1)$$

$$\frac{dH_p(t)}{dt} = -Q_{pa}(t) + Q_{op}^r(t) + Q_{ip}^r(t) + Q_{HP}(t) \quad (2)$$

$$Q_{or}^c(t) = m_i \frac{dH_i(t)}{dt} + Q_{ir}(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^n Q_{ij}(t) \quad (3)$$

$$Q_{ar}(t) + \sum_{i=1}^n Q_{ir}(t) = 0 \quad (4)$$

其中,式(1)~(4)分别对应于相变墙内空气、相变材料、其余墙体、室内空气节点的热平衡方程; $Q_{ar}(t)$ 、 $Q_{pa}(t)$ 、 $Q_{on}(t)$ 、 $Q_{ia}(t)$ 分别为相变墙空气向室内空气的对流换热以及相变材料、相变墙外侧、室内侧墙板的对流换热,单位为 W; $H_p(t)$ 、 $H_i(t)$ 分别为相变材料及其余围护结构的焓变,单位为 J; $Q_{op}^r(t)$ 、 $Q_{ip}^r(t)$ 分别为墙体外侧、墙体内侧与相变材料管道的辐射换热量; $Q_{HP}(t)$ 为热泵压缩机产热功率; $Q_{or}^c(t)$ 、 $Q_{ir}(t)$ 、 $Q_{ij}(t)$ 分别为室外空气与其余墙体、墙体与室内空气、不同墙体间的换热。

1.3 分布式相变储能单元聚合模型

前述电—热模型固然能够实现热力网络各节点温度、换热量的精确计算,但涉及相变储能大规模聚合时该模型过于复杂且冗余。实际上,相变储能系统电力外特性表现为热泵电功率,热力外特性表现为相变材料存储热量。据此,可以从这 2 个方面实现分布式相变储能系统的聚合控制。

在电力侧,直接将各相变储能单元热泵聚合控制,聚合后热泵功率具有如下约束:

$$0 \leq \sum_{n=1}^N P_{HP,n}(t) \leq N \cdot P_{max} \quad (5)$$

式中 P_{max} 为单台相变储能系统热泵输出功率最大值; $P_{HP,n}(t)$ 为第 n 台热泵的输出功率; N 为聚类相变储能系统热泵总数; $P_{HP}^A(t)$ 为聚合相变储能系统热泵功率。

而在热力侧,为实现储能系统热力状态监测,定义聚合相变储能系统储热容量状态(state of charge, SOC)为

$$S(t) = \frac{\sum_{n=1}^N H_{p,n}(t)}{\sum_{n=1}^N H_{p,n}^{max}} \quad (6)$$

式中 $H_{p,n}(t)$ 、 $H_{p,n}^{max}$ 分别为第 n 套相变储能系统 t 时刻焓变及完全相变前后焓差。因此,与常规电储能系统类似,可构建聚合相变储能系统热力侧控制约束:

$$S(t) =$$

$$S(t-1) + C_{ch} \cdot \sum_{n=1}^N P_{HP,n}(t) - \sum_{n=1}^N Q_{cr,n}(t) \quad (7)$$

$$S_{min} \leq S(t) \leq S_{max} \quad (8)$$

式(7)、(8)中 C_{ch} 为电热转换效率,取为 2.6; $Q_{cr,n}(t)$ 为第 n 套相变储能系统为维持室内温度所需热输出,可由前述相变储能系统热力网络计算得到; S_{min} 、 S_{max} 分别为聚合相变储能系统 SOC 上、下限; $S(0)$ 为调度周期聚合相变储能系统容量初值。

2 基于共享相变储能的区域联合控制策略设计

2.1 区域联合削峰填谷控制架构

在前述聚合模型的基础上,如何通过控制架构的设计和商业模式构建,充分发挥城市中广泛分布于各建筑内的相变储能单元大容量、宽尺度负荷调节能力,实现相变储能系统参与电网辅助服务的目标,是一个仍待解决的问题。

为此,本文提出一种区域联合削峰填谷控制架构,如图 3 所示,其基本思路:分布式相变储能系统与电网间通过配置简单的控制器,经由园区内各类型通信网络,与大型建筑或园区电网控制中心形成集中—分布式的底层控制架构,实现区域内相变储能单元的共享;同时,城市电网内的大型建筑/园区电网控制中心与电网控制中心形成第 2 层控制架构,实现区域间可控储能单元的共享。

