基于代理技术的广域源-荷双层递阶协同优化调度模型

张雨薇¹,刘文颖¹,夏 鹏¹,李亚楼²,安 宁²,林 俐¹ (1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206;2. 中国电力科学研究院,北京 100192)

摘要:广域民用负荷参与需求响应目前已成为促进风电消纳的新途径,然而广域民用负荷的调节时序特性复杂,使其在电网层的优化调度中难以对广域民用负荷进行直接调度。为此,提出了一种基于代理技术的广域 源-荷双层递阶协同优化调度模型。在负荷代理分区聚合广域民用负荷的基础上,上层(电网调度层)模型基 于负荷代理内聚合负荷的简化调节能力,考虑负荷调节时序的不确定性,协同优化风电、常规电源和负荷代 理的初始调度计划;下层(负荷代理层)模型考虑民用负荷个体的调节性能约束,以与负荷代理的初始调度计 划偏差最小为目标,优化得到民用负荷个体的调度计划;在上、下层模型之间引入递阶协同优化环节,将下层 模型的优化解反馈传递给上层模型,以修正风电场、常规电源的初始调度计划,形成最终广域源-荷调度方 案。算例仿真结果验证了所提模型的有效性和优越性,表明所提模型能在保证优化效果的同时显著提升求 解效率,为广域民用负荷直接参与电网优化调度提供一种切实可行的解决思路。

关键词:负荷代理;广域源-荷;双层优化;递阶协同优化;优化调度 中图分类号:TM 73 文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202103013

0 引言

近年来,我国风电行业迅猛发展,灵活调节电源 匮乏、系统调峰能力不足逐渐成为大规模风电消纳 受阻的重要原因^[12]。随着我国电力市场逐渐开放, 除了高载能等工业负荷外,广域分布的民用负荷资 源通过参与需求响应,也表现出巨大的有功调节潜 力^[3-4]。然而,民用负荷资源在空间上具有数量众 多、分布广泛的特点,在时间上具有调节特性迥异、 调节时序分散独立的特点,传统的集中式源-荷协调 优化控制方法对其难以适用^[5-6]。因此,为了充分挖 掘广域民用负荷的有功调节潜力,促进高比例风电 消纳,亟待开展广域源-荷协同优化调度研究。

目前,国内外学者已对源-荷有功优化调度进行 了较多的研究^[7-12]:文献[7-8]将高载能负荷纳入日 前有功调度计划,建立了集中式源-荷协调优化调度 模型,充分挖掘了高载能负荷的有功调节潜力,促进 了风电消纳,但该控制模式不适用于广域分布的民 用负荷资源;文献[9]引入负荷代理(或称负荷聚合 商),作为协调广域民用负荷和电网调度中心的中间 机构,实现了所管辖范围内负荷资源的分散自治;文 献[10]从电力公司角度设计了包含多种类型电力终

收稿日期:2020-08-13;修回日期:2021-01-19

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFE0208400);国家电 网有限公司总部科技项目(面向跨境互联的多能互补新型能 源系统关键技术研究)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2018YFE0208400) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (Key Technologies of Novel Integrated Energy System Considering Cross-border Interconnection) 端用户的负荷代理与电网调度中心的互动调度机 制;文献[11-12]分别针对电动汽车负荷和空调负荷 构建了相应的代理双层调度模型。上述研究通过代 理技术实现了广域民用负荷与电网层其他资源的 源-荷互动调度,但未考虑民用负荷时序响应调节特 性导致负荷代理可调节能力聚合建模困难的问题, 负荷个体调节性能信息难以精确、有效聚合传递给 电网优化层,降低了广域源-荷优化调度的效果。

针对上述问题,在新能源集群有功调度领域,提 出了分层递阶优化调度模型,由电网调度层制定新 能源电场层调度指令,电场层在上层有功指令的基 础上,制定本电场内新能源发电单元的有功指令,使 新能源电场的有功出力紧跟上级调度指令[13-14]。因 此,通过借鉴该优化思想,能够为传统负荷代理难以 向电网调度中心传递精确、有效的民用负荷个体调 节性能信息从而降低了广域源-荷优化效果的问题, 提供一种高效的解决思路。然而,分层递阶优化调 度模型在广域民用负荷调度方面与新能源集群有功 调度方面的应用存在差异性:在新能源集群有功调度 方面,每次优化在一个时间断面内使新能源电场的 有功功率跟踪调度指令,其上、下层模型的本质是单 阶段的静态规划模型;而在广域民用负荷调度方面, 由于存在电动汽车、蓄热电锅炉等对蓄电容量有要 求的调节对象,调度周期内前一时段负荷响应调节功 率的大小将对剩余时段的负荷调节能力产生影响, 其上、下层模型的本质是多阶段的动态规划模型。

综上,本文提出了基于代理技术的广域源-荷双 层递阶协同优化调度模型。本文的主要创新点在 于:所提负荷代理技术考虑了民用负荷时序响应调 节特性,并在利用负荷代理分区聚合广域可调节民 用负荷的基础上,在上层(电网调度层)模型和下层 (负荷代理层)模型之间引入递阶协同优化环节,将 下层模型的优化解反馈传递到上层模型,通过重新 求解上层优化模型,得到广域源-荷优化的最终调度 计划。算例仿真结果表明,所提模型能为广域可调 节民用负荷直接参与电网优化调度以促进风电消纳 提供一种便于实际应用的解决思路。

