DOI: 10. 3969/j. issn. 2097-0706. 2023. 06. 003

考虑供需不确定性的区域综合能源系统时间 解耦分层能量管理

Time-decoupling hierarchical energy management of integrated energy systems considering supply and demand uncertainty

案真兰¹,沈建忠²,张春雁¹,江晶晶²,陈祺²,陈婧² DOU Zhenlan¹,SHEN Jianzhong²,ZHANG Chunyan¹, JIANG Jingjing²,CHEN Qi²,CHEN Jing²

(1.国网上海综合能源服务有限公司,上海 200023; 2.国网上海市电力公司市北供电公司,上海 200040) (1.State Grid Shanghai Integrated Energy Services Corporation Limited, Shanghai 200023, China; 2.Shibei Power Supply Company of State Grid Shanghai Municipal Electric Power Corporation Limited, Shanghai 200040, China)

摘 要:进行以电为核心的区域综合能源系统运行优化研究,有利于提高能源利用率及系统运行的经济性、可靠 性。针对区域综合能源系统中可再生能源出力与负荷需求的不确定性,提出基于能量枢纽的时间解耦分层能量管 理策略。基于可再生能源和负荷预测的日前静态优化,实现了多种能源形式的协调利用。在基于反馈校正的日内 滚动优化中引入储能一致性系数,使储能的日内滚动优化功率尽可能遵循日前静态优化结果,提高储能长时间尺 度参与系统功率平衡的能力,降低系统供需不确定性的影响,系统抗干扰性增强;同时,根据功率预测误差按储能 容量均衡分配备用功率,以提高惯性时间常数较小的电力电子化系统的安全稳定性。算例仿真证明了上述优化模 型和策略的有效性。

关键词:区域综合能源系统;可再生能源;能量枢纽;储能;供需不确定性;滚动优化;能量管理

中图分类号:TK 01⁺9 文献标志码:A 文章编号:2097-0706(2023)06-0017-08

Abstract: Studying the operation optimization of regional integrated energy systems with electricity as their cores is conducive to improving their energy utilization efficiency, economy and reliability. To address the uncertainty of renewable energy outputs and load demands in the systems, a time-decoupling hierarchical energy management strategy based on energy hubs is proposed. The day-ahead static optimization based on the prediction on renewable energy outputs and load demands achieves the coordinated utilization of multiple energy. Then, the energy storage consistency weight coefficient is introduced into the intraday rolling optimization based on feedback correction, so that the intraday rolling optimised power of the energy storage system can comply with the day-ahead static optimization results. The strategy can improve the participation of energy storage systems into system power balance over a long-time scale, reduce the impact of the supply and demand uncertainty on the system, and enhance the anti-interference of the system. At the same time, reserve powers are distributed evenly according to the energy storage capacity and power prediction error, to improve the security and stability of the electrical power systems with small inertia time constant. Finally, the effectiveness of the optimization strategy and model is verified by simulation examples.

Keywords: regional integrated energy system; renewable energy; energy hub; energy storage; supply and demand uncertainty; rolling optimization; energy management

0 引言

随着光伏、风电等分布式能源的大规模接入, 通过集中发电及远距离输电的传统电力系统运行

基金项目:国网上海市电力公司科技项目(B30914200000) Science and Technology Project of State Grid Shanghai Electric Power Company(B30914200000) 管理模式已难以满足系统越来越高的稳定性要求 和负荷需求的多样化^[14]。为解决上述问题,实现可 再生能源的灵活高效利用,微电网作为一种合理的 解决方式被提出^[5-7]。将电作为核心能源形式,引入 电热、电冷转换存储装置,促进可再生能源的就地 消纳,从而减少光弃风弃光现象^[8-10]。集电热冷多 种能源生产、转换和存储于一体的微网,可以实现 多能互补、能源高效利用,而基于能量枢纽(Energy Hub, EH)的区域综合能源系统(Regional Integrated Energy System, RIES)是微网的一种特有形式^[11-13]。

针对RIES的设备建模以及能量管理,国内外均 有一定研究。文献[14]通过引入电转气设备构建 了多源储能型微网系统,以系统运行成本最低为目 标建立日前优化模型,提高可再生能源利用率。文 献[15]提出了一种回收利用数据中心运行余热的 综合能量管理方案,考虑可再生能源发电、电/热需 求不确定性,以数据中心微网系统运行成本最小化 为目标,建立两阶段随机规划模型。文献[16]以降 低运行成本、减少污染物排放、提高供能稳定性为 目标,建立含电/热/冷的综合能源系统优化模型,实 现系统经济高效运行。文献[17]提出了计及用户 行为的RIES两阶段优化模型,探究了电转气(Power to Gas, P2G)和储能设备对风电消纳及系统经济性 的影响。文献[18]考虑了用户侧柔性负荷可平移、 可转移、可削减的特性,以总运行成本最小为目标 建立RIES供需联合日前优化调度模型。