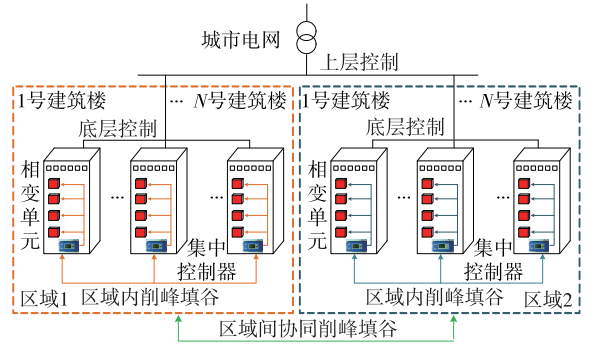


图 3 区域联合削峰填谷控制架构设计

Figure 3 Control architecture for Regional-joint peak-load shifting

在此基础上,本文提出 2 种区域联合削峰填谷方法,即基于共享相变储能的就地(区域内)及区域间的削峰填谷服务。具体而言,如当电网出现峰荷时,电网控制中心根据当前负荷水平和超短期负荷预测曲线,评估当前分布于城市各处的分布式建筑相变储能系统总体耗能情况、未来一段时期内的负荷增长等。首先采取“区域内削峰填谷”策略,以该负荷节点所接分布式相变储能系统全部可切除作为约束,如式(1)~(8)所示,评估其对电网指标的改善作用。若此时电网指标改善仍不甚理想,即母线负荷变化与该节点所接相变储能系统可调节容量不匹配时,则转而采取“区域间削峰填谷”策略,在各区域满足前述约束的情况下,研究就地临近区域间相变储能系统参与共享后的电网指标改善。优化形成能满足用电充裕性要求及经济性运行指标的削峰策略,通过上述双层控制系统下达执行。

2.2 区域内削峰填谷策略

此策略以园区级供电区域作为研究对象,以单一区域作为唯一利益主体。区域通过节点所接相变储能单元的完全共享,实现负荷方差最小的目标,该目标函数为

$$f_1 = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T \left[P_L(t) + \sum_{n=1}^N P_{HP,n}(t) - \frac{1}{T} \sum_{j=1}^T (P_L(j) + \sum_{n=1}^N P_{HP,n}(t)) \right]^2 \quad (9)$$

式中 T 为控制周期,本文取为 24 h; $P_L(t)$ 为 t 时刻的负荷功率值。通过该目标函数及式(1)~(8)约束,即可求解得到相变储能区域内联合削峰

填谷策略。

2.3 区域间削峰填谷策略

当单个该区域负荷变化与该节点所接相变储能系统可调节容量不匹配时,仅依靠区域内可调单元仍无法改善电网运行指标,高耗能机组的频繁启停仍将提升电网供电成本,降低能源利用效率。而此时,临近区域的可调相变单元可能仍存在一定控制空间,因此可以设想,各区域通过与其他区域之间的沟通协商,协调各区域间的负荷变化及可控相变储能单元,以本区域及临近区域所接相变储能单元完全可切除或可投为约束,并通过议价交易实现进一步降低运营成本的目标,实现区域间基于共享储能的协同削峰填谷优化控制。

需要注意的是,与前述区域内削峰填谷策略不同,区域间共享储能联合削峰填谷存在区域合作模式与收益结算的问题。假设每个区域都拥有独立选择与其他区域交易电能的权利,博弈参与者(Players)为配电网内各区域,博弈策略(Strategies)为各区域各时刻负荷功率及区域交换功率,则区域间的联合削峰填谷模式将存在着以下几种可能。

1) 区域间采用非合作博弈模式。

在这种模式下,各区域研究主体仍为区域自身,且各区域之间不存在具有约束力的协议,但单个区域所获收益不仅取决于自身负荷曲线调整效果,还取决于邻近区域功率交换支援。假设邻近区域以特定电价向所需区域售/购电,单个区域需综合考虑自身负荷曲线波动、削峰填谷效果及邻近区域功率交换成本因素,以得到自身最优的控制策略。各区域的目标函数(即为博弈主体收益函数)描述为

$$f_2 = \mu_1 f_1 + \mu_2 \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^m p_{\text{ex},s}^i(t) P_{\text{ex},s}^i(t) \Delta t \quad (10)$$