106

1 广域民用负荷需求响应调节时序特性对 聚合负荷调节能力及电网调度的影响

广域分布的电动汽车、蓄热电锅炉和空调等民 用负荷通过参与用户侧需求响应,展现出良好的负 荷调节潜力。然而,由于受到民用负荷用电量、用电 时段以及用户舒适度等约束条件(如电动汽车的电 池容量和充放电时段约束^[11]、空调的制冷舒适度约 束^[12]、蓄热电锅炉的储热能力约束^[15])限制,民用负 荷的可调节能力受到需求响应调节时序的影响。具 体而言,在单一优化调度周期(通常为24 h)内,前一 时段民用负荷参与需求响应的调节计划将对剩余时 段的负荷调节能力(最大可上调功率、最大可持续上 调时长)产生影响。

另外,由于民用负荷个体具有容量小、数量众多 和并网电压等级低等特征,其难以直接参与电网层 的优化调度,而主要通过聚合负荷的形式间接参与。 广域民用负荷需求响应的调节时序特性对聚合负荷 调节能力以及对电网调度的影响分析具体如下。

1.1 广域民用负荷需求响应调节时序特性对聚合 负荷调节能力的影响

广域民用负荷需求响应的调节时序特性对聚合 负荷调节能力的影响示意图见图1。聚合负荷内部 有较为充足的调节资源,通常可全时段响应调度需 求,因此可以忽略聚合负荷功率爬坡特性约束^[16]。

为了简化分析,假设所有负荷个体的可调节特性相同,具体如图1(a)和式(1)所示。

$$P_i^t = P_o + \Delta_{up} \left(\gamma \left(t - t_i \right) - \gamma \left(t - t_i - T_{on}^{off} \right) \right)$$
(1)

其中, P_o 为负荷的原计划功率; P_i 为调节后t时刻负 荷i的实际功率; Δ_{up} 为负荷的最大可调节功率; $\gamma(t)$ 为阶跃函数; t_i 为负荷i的功率调节起始时刻; $T_{on}^{off} = t_{on}$ 为负荷功率调节持续时长, t_{on} 、 t_{off} 分别为负荷 调节的起始、结束时刻。另外,图1(a)只考虑了负荷 功率上调情形(Δ_{up} >0),在后文分析中负荷功率下调 情形(Δ_{up} <0)的作用与图1(a)类似,故不再单独考虑。

对于由 n 个相同负荷个体构成的负荷集群而 言,假设各负荷个体的功率调节时序相互独立、分散 分布,则负荷集群的整体功率可调节特性见式(2)。

$$P_{\Sigma}^{t} = nP_{o} + \sum_{i=1}^{n} \Delta_{up} \left(\gamma \left(t - t_{i} \right) - \gamma \left(t - t_{i} - T_{on}^{off} \right) \right)$$
(2)

其中,P₂为调节后t时刻负荷集群的实际功率。



图 1 不同词节时序符性下乘合页何的词节能刀 Fig.1 Adjustable capacity of aggregated load under different regulation time sequence characteristics

结合式(1)、(2)可知,负荷集群的聚合调节能力 与负荷个体的实际调节时序密切相关。下文结合2 个极端调节场景,分析负荷集群的聚合调节能力。

(1)如图1(b)所示,当n个负荷个体在相同的时 刻集中响应功率调节指令时,负荷集群的最大可上 调功率取得最大值 $n\Delta_{up}$,但是可持续调节时长取得 最小值 $t_{off} - t_{on}$ 。

(2)如图1(c)所示,当n个负荷个体响应功率调 节指令的时序均匀分散分布时,负荷集群的最大可 上调功率ΔP_{x,max}取得最小值,如式(3)所示;但可持 续调节时长Δt_x取得最大值,如式(4)所示。

$$\Delta P_{\Sigma, \max} = \begin{cases} \Delta_{up} & n(t_{off} - t_{on}) \leqslant T \\ \left\lceil n(t_{off} - t_{on})/T \right\rceil \Delta_{up} & \nexists tb \end{cases}$$
(3)
$$\Delta t_{\Sigma} = \begin{cases} n(t_{off} - t_{on}) & n(t_{off} - t_{on}) \leqslant T \\ T & \ddagger tb \end{cases}$$
(4)

其中,「]表示向上取整;T为优化调度周期。

由上述分析可知,随着负荷个体响应功率调节 指令的时序分散分布程度增加,负荷集群的最大可 调节功率逐渐降低,可持续调节时长逐渐增加。

 1.2 广域民用负荷需求响应调节时序特性对电网 调度的影响

仍以负荷功率上调情形为例,给定风电功率预 测曲线和常规电源的调度计划曲线,结合广域民用 负荷需求响应调节时序极端调节场景,对广域民用 负荷需求响应调节时序特性对电网调度的影响进行 分析,如附录A图A1所示。

在图A1(a)中,n个负荷个体响应功率调节指令



的时序集中分布于风电多发时段 ΔT_{up} 内,此时广域 民用负荷参与电网调度时可增加的风电消纳电量 ΔE_w 取得最大值,如式(5)所示。

$$\Delta E_{\rm w} = \begin{cases} n\Delta_{\rm up} \left(t_{\rm off} - t_{\rm on} \right) & t_{\rm off} - t_{\rm on} \leqslant \Delta T_{\rm up} \\ n\Delta_{\rm up} \Delta T_{\rm up} & \ddagger \& \end{cases}$$
(5)

在图 A1(b)中,n个负荷个体响应功率调节指令的时序集中分布在风电少发时段,此时广域民用负荷不参与电网调度,可增加的风电消纳电量取得最小值0。

在图A1(c)中,n个负荷个体响应功率调节指令的时序均匀分散分布,此时广域民用负荷参与电网调度可增加的风电消纳电量如式(6)所示。

$$\Delta E_{\rm w} = \begin{cases} n\Delta_{\rm up}(t_{\rm off} - t_{\rm on}) & n(t_{\rm off} - t_{\rm on}) \leq \Delta T_{\rm up} \\ \Delta_{\rm up}\Delta T_{\rm up} & \ddagger tb \end{cases}$$
(6)