上述日前优化是一种受可再生能源出力和负 荷预测影响的长时间尺度开环控制。在实际系统 中,可再生能源出力的间歇性和负荷需求的不确定 性会导致其预测存在误差,基于开环方式的优化调 度已经不再适用。因此,基于模型预测的较短时间 尺度闭环优化控制系统被提出,以修正预测误差和 优化调度偏差^[19-20]。文献[21]考虑需求侧热特性, 提出了一种基于模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)的热/电联合系统优化调度模型,以实 现系统总发电成本最小。文献[22-23]根据可再生 能源和电力负荷的超短期预测信息,建立基于 MPC 的冷/热/电联供微网滚动优化模型。文献[24]在时 间尺度上进行了进一步扩展,构建了日前、日内滚 动和实时反馈3个时间尺度的优化调度模型。但 是,上述调度未考虑功率分配的可变调度因子的应 用以及储能长时间参与分配系统功率平衡的能力。

基于上述分析,本文借鉴微电网的多时间尺度 分层控制,提出一种基于EH的区域综合能源系统 时间解耦分层能量管理策略。基于预测数据的日 前静态优化,通过引入可变调度因子,有效发挥区 域综合能源系统多能互补、多能协调的作用。以日 前优化结果为参考,在进行基于反馈校正的日内滚 动优化时,引入储能日前/日内一致性系数,提高储 能长时间平衡系统功率的能力;同时,根据功率预 测误差按储能容量均衡分配备用功率,以提高系统 的抗干扰性。

1 基于EH的RIES

EH 能量枢纽是多种能源生产、转换和存储一体化的输入输出双端口网络。EH 可以清楚地描述 RIES 的多种能源耦合关系,是系统规划研究与运行 优化的重要模型。

1.1 基于EH的RIES参数

基于 EH 的 RIES 结构如图 1 所示,图 1 中与 RIES 优化调度相关的参数定义和描述见表 1(表中: CHP 为热电联产)。为便于分析计算,电/热/冷/气等 多能量形式的热值单位均转换为kW·h。



图 1 基于 EH 的 RIES 结构示意 Fig. 1 Structure of the RIES based on the EH

表1 基于EH的RIES优化变量描述

Table 1 Optimization	variables o	of the RIES	based on the EH	
----------------------	-------------	-------------	-----------------	--

变	垦	描述说明		
	$P_{\mathrm{PV},\iota}$	t 时刻 PV 输出功率,kW		
输入层	$P_{_{\mathrm{WT},t}}$	t时刻WT输出功率,kW		
	$P_{\mathrm{EX},t}$	t 时刻与电网交易功率,kW		
	$P_{\mathrm{G},\iota}$	t 时刻购买天然气功率,kW		
	$p_{\mathrm{EX},t}$	t时刻与电网交易电价,元/(kW·h)		
	$p_{\mathrm{G},t}$	t时刻购买天然气价格,元/(kW·h)		
存储层	$P_{\mathrm{ES},t}$	t 时刻电储能输出功率,kW		
	$P_{\mathrm{HS},t}$	t 时刻热储能输出功率,kW		
	$P_{\mathrm{CS},\iota}$	t 时刻冷储能输出功率,kW		
	${m \eta}_{ m CHPE}$	CHP机组产电效率		
	${m \eta}_{ m CHPH}$	CHP机组产热效率		
	$\eta_{\scriptscriptstyle m B}$	燃气锅炉天然气转化为热的效率		
转换层	$C_{\rm OP,CC}$	压缩式制冷机制冷性能系数, 3.0		
	$C_{\rm OP,AC}$	吸收式制冷机制冷性能系数, 0.9		
	$lpha_{\mathrm{E},t}$	t 时刻电母线能量调度因子		
	$lpha_{\mathrm{H},t}$	t 时刻热母线能量调度因子		
	$\alpha_{\mathrm{G},t}$	t 时刻天然气母线能量调度因子		
	$P_{\mathrm{EL},t}$	t 时刻电负荷,kW		
输出层	$P_{_{\mathrm{HL},t}}$	t时刻热负荷,kW		
	$P_{\mathrm{CL},t}$	t 时刻冷负荷,kW		