式中 m 为可联合邻近区域个数; $p_{\text{ex},s}^i$ 、 $P_{\text{ex},s}^i$ 分别为该区域 i 与区域 s 进行交易的电价及功率; μ_1 、 μ_2 分别为本区域削峰填谷效果 f_1 及联合成本的优化系数。

在满足相应约束的情况下,参与博弈的各区域依据各自的收益函数不断调整本区域相变储能系统投切功率及与邻近区域的功率交换,直到其利益达到最大,各区域均不会再改变自身策略,即达到 Nash 均衡

点,即实现了区域间削峰填谷策略的设计。

2) 区域间采用合作博弈模式。

在这种模式下,不同区域间通过制定可信或具有约束力的承诺,完全共享各自的分布式相变储能单元,协调相互之间策略选择以获取全体最优,改善多个区域总体的负荷曲线波动。在允许转移支付的情况下,在保证每个区域至少获得非合作博弈收益的基础上,实现总收益达到最大值的合作联盟型博弈,最后进行全体收益的再分配。

出于对电网影响最小的考虑,将区域总负荷方差纳入考虑,同时在优化中优先允许区域间联络线进行电能交换,尽量减小区域对电网的依赖。各区域通过充分的信息交互联动调整相变储能系统控制策略,使得总体收益最大,其目标函数可以描述为

$$f_3 = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^T \left[P_L^k(t) + \sum_{n=1}^N P_{\text{HP},n}^k(t) + \sum_{s=1, s \neq k}^m P_{\text{ex},s}^k(t) - \frac{1}{T} \sum_{j=1}^T \left[P_L^j(t) + \sum_{n=1}^N P_{\text{HP},n}^j(t) + \sum_{s=1, s \neq k}^m P_{\text{ex},s}^j(t) \right] \right]^2 \quad (11)$$

通过上述目标函数及式(1)~(8)约束,即可求解得到相变储能区域间联合削峰填谷策略及总体收益。为促进合理有效的合作,可引入经济学领域的 Shapley 值法^[16-17],依据合作博弈各参与方对联盟总目标的实质性贡献对博弈后剩余利润进行再分配,其解具有唯一性,在此对其原理及定义不再赘述。

3 算法求解

前述优化模型可化为如下标准形式:

$$\begin{cases} \min f = f(x) \\ \text{s.t. } g_i(x) \leq 0, i = 1, 2, \dots, p \\ h_j(x) = 0, \end{cases} \quad (12)$$

式中 f 为目标函数; x 为优化变量; $g_i(x)$ 为不等式约束条件; $h_j(x)$ 为等式约束条件; p 、 q 分别为不等式和等式约束条件的个数。

在实际应用中,粒子群算法存在着全局寻优能力较差、容易早熟等不足^[18]。针对这些问题,本文采用一种量子粒子群优化算法(quantum particle

swarm optimization, QPSO)对削峰填谷数学模型进行优化,采用量子位对粒子位置进行编码,通过空间变换将粒子遍历范围映射至优化问题的解空间。具体而言,采用复数形式表示相变储能系统控制方案,以实部表示相变储能的投切,虚部表示每套相变储能系统的热泵功率。采用3位量子位表示每套相变储能系统,第1位取值为0或1,分别表示该套相变储能系统切出或投入;第2位表示相变储能系统的热泵功率;第3位表示相变储能系统的SOC容量。