以上主要考虑负荷调节时序特性,为了简化公 式,均假设负荷调节能力小于风电调峰功率缺额。

由上述分析可知,当负荷个体响应功率上调指 令的能力集中在风电多发时段时,广域民用负荷参 与电网调度,可增加的风电消纳电量最多;随着负荷 个体响应功率调节指令时序的分散分布程度增加, 可增加的风电消纳电量减少;但当负荷个体响应功 率上调指令的能力集中在风电少发时段时,广域民 用负荷不具有增加风电消纳电量的能力。

2 基于代理技术的广域源-荷双层递阶协同 优化调度机制

2.1 广域民用负荷需求响应调节时序特性对负荷 代理机制的影响分析

广域民用负荷需求响应的目的是消纳大规模风 电,我国的大规模风电基地多位于风资源富裕地区, 这类地区的地市级电网内含有较多的工业负荷、较 少的可调节民用负荷,因此需要调用全省范围内广 域民用负荷的调节能力进行风电消纳。对于一个省 级电网而言,电动汽车、蓄热电锅炉和空调等可调节 民用负荷数量众多,并网电压等级低,相互之间的电 气距离远,地域分布广泛,难以直接参与省级电网调 度中心的优化调度。为此,本文基于代理技术将电 气联系较紧密或地理位置相近(地市级电网)的可调 节民用负荷进行聚合,并通过负荷代理间接参与省 级电网调度中心的优化调度,具体的负荷代理控制 结构及其调度机制如图2所示。

负荷代理调度机制包含以下2个部分。①向上 传递负荷可调节潜力:负荷代理控制中心根据民用 负荷的个体调节性能信息进行聚合,得到聚合负荷 调节性能信息,并将其上传至省级电网调度中心,供 优化决策使用。②向下传递负荷调度计划:负荷代 理控制中心对省级电网调度中心下发的调度控制指



Fig.2 Control structure and scheduling mechanism of

load agent

令进行优化分解,并下发给控制范围内的民用负荷 个体执行。

图 2 中,省级电网调度中心依据负荷代理上传 的聚合负荷调节性能信息做出优化决策,因此省级 电网调度中心能否得到精确、有效的负荷代理聚合 调节能力,成为影响负荷代理调度机制优化效果的 关键。然而,由第1节可知,受广域民用负荷需求响 应调节时序特性的影响,负荷代理难以准确聚合电 动汽车、空调、蓄热电锅炉等负荷个体的功率调节能 力,并将其传递给省级电网调度中心,这将降低省级 电网调度中心对广域源-荷资源的优化调度效果。

2.2 广域源-荷双层递阶协同优化调度机制

针对以上问题,本文引入一种双层递阶协同优 化调度机制如图3所示,主要包含以下3个部分。

(1)电网调度层初始协同优化。

为最大化挖掘广域可调节民用负荷的调节潜 力,负荷代理层根据负荷个体的调节性能信息,通过 线性叠加方式得到聚合负荷的初始调节能力,同时考 虑负荷调节时序的不确定性,并上传给电网调度层 (省级电网调度中心),供其初始协同优化决策使用。 电网调度层(省级电网调度中心)基于负荷代理







层(负荷代理控制中心)上传的聚合负荷初始调节能 力以及风电场预测信息、系统负荷预测信息、常规电 源调节能力信息,以最大化消纳弃风电量为目标进 行协同优化,得到风电场、常规电源和负荷代理的初 始有功调度计划。

(2)负荷代理层协同优化。

为了减少聚合负荷初始调节能力对初始有功调度计划的影响,负荷代理层(负荷代理控制中心)考虑控制范围内的电动汽车、蓄热电锅炉和空调等可调节负荷的个体调节性能约束,以与负荷代理初始有功调度计划偏差最小为目标,优化得到可调节负荷个体的有功调度计划。

(3)负荷代理层-电网调度层递阶协同优化。

为了修正聚合负荷初始调节能力引起的电网调 度层优化调度偏差,负荷代理层将基于可调节民用 负荷个体调节性能约束优化得到的有功调度计划反 馈传递给电网调度层,电网调度层再进行递阶协同 优化,得到最终修正的广域源-荷有功调度计划。

3 基于代理技术的广域源-荷双层递阶协同 优化调度模型

3.1 电网调度层协同优化模型

(1)目标函数。

电网调度层以最大化消纳弃风电量、减少系统运行成本为优化目标建立协同优化模型。为了降低模型的求解复杂度,本文将弃风电量转换为弃风惩罚成本,其与系统运行成本共同构成电网调度层综合调度成本最小的目标函数,如式(7)所示。

$$\min C = C_{\rm G} + C_{\rm R} + C_{\rm W} \tag{7}$$

其中,C为电网调度层综合调度成本;C_G、C_R、C_w分别 为常规机组发电成本、负荷代理调节成本、风电弃风 惩罚成本,具体计算公式分别如式(8)—(10)所示。

a. 常规机组发电成本。

$$C_{\rm G} = \sum_{i=1}^{T} \sum_{i=1}^{N_{\rm G}} [a_i + b_i P_{\rm Gi}^i + c_i (P_{\rm Gi}^i)^2] \Delta T$$
(8)

其中, $P_{G_i}^t$ 为t时刻常规机组i的平均出力; $a_i h_i h_i c_i$ 为常规机组i的发电成本系数; N_c 为常规机组的数量; T为调度周期; ΔT 为单位优化步长。

b. 负荷代理调节成本。

省级电网调度中心向各负荷代理下达有功调度 计划指令的同时,也为其提供一定的经济补偿,从而 产生调节成本,计算式为:

$$C_{\rm R} = \sum_{t=1}^{T} \sum_{k=1}^{N_{\rm R}} \lambda_{\rm R} \left| P_{\rm Rk}^{t} - P_{\rm RFk}^{t} \right| \Delta T \tag{9}$$