1.2 基于EH的RIES结构

EH的输入含风机(Wind Turbine, WT)、光伏 (Photovoltaic, PV)、天然气和电网等多种能源,其

中,WT和PV均采用最大输出功率跟踪的控制模式,以提高可再生能源的利用率。EH的输出端负荷包括电负荷、冷负荷和热负荷,其中,电负荷的变化较大,需要在实时运行中预留一定备用容量以实现电压、频率偏差调节。

2 基于预测数据的日前静态优化

2.1 系统优化目标

以EH日运行成本最小作为RIES日前静态优化的目标。EH日运行成本包括EH内CHP机组、燃气锅炉(Gas Boiler, GB)运维成本和启/停成本,储能运维成本,系统购气成本以及与公共电网的净购电成本。需要说明的是,为防止设备启/停次数过多造成损耗,考虑EH内CHP设备和GB设备的启动、停机成本。

$$\min f_{1} = \sum_{t=1}^{T} \left(\sum_{m=1}^{\infty} \left(C_{m,t}^{\text{om}} + C_{m,t}^{\text{su}} + C_{m,t}^{\text{sd}} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} C_{\text{S}n,t}^{\text{om}} + p_{\text{G},t} P_{\text{G},t} + p_{\text{EX},t} P_{\text{EX},t} \right), \quad (1)$$

式中:T为调度周期,24 h;t为单位调度时间,1 h; $C_{m,t}^{om}$ 为t时刻 CHP 设备和 GB 设备m的运维成本; $C_{m,t}^{su}$, $C_{m,t}^{sd}$ 分别为t时刻 CHP 设备和 GB 设备m的启 动、停机成本; $C_{sn,t}^{om}$ 为t时刻储能单元n的运维成本。

2.2 系统约束条件

系统约束为运行过程中的多能供需平衡;同时,通过引入可变能量调度因子α_{G,t},α_{E,t},α_{H,t},提高 EH的调节自由度,实现多种能源形式的协调优化。

电平衡约束为

$$(P_{\text{WT},t} + P_{\text{PV},t} + P_{\text{EX},t} + P_{\text{G},t}\alpha_{\text{G},t}\eta_{\text{CHPE}}) \times (1 - \alpha_{\text{E},t}) = P_{\text{EL},t} + P_{\text{ES},t\circ}$$
(2)

热平衡约束为

$$[P_{G,t}(1 - \alpha_{G,t})\eta_{CHPH} + P_{G,t}\alpha_{G,t}\eta_{B}] \times (1 - \alpha_{H,t}) = P_{HL,t} + P_{HS,to}$$
(3)

冷平衡约束为

$$[P_{\text{WT},t} + P_{\text{PV},t} + P_{\text{EX},t} + P_{\text{G},t}(1 - \alpha_{\text{G},t})\eta_{\text{CHPE}}] \times \alpha_{\text{E},t}C_{\text{OP},\text{CC}} + [P_{\text{G},t}(1 - \alpha_{\text{G},t})\eta_{\text{CHPH}} + B_{\text{C},t}C_{\text{C},t}] + B_{\text{C},t}C_{\text{C},t} + B_{\text{C},t}C_{\text{C},t} + B_{\text{C},t}C_{\text{C},t}C_{\text{C},t} + B_{\text{C},t}C_{\text{C},$$

 $P_{\mathrm{G},t}\alpha_{\mathrm{G},t}\eta_{\mathrm{B}}]\alpha_{\mathrm{H},t}C_{\mathrm{OP,AC}} = P_{\mathrm{CL},t} + P_{\mathrm{CS},t\circ} \qquad (4)$

在满足EH运行约束的基础上,设备的运行约 束也需要考虑。从系统低碳性、经济性和合理性等 方面出发,本文主要采用CHP设备和GB设备作为 EH内的可控供能设备。

2.3 EH内CHP设备和GB设备模型

运维成本为

$$C_{m,t}^{\rm om} = c_m^{\rm om} P_{m,t}, \qquad (5)$$

启/停成本为

$$\begin{cases} C_{m,t}^{su} = \max\left\{0, U_{m,t} - U_{m,t-1}\right\}c_{m}^{su} \\ C_{m,t}^{sd} = \max\left\{0, U_{m,t} - U_{m,t-1}\right\}c_{m}^{sd}, \end{cases}$$
(6)

输出功率约束为

$$P_{Bm}^{\min} \leq P_{Bm,t} \leq P_{Bm}^{\max}, \qquad (7)$$

$$P_{\text{CHPE}m}^{\min} \leq P_{\text{CHPE}m,t} \leq P_{\text{CHPE}m}^{\max}, \qquad (8)$$

$$P_{\text{CHPH}m}^{\min} \leq P_{\text{CHPH}m,t} \leq P_{\text{CHPH}m}^{\max}, \tag{9}$$