基于量子粒子群优化算法的相变储能系统削峰填谷优化控制流程图如图4所示。

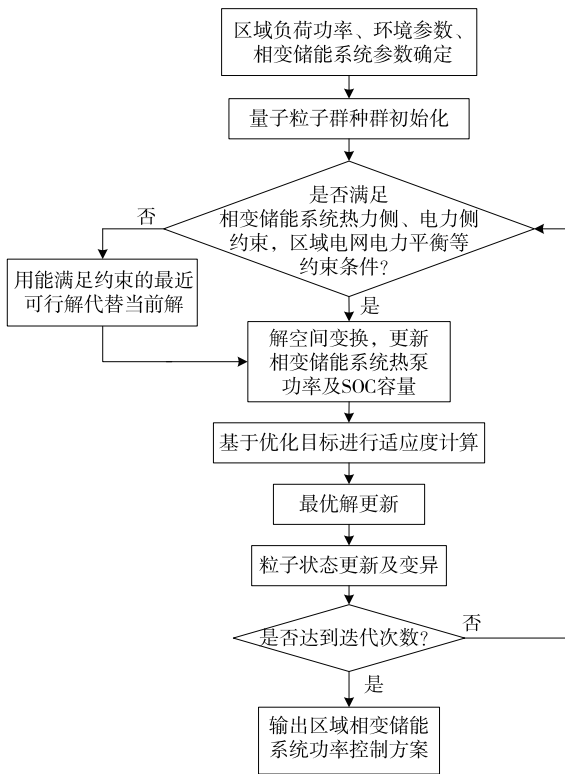


图4 基于量子粒子群优化算法的削峰填谷优化控制

Figure 4 Flowchart of peak-load shifting control strategy based on QPSO

此外,为克服粒子群算法的早熟收敛问题,引入变异机制,以提高算法全局搜索能力和寻优效率。具体而言,每个粒子在 $[0, 1]$ 之间产生一个随机数,若该随机数不大于设定的变异概率,则对粒子概率幅进行变异操作:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_{ij} \\ \sin \theta_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta_{ij} \\ \cos \theta_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(0.5\pi - \theta_{ij}) \\ \sin(0.5\pi - \theta_{ij}) \end{bmatrix} \quad (13)$$

此外,在迭代求解的过程中,为了平衡全局和局部寻优,惯性权重采用非线性递减策略。惯性权重的计算公式如下:

$$\omega = \lambda_1 e^{\frac{1}{\lambda_2 + \lambda_3 u}} \quad (14)$$

式中 u 为当前迭代次数; λ_1 、 λ_2 、 λ_3 均为超参数,用于控制惯性权重递减的趋势。

4 算例分析

以深圳某变电站所接配电网典型日的负荷曲线为例,如图5所示。设该变电站所接相变材料储能建筑有50栋,每栋60户,一共有3000间,每栋安装一台相变储能总投切设备,区域拓扑架构如图2所示。若每户相变储能初始SOC为0.1,热泵功率为3kW,容量为10kW·h,则聚合相变储能即可视为9MW/30MW·h储能系统,达到兆瓦级储能规模,这与当前大型集中式电化学储能电站规模基本相当。因此,通过聚合相变储能系统参与电网辅助服务在理论上是完全可行的。

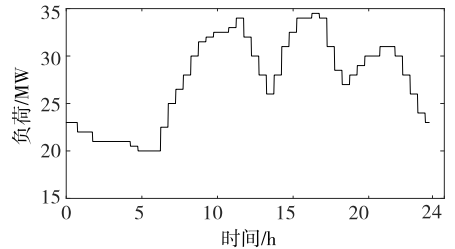


图5 深圳某变电站所接配电网典型日负荷曲线

Figure 5 Typical daily load curve of a substation connected to the distribution network in Shenzhen

算法参数设计:种群规模为50;惯性因子变化范围为0.4~0.8;变异概率为0.04;学习因子 c_1 、 c_2 均为2.0;限定迭代次数为150次,基于Matlab平台编程。目前,电网对于区域参与削峰填谷的经济效益结算机制尚不明确,故本文仍采用深圳峰谷平电价进行成本核算,即高峰时段1.1元/(kW·h)、平时段0.7元/(kW·h)、谷时段0.3元/(kW·h)。

设置对比方案为采用常规空调满足冷热负荷需求的情景,约束相变储能系统需与空调达到相同的控温效果。空调的热转换效率与相变储能系统所配置的热泵一致,恒为2.6。空调仅能依赖房间墙体与室内空气具有的储热容量,可视为不具备负荷转移的能力。为验证本文所提区域内、区域间联

合削峰填谷策略的有效性与优越性,共设置 4 种方案进行对比:

- 1) 通过空调满足用户热需求;
- 2) 聚合区域内相变储能单元转移负荷时段,即区域内削峰填谷;
- 3) 基于非合作博弈模式联合区域间相变储能单元转移负荷时段,即区域间非合作博弈削峰填谷;
- 4) 基于合作博弈模式联合区域间相变储能单元转移负荷时段,即区域间合作博弈削峰填谷。