其中, P^t_{Rk}、P^t_{RFk}分别为t时刻负荷代理k的负荷用电 功率计划值、预测值;λ_R为负荷代理的单位调节成 本; N_R为负荷代理数量。 c.风电弃风惩罚成本。

$$C_{\rm W} = \sum_{t=1}^{T} \lambda_{\rm W} (P_{\rm WF}^{t} - P_{\rm W}^{t}) \Delta T \qquad (10)$$

其中, *P*^{*t*}_w, *P*^{*t*}_w, 分别为*t* 时刻风电出力的计划值、预测 值; λ_w为单位弃风电量的惩罚成本。

(2)约束条件。

约束条件包括系统功率平衡约束、常规机组调 节性能约束、风电出力约束和负荷代理的聚合负荷 功率调节性能约束等。

a. 系统功率平衡约束。

在电网调度层的协同优化中,广域源-荷资源 总有功出力等于系统常规负荷及外送功率需求,即:

$$P_{\mathrm{L},t} + P_{\mathrm{WS},t} = P_{\mathrm{W}}^{t} + \sum_{i=1}^{N_{\mathrm{G}}} P_{\mathrm{G}i}^{t} - \sum_{k=1}^{N_{\mathrm{R}}} P_{\mathrm{R}k}^{t}$$
(11)

其中,P_L,为t时刻系统的常规负荷需求;P_{ws},为t时 刻系统的外送功率需求。

b. 常规机组调节性能约束。

$$\begin{pmatrix}
P_{G_{i,\min}} \leq P_{G_{i}} \leq P_{G_{i,\max}} \\
P_{G_{i}}^{t} - P_{G_{i}}^{t-1} \leq P_{G_{i,up}}, P_{G_{i}}^{t-1} - P_{G_{i}}^{t} \leq P_{G_{i,down}}
\end{cases}$$
(12)

其中, $P_{Gi, max}$ 、 $P_{Gi, min}$ 分别为常规机组i的出力上、下限; $P_{Gi, up}$ 、 $P_{Gi, down}$ 分别为常规机组i的上爬坡、下爬坡速率限值。

c.风电出力约束。

$$0 \leq P_{W}^{t} \leq P_{WF}^{t} \tag{13}$$

d. 负荷代理的聚合负荷功率调节性能约束。

在电网调度层的初始协同优化中,聚合负荷功 率调节性能约束主要考虑其确定的有功调节范围约 束及不确定的调节时序约束。

$$\begin{cases} P_{Rk}^{t} \leq P_{RFk}^{t} + \alpha_{Rk}^{up,t} \Delta P_{Rk}^{up} \\ P_{Rk}^{t} \geq P_{RFk}^{t} - \alpha_{Rk}^{down} \Delta P_{Rk}^{down} \end{cases}$$
(14)

$$\begin{cases} \Delta P_{\mathrm{R}k}^{\mathrm{up}} = \sum_{j=1}^{N_{\mathrm{ev},k}} \Delta P_{\mathrm{ev}k,j}^{\mathrm{up}} + \sum_{a=1}^{N_{\mathrm{th},k}} \Delta P_{\mathrm{tb}k,a}^{\mathrm{up}} + \sum_{b=1}^{N_{\mathrm{ac},k}} n_{\mathrm{ac}k,b}^{\mathrm{up}} \Delta P_{\mathrm{ac}k,b}^{\mathrm{up}} \\ \Delta P_{\mathrm{R}k}^{\mathrm{down}} = \sum_{j=1}^{N_{\mathrm{ev},k}} \Delta P_{\mathrm{ev}k,j}^{\mathrm{down}} + \sum_{a=1}^{N_{\mathrm{tb},k}} \Delta P_{\mathrm{tb}k,a}^{\mathrm{down}} + \sum_{b=1}^{N_{\mathrm{ac},k}} n_{\mathrm{ac}k,b}^{\mathrm{down}} \Delta P_{\mathrm{ac}k,b}^{\mathrm{down}} \end{cases}$$
(15)

其中, $\Delta P_{\text{Rk}}^{\text{up}}\Delta P_{\text{Rk}}^{\text{down}}\Delta P_{\text{exk},j}^{\text{down}}\Delta P_{\text{exk},j}^{\text{down}}\Delta$

功率限值、可下调充放电功率限值、可投入压缩机数量、可切除压缩机数量及空调数量。

e. 负荷代理聚合负荷的初始电量需求约束。

$$Q_{Rk}^{\min} \leq \sum_{i=1}^{r} P_{Rk}^{i} \Delta T \leq Q_{Rk}^{\max}$$
(16)

$$\begin{cases} Q_{Rk}^{\max} = \sum_{j=1}^{N_{ev,k}} S_{evk,j}^{\max} + \sum_{a=1}^{N_{b,k}} Q_{bk,a}^{\max} + \sum_{j=1}^{N_{ac,k}} Q_{ack,b}^{\max} \\ Q_{Rk}^{\min} = \sum_{j=1}^{N_{ev,k}} S_{evk,j}^{\min} + \sum_{a=1}^{N_{bk,a}} Q_{bk,a}^{\min} + \sum_{b=1}^{N_{ac,k}} Q_{ack,b}^{\min} \end{cases}$$
(17)