爬坡速率约束为

 $-R_{CHPm}^{down} \leq P_{CHPm,t} - P_{CHPm,t-1} \leq R_{CHPm}^{up}$, (10) 式中: c_m^{om} 为 CHP 设备及 GB 设备 m 的单位运维成本; $P_{m,t}$ 为 t 时刻 CHP 设备和 GB 设备 m 的输出功率; $U_{m,t}$ 为 CHP 设备和 GB 设备 m 的启动/停机状态; c_m^{su} , c_m^{sd} 分 别为 CHP 设备及 GB 设备 m 的启、停成本; $P_{Bm,t}$ 为 t 时刻 GB 设备 m 的功率输出; P_{Bm}^{max} , P_{Bm}^{min} 分别为 GB 设 备 m 的最大、最小输出功率; $P_{CHPEm,t}$, $P_{CHPHm,t}$ 分别为 t 时刻 CHP 设备 m 输出电功率; $P_{CHPEm,t}$, P_{CHPEm} , P_{CHPEm}^{om} 分 别 为 CHP 设备 m 输出电功率的最大、最小值; P_{CHPIm}^{max} , P_{CHPIm}^{min} 分别为 CHP 设备 m 输出电功率的最大、最小值; r_{CHPIm}^{max} , R_{CHPm}^{min} 分别为 CHP 设备 m 输出达功率的最 大、最小值; R_{CHPm}^{up} , R_{CHPm}^{chom} 分别为 CHP 设备 m 的上、下 爬坡速率。需要说明的是, CHP 设备的上、下爬坡 速率约束同样适用于其产电和产热的功率输出。

2.4 EH内储能设备模型

运维成本为

$$C_{\text{S}n,t}^{\text{om}} = c_{\text{S}n}^{\text{om}} | P_{\text{S}n,t} |,$$
 (11)

输出功率、输出能量约束为

$$\begin{cases} U_{chn,t} \gamma_{chn}^{min} C_{Sn} \leq P_{chn,t} \leq U_{chn,t} \gamma_{chn}^{max} C_{Sn} \\ U_{disn,t} \gamma_{disn}^{min} C_{Sn} \leq P_{disn,t} \leq U_{disn,t} \gamma_{disn}^{max} C_{Sn}, \quad (12) \\ U_{chn,t} + U_{disn,t} \leq 1 \end{cases}$$

$$E_{Sn,t} = E_{Sn,t-1} (1 - \delta_n) + \Delta t (P_{chn,t} \eta_{chn} - P_{disn,t} / \eta_{disn}) \mu_{Sn}^{min} C_{Sn} \leq E_{Sn,t} \leq \mu_{Sn}^{max} C_{Sn}, \quad (13)$$

$$E_{\text{Sn, }T} = E_{\text{Sn, }1},$$
 (14)

式中: c_{sn}^{em} 为储能n的单位运维成本; $P_{sn,t}$ 为t时刻储 能n的运行功率($P_{sn,t} > 0$ 表示存储功率 $P_{chn,t}$, $P_{sn,t} < 0$ 表示释放功率- $P_{disn,t}$); $U_{chn,t}$, $U_{disn,t}$ 分别为存储、释 放功率标志位(为0~1的变量,1表示存储,0表示释 放,满足互斥条件); C_{sn} 为储能n的总容量; $E_{sn,t}$ 为t时刻储能n的容量; γ_{chn}^{em} , γ_{disn}^{dem} 分别为储能n的最大 充、放电系数; γ_{chn}^{em} , γ_{disn}^{dem} 分别为储能n的最大 充、放电系数; γ_{chn}^{em} , γ_{disn}^{dem} 分别为储能n的最大 充、放电系数; γ_{chn}^{em} , γ_{disn}^{em} 分别为储能n的最大 定、放电系数; γ_{chn}^{em} , γ_{disn}^{em} 分别为储能n的最大。 形

上述日前静态优化是一种受可再生能源出力 和负荷预测影响的长时间尺度开环控制方式,可再 生能源出力的间歇性和负荷侧的不确定性会导致 其预测时存在一定误差。因此,本文提出一种基于 较小时间尺度、优化过程为闭环的预测方法。

3 基于反馈校正的日内滚动优化

如图2所示,在日内单位调度时间内,选择实际 值为初始状态、日前计划值为相邻连续参考值,添 加储能日前/日内出力偏差惩罚成本,通过反馈校正 环节使日内设备出力有效跟踪日前出力。