4.1 区域内削峰填谷策略验证

采用典型日负荷数据,分别基于空调和建筑相变储能系统满足用户热需求,对区域内部聚合相变储能单元进行优化,得到不同模式下负荷曲线对比如图 6 所示,相变储能容量 SOC 变化曲线和热泵功率如图 7 所示。

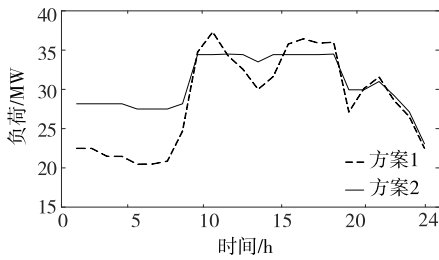


图 6 方案 1、2 负荷曲线对比

Figure 6 Comparison of load curves under case 1, 2

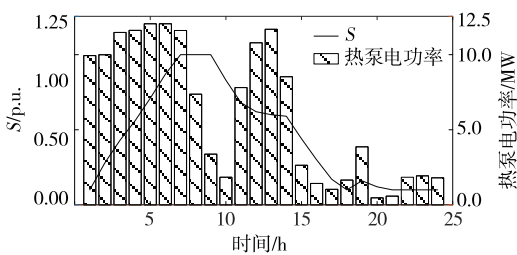


图 7 方案 2 相变储能单元热泵功率及 SOC 变化

Figure 7 Curves of heat pump power and SOC under case 2

由图 7 可知,方案 1 空调存储容量相当有限,无法在电网电能富余时消纳电能。在白天用电高峰期,因室外温度增加热负荷增大,峰谷差进一步增大,达到 17.302 5 MW。对比图 6 可知,由于相变储能系统能够动态调节热泵功率和投切,在谷期投入相变储能单元或者增大热泵功率消纳电网多余的电能,在峰期切出相变储能或者减少热泵功率,起到负荷平滑作用。同时,室内房间热需求可以通过

相变储能系统自身储存的能量满足,保持全天室内房间温度适宜。削峰填谷前后负荷曲线指标的对比情况如表 1 所示,可以直观看到:相变储能方案减小负荷方差达到 50.2%,峰谷差减小 33.9%,负荷率增长 21.7%,削峰填谷效果显著。

表 1 方案 1、2 负荷曲线指标对比

Table 1 Comparison of load curve under case 1, 2

方案	峰谷差/MW	负荷均方差/MW	负荷率
1	17.302 5	4.764 7	0.732 8
2	11.434 3	3.361 9	0.891 9

4.2 区域间削峰填谷策略验证

基于典型日负荷数据,叠加根据负荷波动的概率分布进行抽样模拟得到的随机性部分,在模拟实际负荷波动的基础上,对比不同优化方案的削峰填谷效果。

1) 非合作博弈模式。

在模拟负荷波动情况下,以临近两区域联合及 $\mu_1 = 0.5$ 为例,各方案负荷曲线如图 8 所示。由图 8 可知,考虑负荷实际波动时负荷曲线峰谷差可能进一步加剧,区域内灵活调用相变储能单元参与削峰填谷能够在一定程度上拉平负荷曲线,但效果并不理想,故区域通过向临近区域买电实现了更优的削峰填谷效果:区域内削峰填谷后负荷均方差达到 5.471 7 MW,而区域间联合削峰填谷后降为 3.609 8 MW。削峰填谷后中午时段负荷水平显著降低,有利于区域内可调发电机组调整出力以维持供电充裕性。因此可知,区域间协同对削峰填谷的作用效果优于区域内就地平衡负荷策略。此外,还可以通过调节不同目标占比来满足不同区域对削峰填谷效果和区域经济效益的多样需求,具有较强的适应性。

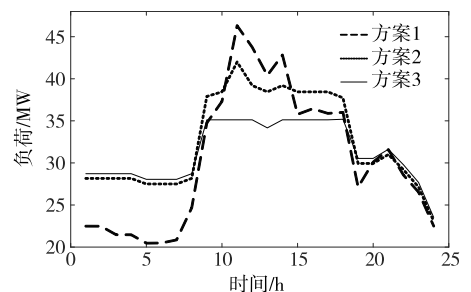


图 8 方案 1、2、3 下区域 1 负荷曲线

Figure 8 Load curve of Area 1 under case 1, 2 and 3

但是,此模式并未考虑到临近区域为配合本区域导致的临近区域相关指标的恶化,如临近区域负荷曲线情况等。仅通过区域间电能交易指标来衡量联合调节对参与协同区域的负面影响尚不全面,故考虑通过合作博弈模式进行完善。