其中, $Q_{\text{nax}}^{\text{max}}$, $Q_{\text{nkt}}^{\text{min}}$ 分别为负荷代理k的电量需求上、下限; $S_{\text{evk},j}^{\text{max}}$ 分别为负荷代理k内电动汽车j蓄电池荷电状态的上、下限; $Q_{\text{tok},a}^{\text{max}}$ 分别为负荷代理k内蓄热电锅炉a的蓄热电量上、下限; $Q_{\text{ack},b}^{\text{max}}$ 分别为负荷代理k内容调b的制冷用电量上、下限。

f. 在广域源--荷协同优化调度中,电网调度层追 求综合调度成本最小,而负荷代理、风电场追求获得 经济补偿最大,为了防止负荷代理及风电场为了获 取更大的经济补偿而虚报预测值,设置激励相容约 束^[17],使负荷代理及风电场选择报告真实预测值获 得的利益不小于虚报预测值获得的利益,即:

$$\begin{cases}
C_{Rk}\left(\left\{P_{Rk}^{i}\right\},\left\{P_{RFk}^{i}\right\}\right) \ge \hat{C}_{Rk}\left(\left\{\hat{P}_{Rk}^{i}\right\},\left\{\hat{P}_{RFk}^{i}\right\}\right) \\
C_{W}\left(\left\{P_{W}^{i}\right\},\left\{P_{WF}^{i}\right\}\right) \ge \hat{C}_{W}\left(\left\{\hat{P}_{W}^{i}\right\},\left\{\hat{P}_{WF}^{i}\right\}\right)
\end{cases} (18)$$

其中, C_{Rk} 、 \hat{C}_{Rk} 分别为负荷代理 k 选择报告真实预测 值获得的利益、虚报预测值获得的利益; C_{W} 、 \hat{C}_{W} 分别 为风电场选择报告真实预测值获得的利益、虚报预 测值获得的利益; $\{\hat{P}_{\text{Rk}}^{i}\}$ 为负荷代理将负荷预测虚报 为 $\{\hat{P}_{\text{RFk}}^{i}\}$ 时负荷用电功率的计划值, \hat{P}_{RFk}^{i} 服从以 P_{RFk}^{i} 为均值的正态分布; $\{\hat{P}_{\text{W}}^{i}\}$ 为风电场将风电预测虚报 为 $\{\hat{P}_{\text{WF}}^{i}\}$ 时风电功率的计划值, \hat{P}_{WF}^{i} 服从以 P_{WF}^{i} 为均 值的正态分布。

3.2 负荷代理层优化模型

在电网调度层初始协同优化的基础上,负荷代 理层考虑可调节民用负荷详细的个体调节性能约 束,以与负荷代理初始有功调节计划偏差最小、可调 节民用负荷用电成本最低为目标,优化得到电动汽 车、蓄热电锅炉、空调的有功调度计划,在最大化挖 掘居民负荷有功调节潜力的同时,通过降低负荷用 电成本来提高民用负荷参与有功调节的积极性。

(1)目标函数。

a. 负荷代理 k 内民用负荷聚合有功调节计划与 负荷代理初始有功调节计划的控制偏差 Δ $P_{\rm Bi}$ 为:

$$\Delta P_{\rm Rk}^{t} = \left| P_{\rm Rk}^{t} - \sum_{j=1}^{N_{\rm ev,k}} P_{\rm evk,j}^{t} - \sum_{a=1}^{N_{\rm th,k}} P_{\rm tbk,a}^{t} - \sum_{b=1}^{N_{\rm ack,b}} n_{\rm ack,b}^{t} P_{\rm ack,b} \right| (19)$$

其中,P^t_{evk,j}为t时刻负荷代理k内电动汽车j的充放

电功率计划,其值大于0表示充电功率,小于0表示 放电功率;Pⁱ_{bk,a}为t时刻负荷代理k内蓄热电锅炉a 的用电功率计划;nⁱ_{ack,b}为t时刻负荷代理k内空调b 的压缩机投切数量计划;P_{ack,b}为负荷代理k内空调b 的单台压缩机容量。

b. 负荷代理内民用负荷用电成本为:

$$\begin{cases} C_{Rk} = C_{Rk}^{ev} + C_{Rk}^{av} + C_{Rk}^{av} \\ C_{Rk}^{ev} = \lambda_{ev}^{c} \sum_{j=1}^{N_{ev,k}} \max \left\{ P_{evk,j}^{t}, 0 \right\} + \lambda_{ev}^{f} \sum_{j=1}^{N_{ev,k}} \min \left\{ P_{evk,j}^{t}, 0 \right\} \\ C_{Rk}^{tb} = \lambda_{ev}^{c} \sum_{a=1}^{N_{tb,k}} P_{tbk,a}^{t} - \lambda_{tb}^{t} \sum_{a=1}^{N_{tb,k}} \left| P_{tbk,a}^{t} - P_{tbfk,a}^{t} \right| \\ C_{Rk}^{av} = \lambda_{av}^{c} \sum_{b=1}^{N_{av,k}} n_{ack,b}^{t} P_{ack,b} - \lambda_{av}^{t} \sum_{b=1}^{N_{av,k}} \left| n_{ack,b}^{t} - n_{acfk,b}^{t} \right| P_{ack,b} \end{cases}$$
(20)

其中, $C_{\rm Rk}$ 为负荷代理k的负荷用电成本, $C_{\rm Rk}^{\rm ev}$, $C_{\rm Rk}^{\rm b}$ 、 $C_{\rm Rk}^{\rm ac}$ 分别为负荷代理k内电动汽车、蓄热电锅炉、空调的 用电成本; $\lambda_{\rm ev}^{\rm ev}$ 、 $\lambda_{\rm ev}^{\rm f}$ 分别为电动汽车单位充电、放电功 率价格; $\lambda_{\rm ev}^{\rm ev}$ 、 $\lambda_{\rm ev}^{\rm f}$ 分别为蓄热电锅炉单位功率用电价 格、单位功率调节价格; $P_{\rm bfk,a}^{\rm t}$ 为t时刻负荷代理k内 蓄热电锅炉a的预测用电功率; $\lambda_{\rm av}^{\rm ev}$ 、 $\lambda_{\rm ac}^{\rm t}$ 分别为单位 功率空调用电价格、单位功率调节价格; $n_{\rm acf,b}^{\rm t}$ 为t时 刻负荷代理k内空调b的预测投切压缩机数量。