基于 MPC 反馈校正的日内滚动优化可减少可 再生能源间歇性和负荷不确定性及其预测误差对 能量管理的影响,从而提高系统优化策略的合理性 和准确性。

由于 RIES 中冷/热/气能源惯性造成的迟滞性, 文中的日内滚动优化时域 N_r=4 h,优化控制时域 k= 1 h。

3.1 系统优化目标

带反馈校正环节的日内滚动优化应参考日前 静态优化下 CHP 设备、GB 设备启/停状态 $U_{m,t}$,储能 单元充放电功率 $P_{sn,t}$ 和能量调度因子 $\alpha_{G,t}, \alpha_{E,t}, \alpha_{H,t}$ 的优化结果并作为已知参考量。如式(15)所示,日 内滚动优化在当前时刻k的目标函数是降低滚动时 域 $[k, k + N_r - 1]$ 的系统运行成本,同时优化储能长 时间平衡系统功率的能力,不再包含 CHP 设备 GB 设备的启动/停机成本 $C_{m,t}^{su}, C_{m,t}^{sd}$ 。

$$\min f_{2} = \sum_{t=k}^{k+N_{t}-1} \left(\sum_{m=1}^{\infty} C_{m,t}^{\text{om}} + \sum_{n=1}^{\infty} C_{\text{S}n,t}^{\text{om}} + p_{\text{G},t} P_{\text{G},t} + p_{\text{EX},t} P_{\text{EX},t} + \sigma \left| P_{\text{S}n,t}' - P_{\text{S}n,t} \right| \right), \quad (15)$$

式中:P'sn.t为优化功率。

储能在 $N_r = 4$ h的日内滚动优化可以作为滚动 优化时域4h内不越限的约束,但此时储能在日内 滚动优化时域内的运行不是最优的,因此,式(15) 增加最后一项 $\sigma | P'_{sn,t} - P_{sn,t} |$,对储能引入日前/日内 优化的一致性系数 σ ,使储能的日内滚动优化功率 $P'_{sn,t}$ 尽可能遵循日前静态优化结果,提高储能设备 长时间参与系统功率平衡的能力。

3.2 系统约束条件

日内滚动优化的电/热/冷功率平衡约束见式 (2)--(4)。其中,燃气、电制冷和热制冷的能量调 度因子 $\alpha_{G,\iota}, \alpha_{E,\iota}, \alpha_{H,\iota}$ 遵循日前静态优化结果,为已知参数。

3.3 系统内CHP设备和GB设备模型

CHP设备和GB设备的运维成本见式(5),输出 功率及爬坡速率约束见式(7)—(10)。其中,CHP 设备和GB设备的启动/停机状态U_{m,t}通过日前静态 优化给定。

3.4 系统内储能设备模型

系统内电/热/冷储能单元的运维成本见式 (11),热/冷储能单元的输出功率及输出容量约束见 式(12)—(13)。

一般来说,通过惯性时间常数较小的电力电子 变换器接入 PV, WT等可再生能源,与变化缓慢的 冷/热/气能源形式相比,具有波动性更大和变化更 剧烈的特点。设可再生能源(PV和WT)功率最大预 测误差为α_{RE},电负荷最大预测误差为α_{EL},则系统在 *t*时刻的电母线总波动为

$$P_{\text{tot},t}^{\text{er}} = \left| \alpha_{\text{RE}} (P_{\text{WT},t} + P_{\text{PV},t}) - \alpha_{\text{EL}} P_{\text{EL},t} \right|_{\circ} \quad (16)$$

为实现系统内实时电能量的平衡,储能应预留 一定的备用功率并按储能容量进行分配。电储能 n 应预留的充、放电备用功率 P^{er}_{chn,t}和 P^{er}_{disn,t}(充、放备用 功率相等时统一表示为 P^{er}_{sn,t})为

$$\begin{cases} P_{\text{chn},t}^{\text{er}} = \frac{\gamma_{\text{chn}}^{\text{max}} C_{\text{Sn}}}{\sum_{n=1}^{n} \gamma_{\text{chn}}^{\text{max}} C_{\text{Sn}}} P_{\text{tot},t}^{\text{er}} \\ P_{\text{disn},t}^{\text{er}} = \frac{\gamma_{\text{disn}}^{\text{max}} C_{\text{Sn}}}{\sum_{n=1}^{n} \gamma_{\text{disn}}^{\text{max}} C_{\text{Sn}}} P_{\text{tot},t}^{\text{er}} \end{cases}$$