2) 合作博弈模式。

在前述非合作博弈的3种对比方案基础上,增加方案4,不同区域的负荷曲线如图9所示。就单个区域而言,区域1的负荷曲线在非合作博弈模式下最为平滑,合作博弈模式下虽然负荷峰谷差加剧,但由于与区域2负荷曲线存在一定程度的时段互补关系,因而从总体区域来看,仍为合作博弈模式下负荷分布最为平均。

从可控相变储能单元电功率角度也可以体现合作博弈模式下的区域互补性,如图10所示。由于

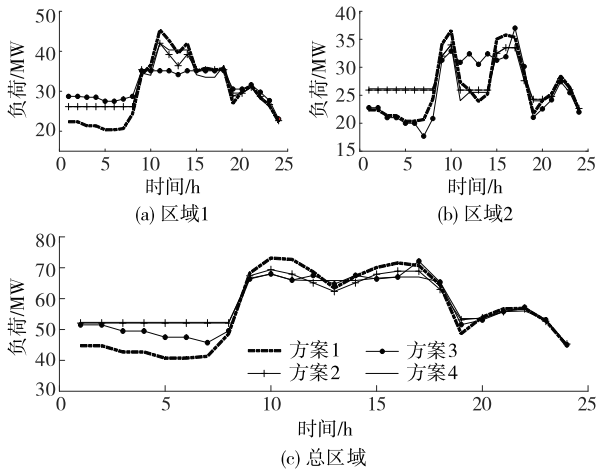


图9 不同方案下不同区域负荷曲线对比

Figure 1 Comparison of load curves under different case

下午时段区域2负荷功率有较大幅度的增大,为了限制总体负荷高峰,区域1需减小其热泵功率以降低此时的总体负荷。同样地,较之仅就地平衡,区域1需要在中午时段增大其热泵功率以达到整体填谷的最佳效果。由此也可看出,两区域协同以达到总体最佳削峰填谷效果需做出控制策略调整,据此双方应当得到一定的补偿,即对区域总利益进行合理分配。

具体地,在不同模式下各区域负荷方差及经济成本数据如表2所示。由表2可知,在非合作博弈模式下,随着负荷方差在目标函数中占比的逐步增大,区域1负荷方差逐渐减小,但区域2负荷曲线有所恶化,总区域负荷方差也不断增大。而在合作博弈模式下,与区域内就地削峰填谷相比,虽然各区域负荷方差有小范围的增长,但总区域负荷方差得

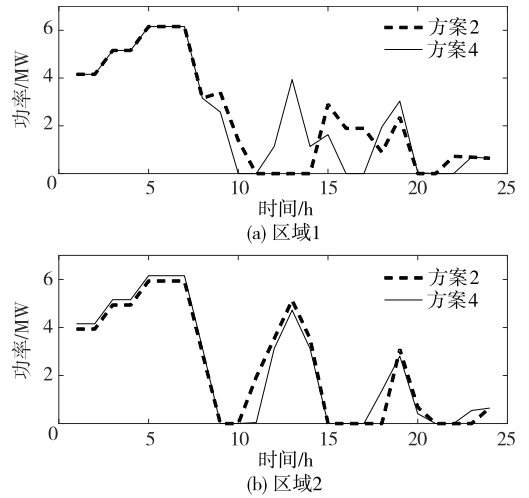


图10 方案2、4相变储能单元电功率对比

Figure 10 Comparison of heat pump power of phase change material energy storage under case 2, 4

表2 不同方案下各区域负荷方差及经济成本对比

Table 2 Comparison of regional load variance and economic costs under different schemes

方案	负荷均方差/MW			经济成本/千元		
	区域1	区域2	总区域	区域1	区域2	总区域
1	7.990 5	5.367 8	12.033 4	582.265	490.615	1 072.880
2	5.471 7	3.241 3	7.552 9	579.486	488.118	1 067.60
$\mu_1=0.1$	3.991 7	4.834 8	8.698 9	593.584	469.682	1 063.27
3	3.609 8	5.504 5	8.823 9	591.575	469.000	1 060.58
$\mu_1=0.9$	3.502 9	5.974 0	9.155 3	590.899	468.123	1 059.02
4	5.693 7	3.328 8	7.235 0	577.776	486.106	1 063.88