此外,为了降低负荷代理层优化模型的求解难 度,本文将负荷代理层有功调度计划的控制偏差转 换为惩罚费用,加上民用负荷的用电成本构成负荷 代理综合优化成本的目标函数,如式(21)所示。

$$\min C_k = C_{Rk} + \lambda_{Rk} \Delta P_{Rk}^t \qquad (21)$$

其中, C_k 为负荷代理k的综合优化成本; λ_{Rk} 为负荷代理k的功率控制偏差惩罚系数。

(2)约束条件。

约束条件包括各负荷代理内电动汽车、蓄热电 锅炉和空调负荷的调节性能约束。

a. 电动汽车负荷调节性能约束包括充放电功率 约束及充放电时段约束、蓄电池荷电状态及离网时 用户期望蓄电量约束,分别如式(22)和式(23)所示。

$$\begin{cases} -P_{\text{evk},j}^{\text{c, max}} \leq P_{\text{evk},j}^{t} \leq P_{\text{evk},j}^{\text{f, max}} \\ P_{\text{evk},j}^{t} = 0 \quad t \notin [T_{\text{in},j}, T_{\text{out},j}] \end{cases}$$
(22)
$$\begin{cases} S_{\text{evk},j}^{t} = S_{\text{evk},j}^{t-1} + P_{\text{evk},j}^{t} \Delta T \\ S_{\text{evk},j}^{\min} \leq S_{\text{evk},j}^{t} \leq S_{\text{evk},j}^{\max} \\ S_{\text{evk},j}^{\min} + \sum_{t=T_{\text{in},k}}^{T_{\text{eut},k}} P_{\text{evk},j}^{t} \Delta T \geq S_{\text{evk},j}^{\text{out}} \end{cases}$$
(23)

其中, $P_{evk,j}^{c,max}$, $P_{evk,j}^{f,max}$ 分别为负荷代理k内电动汽车j的最大充电、放电功率; $T_{in,j}$, $T_{out,j}$ 分别为电动汽车j接入电网、离开电网的时刻; $S_{evk,j}^{t}$ 为t时刻负荷代理k内电动汽车j蓄电池的荷电状态; $S_{evk,j}^{in}$ 为负荷代理k内电动汽车j接入电网时的初始荷电状态,可根据次日行程安排估算得到; $S_{evk,j}^{out}$ 为负荷代理k内电动汽车j

110

离网时用户期望的蓄电量,能满足次日行程安排。

b. 蓄热电锅炉调节性能约束包括加热功率约 束及爬坡速率约束、蓄热电锅炉容量及蓄热电量需 求约束,分别如式(24)和式(25)所示。

$$\begin{cases} P_{\text{tbk},a}^{\min} \leqslant P_{\text{tbk},a}^{t} \leqslant P_{\text{tbk},a}^{\max} \\ P_{\text{tbk},a}^{t} - P_{\text{tbk},a}^{t-1} \\ \leqslant \Delta P_{\text{tbk},a}^{\max} \end{cases}$$
(24)

$$\begin{cases}
Q_{tbk,a}^{t} = Q_{tbk,a}^{t-1} + P_{tbk,a}^{t} \Delta T \\
Q_{tbk,a}^{min} \leqslant Q_{tbk,a}^{t} \leqslant Q_{tbk,a}^{max} \\
Q_{tbk,a}^{need.min} \leqslant Q_{tbk,a}^{0} + \sum_{t=1}^{T} P_{tbk,a}^{t} \Delta T \leqslant Q_{tbk,a}^{need.max}
\end{cases}$$
(25)

其中, $P_{\text{tbk},a}^{\text{min}}$ 、 $P_{\text{tbk},a}^{\text{min}}$ 分别为负荷代理k内蓄热电锅炉a的加热负荷功率上、下限; $\Delta P_{\text{tbk},a}^{\text{max}}$ 为负荷代理k内蓄 热电锅炉a加热功率的爬坡速率限值; $Q_{\text{tbk},a}^{0}$ 为负荷 代理k内蓄热电锅炉a的初始蓄热电量; $Q_{\text{tbk},a}^{\text{need,max}}$ 、 $Q_{\text{tbk},a}^{\text{need,min}}$ 分别为负荷代理k内蓄热电锅炉a蓄热电量 需求上、下限。

c. 空调负荷调节性能约束包括压缩机投切数量 约束及投切时间间隔约束、空调制冷用户舒适度 需求约束、制冷用电量约束,分别见式(26)—(28)。

$$\begin{cases} n_{ack,b}^{\min} \leq n_{ack,b}^{t} \leq n_{ack,b}^{\max} \\ \sum_{g=1}^{T_{ack,b}^{\min}} \left| n_{ack,b}^{t} - n_{ack,b}^{t-g} \right| = 0 \end{cases}$$
(26)

$$\begin{cases} T_{\text{ink},b}^{\min} \leqslant T_{\text{ink},b}^{t+1} \leqslant T_{\text{ink},b}^{\max} \\ T_{\text{ink},b}^{t+1} = (T_{\text{outk},b}^{t+1} - \eta P_{\text{ack},b}^{t}/A)(1-\varepsilon) + T_{\text{ink},b}^{t}\varepsilon \\ P_{\text{ack},b}^{t} = n_{\text{ack},b}^{t} P_{\text{ack},b}^{N} \end{cases}$$
(27)

$$Q_{\operatorname{ack},b}^{\min} \leqslant \sum_{t=1}^{T} P_{\operatorname{ack},b}^{t} \Delta T \leqslant Q_{\operatorname{ack},b}^{\max}$$
(28)