$$(17)$$

同时,为满足系统日内滚动优化的能量平衡, 电储能n的输出功率及输出能量约束为

$$\begin{cases} U_{chn,t}(\gamma_{chn}^{\min}C_{Sn} - P_{chn,t}^{er}) \leq P_{chn,t} \leq \\ U_{chn,t} \times (\gamma_{chn}^{\max}C_{Sn} - P_{chn,t}^{er}) \\ U_{disn,t}(\gamma_{disn}^{\min}C_{Sn} - P_{disn,t}^{er}) \leq P_{disn,t} \leq , \end{cases}$$
(18)
$$U_{disn,t} \times (\gamma_{disn}^{\max}C_{Sn} - P_{disn,t}^{er}) \\ U_{chn,t} + U_{disn,t} \leq 1 \\ E_{Sn,t} = E_{Sn,t-1}(1 - \delta_n) + \Delta t \times \\ (P_{chn,t}\eta_{chn} - P_{disn,t}/\eta_{disn}),$$
(19)
$$(1 + \frac{U_{disn,t}P_{disn,t}}{\gamma_{max}^{max}C}) \mu_{Sn}^{min}C_{Sn} \leq E_{Sn,t} \leq \end{cases}$$

$$(1 - \frac{U_{\text{chn},l}P_{\text{chn},l}^{\text{er}}}{\gamma_{\text{chn}}^{\text{max}}C_{\text{S}n}})\mu_{\text{S}n}^{\text{max}}C_{\text{S}n\circ}$$
(20)

4 算例仿真及分析

将图1所示基于EH的RIES作为仿真案例,对 日前静态优化和日内滚动优化进行分析。

4.1 日前静态优化

4.1.1 基本数据

购气价格和分时购/售电价格如图 3 所示,某WT,PV 发电和负荷需求的典型日日前预测值如图 4 所示。CHP,GB 设备基本参数见表 2,储能设备基本参数见表 3。



图4 WT, PV发电和负荷需求日前预测



表2 CHP,GB设备基本参数

 Table 2
 Main parameters of the CHP and GB

设备	运维成本/ [元・(kW・h) ⁻¹]	启停机 成本/元	效率/%	上坡/下坡 功率/kW	功率上/ 下限/kW
CHPE	0.026	2.72	0.41	50/25	300/50
CHPH	0.026	2.72	0.45	50/25	460/80
GB	0.025	1.94	0.85		375/60

注:CHPE表示CHP产电,CHPH表示CHP产热。

```
表3 储能单元基本参数
```

```
        Table 3
        Main parameters of energy storage system
```

储能 单元	运维成本/ [元・(kW・h) ⁻¹]	充/放 电效 率/%	充放百 分比上 限/%	容量百 分比上/ 下限/%	初始容 量/kW	额定容 量/kW
电1	0.001 8	90	30	90/10	30	300
电2	0.001 8	90	30	90/10	20	200
热	0.001 6	90	25	85/10	30	300
冷	0.001 6	90	25	85/10	15	150

4.1.2 优化结果

通过求解该日前静态优化模型,得到各关键设备出力计划、系统购气量与总购/售电量,如图5所

示。整个系统的冷/热/电等多种能源均实现了能量 平衡。

图 6 为 CHP 设备和 GB 设备的启/停状态以及燃 气量、电制冷和热制冷的能量调度因子优化值。







energy dispatch factors

由图4—6可知:燃气锅炉产热量 $P_{\rm B}$ 及用于锅 炉产热的燃气调度因子 $\alpha_{\rm c}$ 在热负荷 $P_{\rm HL}$ 需求较高时 取值较大,电制冷和热制冷能量调度因子之和($\alpha_{\rm E}$ + $\alpha_{\rm H}$)在冷负荷 $P_{\rm CL}$ 需求较高时取值较大,反之亦然。 因此,能量调度因子的引入和优化有利于各时段不 同能源的协调利用。