注:方案4中区域1、区域2、总区域的总经济成本分别为578.265、485.616、1 063.88千元

到了进一步减小。从区域经济成本因素亦可看出,非合作博弈模式虽然增大了区域负荷方差,但总区域经济成本却得到了降低,即负荷曲线更加跟随峰谷电价的引导,因此仍然具备一定的现实意义。

综上所述,在实际工程中应用时,需综合考虑区域自身及总体需求,协调单个区域与总体的矛盾,同时注意到不同区域的特点与差异,合适地选取优化目标,才能最大程度地发挥联合削峰填谷的效益。

5 结语

针对当前阶段电池储能安全性不足、占地规模较大等不容忽视的配置局限性、相变储能系统参与电网辅助服务可行性研究欠缺等问题,本文提出了一种基于聚合相变储能系统共享的区域联合削峰填谷策略。理论分析及仿真结果表明:

1)通过构建相变储能单元聚合机制及模型,在实现室内温度控制的同时,挖掘其灵活可调能力,保证分布式相变储能单元具备参与电网辅助服务的工程可行性;

2)通过引入“共享储能”概念,提出区域内聚合相变储能系统的共享模式与控制策略,所提方案能够有效降低区域负荷曲线方差,提升区域经济效益;

3)在仅依靠区域内共享相变储能策略仍无法改善电网指标的情况下,提出非合作博弈、合作博弈模式下区域间联合削峰填谷策略,进一步提升削峰填谷效果。实际应用中可依据区域自身及总体区域需求,合理选取区域合作模式及优化目标。

本文所形成的研究成果将对未来分布式相变储能系统大规模利用提供重要技术支撑,促进新一代电网辅助服务技术的快速进步。需要指出的是,实际用户热力需求可能会有所不同,而本文对聚合相变储能单元内的个体差异性并未考虑,同时电网对于负荷削峰填谷的奖励机制并不完善,本文采用峰谷平电价计算经济成本的方式并不能凸显削峰填谷策略优势,仍存在一定的完善空间。如何通过有效的政策引导驱使负荷侧参与削峰填谷等各项

电网辅助服务,相关工作正在开展中。

参考文献:

- [1] 卢操,管霖,陈恒安,等.考虑储能调度的可再生能源独立微电网电源规划[J].电测与仪表,2021,58(4):84-91.
LU Cao, GUAN Lin, CHEN Heng'an, et al. Generation planning for renewable energy isolated micro-grid considering energy storage dispatching[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(4): 78-83.
- [2] 杨江涛,刘佳,孙春顺,等.计及分布式电源的配电网储能配置研究[J].电力科学与技术学报,2018,33(1):108-114.
YANG Jiangtao, LIU Jia, SUN Chunshun, et al. Research on energy storage configuration of distribution network considering distributed power supply[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(1): 108-114.
- [3] 鲍冠南,陆超,袁志昌,等.基于动态规划的电池储能系统削峰填谷实时优化[J].电力系统自动化,2012,36(12):11-16.
BAO Guannan, LU Chao, YUAN Zhichang, et al. Load shift real-time optimization strategy of battery energy storage system based on dynamic programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(12): 11-16.
- [4] 陈满,陆志刚,刘怡,等.电池储能系统恒功率削峰填谷优化策略研究[J].电网技术,2012,36(9):232-237.
CHEN Man, LU Zhigang, LIU Yi, et al. Research on optimal peak load shifting strategy of battery energy storage system operated in constant power mode[J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 232-237.
- [5] 胡泉,徐国栋,尚策,等.工业园区参与调峰的电池储能需求响应联合规划[J].电力系统自动化,2019,43(15):116-123.
HU Xiao, XU Guodong, SHANG Ce, et al. Joint planning of battery energy storage and demand response for industrial park participating in peak shaving[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 116-123.
- [6] 金强,杨卫红,王涛,等.考虑混合储能调频需求的独立微电网投资优化[J].电力科学与技术学报,2021,36(1):52-62.
JIN Qiang, YANG Weihong, WANG Tao, et al. Research on investment optimization of standalone microgrid considering frequency modulation with hybrid energy stor-