其中, $n_{ack,b}^{main}$, $n_{ack,b}^{min}$ 分别为负荷代理k内空调b可投切压 缩机数量的上、下限; $T_{ack,b}^{min}$ 为负荷代理k内空调b压 缩机相邻2次投切的最小时间间隔; $T_{ink,b}^{t}$, $T_{outk,b}^{t+1}$ 分别 为t时刻负荷代理k内空调b的室内温度、t+1时刻负 荷代理k内空调b的室外温度; $T_{ink,b}^{min}$, $T_{ink,b}^{main}$ 分别为负荷 代理k内空调b室内温度的最小值、最大值; ε 为散热 系数,本文中取值为0.96; η 为空调的能效比;A为导 热系数,本文中取值为0.18 \mathbb{C} / kW。

3.3 负荷代理层-电网调度层的递阶协同优化环节

为了降低负荷代理层聚合负荷的初始调节能力 对电网调度层协同优化效果的影响,在电网调度层、 负荷代理层之间引入递阶协同优化环节。

首先,根据负荷代理层的优化结果(包括*P*^{*t*}_{evk},), *P*^{*t*}_{tbk,a},*n*^{*t*}_{ack,b}),反馈修正负荷代理层的初始有功调度计 划,如式(29)所示。

$$\tilde{P}'_{\rm Rk} = \sum_{j=1}^{N_{\rm ev,k}} P'_{\rm evk,j} + \sum_{a=1}^{N_{\rm th,k}} P'_{\rm tbk,a} + \sum_{b=1}^{N_{\rm ack,b}} n'_{\rm ack,b} P_{\rm ack,b}$$
(29)

其中, *P*_R为t时刻负荷代理k有功调度计划的修

正值。

然后,负荷代理层将修正后的有功调度计划反 馈传递给电网调度层,电网调度层基于给定的负荷 代理有功调度计划,重新修正协同优化模型(式(7)、 (8)、(10)—(13))并进行求解,得到电网调度层风电 场、常规机组的修正调度计划,最终与负荷代理层的 优化结果(*P*^{*i*}_{evk,j}、*P*^{*i*}_{tbk,a}、*n*^{*i*}_{ack,b})共同形成广域源-荷双层 递阶协同优化调度方案。

3.4 模型求解

本文所建电网调度层协同优化调度模型见式 (7)—(18),其中约束式(14)和式(18)中包含不确定 量,首先对电网调度层模型的不确定量进行处理^[19], 然后对双层递阶协同优化调度模型进行求解。

模型不确定量的处理过程见附录B。经过处理 后,可将电网调度层协同优化调度模型转化为单目 标非线性优化模型。负荷代理层的优化模型见式 (19)-(28),其本质上为单目标非线性优化模型。 处理不确定量后的电网调度层协同优化调度模型及 负荷代理层优化模型均可以利用 MATLAB 中的 YALMIP优化算法包和CPLEX 优化算法包进行联合 求解。基于代理技术的广域源-荷双层递阶协同优 化调度模型求解流程如图4所示。



图4 模型求解流程图



4 算例分析

4.1 算例介绍

虽然本文将广域源-荷协同优化的范围限定为 省级大电网,但是省级电网中的电源、负荷资源数量 多,这将导致算例规模过大,不便于进行计算结果 的展示和分析。本文以某地区电网为例,该地区电 网内风电机组、常规机组的装机容量分别为800、 1200 MW,常规负荷、可调节民用负荷分别为1000、 240 MW,可调节民用负荷通过一个负荷代理参与电 网调度层的优化调度。其余仿真条件如下:①常规 机组的容量、调节参数见附录C表C1;②民用负荷 容量信息、可调节参数、用电价格及功率调节补偿价 格见附录C表C2;③负荷代理管理240 MW民用负 荷,负荷代理调节成本为800元/(MW·h),负荷代 理功率控制偏差惩罚系数为280元/(MW·h),电网 调度层的单位弃风电量惩罚成本为350元/(MW·h); ④优化调度周期为24h,单位优化步长为15min,共 有96个优化时段,待优化日的风电功率预测曲线见 附录C图C1,常规负荷需求预测曲线见附录C图 C2,负荷代理内电动汽车、蓄热电锅炉和空调负荷 需求预测曲线见附录C图C3。假设电动汽车在同 一地区内通勤,属于同一负荷代理分区,其在家和单 位均可实现充放电调节,通勤时段为07:00-09:00、 17:00-19:00,电动汽车上午、下午离网时刻的期望 蓄电量需求分别为总蓄电量的80%、50%。假设空 调负荷制冷、加热的舒适度范围分别为[18,22]、 [24,28] ℃。

4.2 计算结果分析

考虑到负荷调节时序性的不同对调度结果的影响,通过改变负荷调节时序的不确定性参数,对1.2 节中的极端场景进行仿真计算及对比分析。

(1)负荷调节时序集中分布场景。

如附录A图A1(a)所示,当负荷需求响应调节 时序集中分布在风电峰、谷时段时,将风电峰、谷时 段的负荷调节时序不确定性参数的均值设置为0.9, 其余时段设置为0;如附录A图A1(b)所示,当负荷 需求响应调节时序集中分布在非风电峰、谷时段时, 广域民用负荷实际上不参与电网调度,所以不对此 场景进行仿真计算。前者的计算结果如下。