4.2 日前滚动优化

在基于反馈校正的日内滚动优化中,日前静态 优化下CHP设备、GB设备的启/停状态,储能单元的 充放电状态以及相关能量调度因子被作为已知量 进行参考。

4.2.1 基本数据

与日前静态优化中某典型日WT/PV发电功率 及冷/热/电负荷需求功率的预测值对应,用于日内 滚动优化的日内预测值及实际值如图7-8所示。

4.2.2 优化结果

WT/PV发电功率和电/热/冷负荷需求的日前预测精度比日内预测精度低。基于日内预测数据和





实际测量数据求解日内滚动优化模型,得到可控设备的日内滚动优化调度指令,如图9所示。实际上,日内滚动优化能够修正日前静态优化的偏差,从而提高系统的稳定性及可靠性。

(1)一致性系数影响。图 9a 为储能设备长时间 不作为平衡系统功率设备的日内滚动优化结果(储 能设备的一致性系数 $\sigma = 0$)。由储能设备的容量 变化可知:电储能经4h深度放电,在t=10h以后的 时段已不具备放电能力;热储能持续释放能量5h 以后,在剩余时段实际已没有释放热量的能力。

一致性系数 σ = 2时的日内滚动优化结果如图 9b所示。随着 σ 值的增大,储能单元的日内滚动优 化结果逐渐接近日前静态优化结果,增加了储能单 元长时间平衡系统功率的能力。因此,综合考虑系 统运行的可靠性和经济性,在进行日内滚动优化和 日前静态优化时,应合理选择储能设备的一致性 系数 σ 。

(2)储能功率均衡分配。 $\sigma=2$ 时的电储能备用





功率日内滚动优化结果如图10所示(图中:Pes为预 留备用功率)。由图10可见,在经济成本相同的情 况下,容量较大的电储能1在多数时段的优化调度 值大于容量较小的电储能2,并且电储能1和2的备 用功率分配比例约等于容量比3:2。为提高系统的 抗干扰性,在经济成本相同的情况下,根据储能容 量实现了优化功率的均衡分配。



Fig. 10 Reserve powers of the energy storage system after daily rolling optimization at $\sigma=2$

5 结束语

针对可再生能源和负荷需求的随机不确定性, 为提高能源利用率并增强系统运行的可靠性和经 济性,本文提出了一种基于能量枢纽的区域综合能 源系统时间解耦分层能量管理策略。

(1)基于可再生能源和负荷功率预测的日前静态优化,引入可变调度因子实现多种能源形式的高效转变及协调利用。参考日前优化结果,基于反馈校正的日内滚动优化减少了可再生能源和负荷随机不确定性引起的调度偏差。

(2)引入日前/日内优化的储能一致性系数,提 高储能长时间平衡系统功率的能力;同时,根据功 率预测误差按储能容量均衡分配备用功率,提高了 惯性时间常数较小的电力电子化系统的安全稳 定性。

参考文献:

- [1]YAZDANIAN M, MEHRIZI-SANIA. Distributed control techniques in microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(6): 2901-2909.
- [2]WANG Z, CHEN B, WANG J, et al. Decentralized energy management system for networked microgrids in gridconnected and islanded modes [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2):1097-1105.
- [3]翁志鹏,周京华,李津,等.含风光接入的微电网可靠性影响分析[J].综合智慧能源,2023,45(1):67-74.
 WENG Zhipeng, ZHOU Jinghua, LI Jin, et al. Impact of wind and solar power grid connection on microgrid reliability
 [J]. Integrated Intelligent Energy, 2023, 45(1):67-74.
- [4]GAO H, LIU J, WANG L, et al. Decentralized energy management for networked microgrids in future distribution systems [J].IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33 (4):3599-3610.
- [5]OUAMMI A, DAGDOUGUI H, SACILE R. Optimal control of power flows and energy local storages in a network of microgrids modeled as a system of systems [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, 23(1): 128-138.
- [6]HARMON E, OZGUR U, CINTUGLU M H, et al. The internet of microgrids: A cloud based framework for widearea networked microgrids [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(3): 1262-1274.
- [7]AREFIFAR S A, MOHAMED A R I, El-FOULY T. Optimized multiple microgrid-based clustering of active distribution systems considering communication and control requirements [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(2):711-723.
- [8]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(2): 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(2):792-804.

[9]刘继春,周春燕,高红均,等.考虑氢能-天然气混合储能的电-气综合能源微网日前经济调度优化[J].电网技术,2018,42(1):170-178.

LIU Jichun, ZHOU Chunyan, GAO Hongjun, et al. A dayahead economic dispatch optimization model of integrated electricity-natural gas system considering hydrogen-gas energy storage system in microgrid [J]. Power System Technology, 2018, 42(1):170-178.

[10]王鑫,陈祖翠,卞在平,等.基于粒子群优化算法的智慧微电网风光储容量优化配置[J].综合智慧能源, 2022,44(6):52-58.
WANG Xin, CHEN Zucui, BIAN Zaiping, et al. Optimal allocations of a scient DV between babried sectors in second to be a scient and the scient second to be a scient and the scient second to be a scient and the scient second to be a scient se

allocation of a wind-PV-battery hybrid system in smart microgrid based on particle swarm optimization algorithm [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(6): 52-58.