- age[J].Journal of Electric Power Science and Technology,2021,36(1):52-62.
- [7] 王静,刘文霞,李守强,等.计及机组降损收益的电源侧电池储能调频/调峰经济效益评价方法[J].电网技术,2020,44(11):4236-4245.
WANG Jing,LIU Wenxia,LI Shouqiang,et al.A method to evaluate economic benefits of power side battery energy storage frequency/peak regulation considering the benefits of reducing thermal power unit losses [J].Power System Technology,2020,44(11):4236-4245
- [8] 程瑜,黄森,刘瑞丰.面向配电网设备利用率提升的分布式储能优化配置[J].智慧电力,2021,49(8):8-14.
CHENG Yu,HUANG Sen,LIU Ruifeng.Optimal configuration of distributed energy storage for improving equipment utilization in distribution network[J].Smart Power,2021,49(8):8-14.
- [9] 魏繁荣,林湘宁,陈乐,等.基于建筑相变材料储能的微网综合能源消纳系统[J].中国电机工程学报,2018,38(3):792-804.
WEI Fanrong,LIN Xiangning,CHEN Le,et al.Microgrid comprehensive energy consumption system based on phase change building materials[J].Proceedings of the CSEE,2018,38(3):792-804.
- [10] 张东,周剑敏,吴科如.相变储能复合材料及其电力调峰功能分析[J].华东电力,2003(9):27-30.
ZHANG Dong,ZHOU Jianmin,WU Keru.Study of phase-changing energy-storage composite material and its power peak regulation function[J].East China electric Power,2003(9):27-30.
- [11] 张志顺,吴语欣.基于太阳能结合相变储能技术在建筑围护结构节能改造中的实践运用[J].建筑技术,2015,46(S1):156-158.
ZHANG Zhishun,WU Yuxin.Practical application of solar energy combined with phase change material energy storage technology in energy-saving renovation of building envelopes[J].Architecture Technology,2015,46(S1):156-158.
- [12] 刘净净,蒋绿林,傅杰,等.基于直膨式太阳能热泵的相变储能地板联合供暖系统[J].工业安全与环保,2019,45(2):93-97.
LIU Jingjing,JIANG Lulin,FU Jie,et al.The phase change energy storage floor joint heating system based on direct-expansion solar heat pump[J].Industrial Safety and Environmental Protection,2019,45(2):93-97.
- [13] 李咸善,陈奥博,程杉,等.基于生态博弈的含云储能微电网多智能体协调优化调度[J].中国电力,2021,54(7):166-177.
LI Xianshan,CHEN Aobo,CHENG Shan,et al.Multi-agent coordination and optimal dispatch of microgrid with CES based on ecological game[J].Electric Power,2021,54(7):166-177.
- [14] 陈璟,杨洪明,邓友均.考虑不间断电源储能的数据中心电—冷联供系统优化运行[J].电力科学与技术学报,2019,34(3):129-135.
CHEN Jing,YANG Hongming,DENG Youjun.Optimal operation of combined cooling and power system in green data center considering UPS [J].Journal of Electric Power Science and Technology,2019,34(3):129-135.
- [15] 崔艳琦.相变材料热性能及其在室内被动式储能系统的简易计算[J].储能科学与技术,2017,6(2):302-306.
CUI Yanqi.Thermal properties of phase change materials (PCM) and their concise calculations for passive storage applications in buildings[J].Energy Storage Science and Technology,2017,6(2):302-306.
- [16] ZIMA-BOCKARJOVA M S A,PETRICHENKO L,PETRICHENKO R.Charging and discharging scheduling for electrical vehicles using a shapley-value approach[J].Energies,2020,13(5):1160.
- [17] PEREZ-CASTRILLO D,WETTSTEIN D.Bidding for the Surplus:A Non-cooperative approach to the shapley value[J].Journal of Economic Theory,2001,100(2):274-94.
- [18] 孟巍,郭腾炫,刘映娟,等.基于粒子群算法的多电源配电网储能功率配置方法[J].电网与清洁能源,2021,37(11):109-114.
MENG Wei,GUO Tengxuan,LIU Yijuan,et al.An energy storage configuration method for multi-power distribution network based on particle swarm algorithm [J].Power System and Clean Energy,2021,37(11):109-114.