- [11]GEIDL M, KOEPPEL G, FAVREPERROD P, et al. Energy hubs for the future [J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2007,5(1):24-30.
- [12]黄武靖,张宁,董瑞彪,等.多能源网络与能量枢纽联合规划方法[J].中国电机工程学报,2018,38(18):5425-5437.

HUANG Wujing, ZHANG Ning, DONG Ruibiao, et al. Coordinated planning of multiple energy networks and energy hubs[J].Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5425-5437.

 [13]刘自发,谭雅之,李炯,等.区域综合能源系统规划关键问题研究综述[J].综合智慧能源,2022,44(6): 12-24.

LIU Zifa, TAN Yazhi, LI Jiong, et al. Review on key points in the planning for a district-level integrated energy system [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(6): 12-24.

- [14]陈沼宇,王丹,贾宏杰,等.考虑 P2G 多源储能型微网日前最优经济调度策略研究[J].中国电机工程学报,2017,37(11):3067-3077.
 CHEN Zhaoyu, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Research on optimal day-ahead economic dispatching strategy for microgrid considering P2G and multi-source energy storage system[J].Proceedings of the CSEE,2017,37(11):3067-3077.
- [15]DING Z, CAO Y, XIE L, et al. Integrated stochastic energy management for data center microgrid considering waste heat recovery [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(3):2198-2207.
- [16]WANG Y, WANG Y, HUANG Y, et al. Optimal scheduling of the regional integrated energy system considering economy and environment [J]. IEEE Transactions on

Sustainable Energy, 2018, 10(4): 1939–1949.

[17]张涛,章佳莹,王凌云,等.计及用户行为的电-气-热综合能源系统日前经济调度[J].电力系统自动化,2019,43(11):86-94.

ZHANG Tao, ZHANG Jiaying, WANG Lingyun, et al. Dayahead economical dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system considering user behaviors [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43 (11) : 86-94.

[18]刘蓉晖,李子林,杨秀,等.考虑用户侧柔性负荷的社区综合能源系统日前优化调度[J].太阳能学报,2019,40 (10):2842-2850.

LIU Ronghui, LI Zilin, YANG Xiu, et al. Optimal dispatch of community integrated energy system considering userside flexible load [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2019, 40(10); 2842–2850.

- [19]PARISIO A, RIKOS E, GLIELMO L. A model predictive control approach to microgrid operation optimization [J].
 IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2014, 22(5):1813-1827.
- [20]王成山,吕超贤,李鹏,等.园区型综合能源系统多时间 尺度模型预测优化调度[J].中国电机工程学报,2019, 39(23):6791-6803.

WANG Chengshan, LYU Chaoxian, LI Peng, et al. Multiple time-scale optimal scheduling of community integrated energy system based on model predictive control [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(23):6791-6803.

[21]WU C, GU W, JIANG P, et al. Combined economic dispatch considering the time-delay of a district heating network and multi-regional indoor temperature control[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(1): 118-127.

- [22]GU W, WANG Z, WU Z, et al. An online optimal dispatch schedule for CCHP microgrids based on model predictive control[J].IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(5): 2332-2342.
- [23]吴鸣,骆钊,季宇,等.基于模型预测控制的冷热电联供型微网动态优化调度[J].中国电机工程学报,2017,37
 (24):7174-7184.

WU Ming, LUO Zhao, JI Yu, et al. Optimal dynamic dispatch for combined cooling heating and power microgrid based on model predictive control [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24):7174–7184.

[24]何畅,程杉,徐建宇,等.基于多时间尺度和多源储能的综合能源系统能量协调优化调度[J].电力系统及其自动化学报,2020,32(2):77-84.

HE Chang, CHENG Shan, XU Jianyu, et al. Coordinated optimal scheduling of integrated energy system considering multi-time scale and hybrid energy storage system [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(2): 77-84.

(本文责编:刘芳)

收稿日期:2022-09-30;修回日期:2023-03-22 上网日期:2023-05-11;附录网址:www.iienergy.cn

作者简介:

窦真兰(1980),女,高级工程师,博士,从事综合能源系 统及能源互联网等方面的研究,douzhl@126.com;

沈建忠(1973),男,高级工程师,从事电力营销工作, shenjianzhong@sh.sgcc.com.cn;

张春雁(1967),男,高级工程师,硕士,从事综合能源系统、能源互联网及电制氢综合利用等方面的研究, zhcytongji@126.com。