首先,通过求解电网调度层的初始协同优化模型,得到风电、常规机组和负荷代理的初始有功调度 计划;然后,求解负荷代理层的优化模型,得到电动 汽车、蓄热电锅炉和空调负荷的有功调度计划;最 后,根据民用负荷个体有功调度计划,修正负荷代理 的初始有功调度计划,并将其反馈传递给电网调度 层,通过重新求解,得到风电、常规机组的有功调度 计划修正值。上述仿真过程的结果见图5。由图可 知,07:30—15:30为风电少发时段,负荷代理集中下 调了用电计划;05:00—07:30及15:30—24:00为风 电多发时段,负荷代理集中上调了用电计划;进一步 地,结合风电功率预测曲线(见附录C图C1)可知, 负荷代理通过将部分民用负荷用电计划由风电少发 时段集中转移至风电多发时段,在满足负荷用电量 需求约束的同时,提升了风电消纳电量。

(2)负荷调节时序分散分布场景。

如附录A图A1(c)所示,当负荷个体响应功率



图 5 负荷调节时序集中分布场景下的计算结果 Fig.5 Calculation results under centralized time distribution of load regulation

调节指令的时序均匀分散分布时,将各调度时段的 负荷调节时序不确定性参数的均值均设置为0.3。 该场景下风电、常规机组和负荷代理的初始有功调 度计划见附录C图C4。

由1.1节的分析可知,当负荷具有分散响应功率 调节指令的能力时,其最大可调节功率小于负荷具 有集中响应功率调节指令能力时的最大可调节功 率,因此,图C4(a)中负荷的调节幅度小于图5(a)中 负荷的调节幅度;在风电多发时段,由于负荷调节时 序分散分布场景下负荷提供的可上调功率少,造成 弃风较多,如图 C4(c)所示;在风电少发时段,由于 负荷调节时序分散分布场景下负荷提供的可下调功 率少,造成常规机组上调功率大,如图 C4(d)所示。

(3)2种负荷调节时序场景的计算结果对比。

上述2种负荷调节时序场景的求解结果如表1 所示。由表可知,负荷调节时序集中分布场景下的 弃风电量少,负荷调节量大,负荷用电成本较高,但 由于负荷调节量大,导致常规机组调节量小,相应的 常规机组调节成本低,因此负荷调节时序集中分布 场景的综合调度成本低。

表1 2种场景的求解结果对比

Table 1 Comparison of calculation results between

two scenarios							
场景	弃风电量 / (MW・h)	综合调度 成本 / 万元	居民负荷用电成本 / [元・(kW・h) ⁻¹]				
负荷调节时序 集中分布	3 2 2 3 . 6 6	8435.12	0.57				
负荷调节时序 分散分布	4561.55	8637.68	0.55				

4.3 优化结果比较分析

从模型有效性及求解效率角度对本文模型与传 统模型进行比较分析。

(1)模型有效性对比分析。

为验证本文所提模型的有效性,选取传统源-荷 双层优化调度模型进行对比分析。模型1为传统源-荷双层优化调度模型^[9],利用负荷代理聚合民用负 荷,引入负荷比例系数对负荷代理聚合负荷调节能 力进行简化建模,但不考虑负荷调节时序的不确定 性,负荷比例系数设置为0.7;模型2为本文所提模 型,相较于模型1,模型2以负荷代理内负荷个体调 节能力上、下限值之和作为负荷代理聚合负荷调节 能力,通过引入负荷调节时序不确定性参数考虑负 荷调节时序的不确定性,同时通过引入递阶协同优 化环节,所得优化解将考虑民用负荷个体调节性能 的信息反馈传递给电网调度层,降低了负荷代理层 简化处理聚合负荷调节能力对广域荷-源全局优化 效果的影响。采用上述2种优化调度模型对3.1节中 负荷调节时序集中分布场景进行求解,结果见图6。

由图6(a)可知,在00:00—01:30、04:00—07:30、 15:30—24:00风电多发时段,2种模型出现弃风功 率,但相较于模型1,模型2的风电有功调度计划曲 线更接近其功率预测曲线,弃风电量明显降低,验证 了模型2在促进风电消纳方面的有效性。由图6(b) 可知,在00:00—07:30、15:30—24:00时段,常规机 组按出力下限(600 MW)安排有功调度计划,为风电 消纳腾出空间;在07:30—15:30时段,常规机组上调 出力,填补了风电少发带来的负荷功率缺额,且模型 2的常规机组出力明显低于模型1,这是因为模型2



图6 模型有效性对比图

Fig.6 Comparison diagram of model effectiveness

能够将更多的民用负荷转移至风电多发时段,降低 了该时段的负荷功率需求。上述结果间接证明了模 型2在挖掘负荷调节潜力方面的有效性。由图6(c) 可知,模型1引入负荷比例系数,未考虑负荷调节时 序的不确定性,只能选择保守的负荷比例系数参与 电网层调度;相较于模型1,模型2在风电少发时段 (07:30—15:30)具有更多的民用负荷下调功率,在 风电多发时段(00:00—07:30、15:30—24:00)具有更 多的民用负荷上调功率;模型1与模型2计算所得结 果均在负荷实际调节能力的上、下限范围之内。综 上可知,相较于传统方法,本文方法在电网调度层考 虑了负荷调节时序不确定性,且引入了递阶协调优 化环节,能够更加有效地将民用负荷个体调节性能 信息传递给电网调度层,提高负荷代理层对民用负 荷调节潜力的挖掘能力。

进一步分析上述模型的优化结果,可得系统弃 风电量、综合调度成本、居民负荷用电成本见表2。

表2 模型1与模型2的优化结果对比

Table 2 Comparison of optimization results

between Model 1 and Model 2

おお 王川	弃风电量 /	综合调度	居民负荷用电成本 /
侠型	$(MW \cdot h)$	成本 / 万元	[元・(kW・h)-1]
1	4861.55	8564.62	0.64
2	3223.66	8435.12	0.57

由表2可知,相较于模型1,模型2的弃风电量、 综合调度成本、民用负荷用电成本分别降低了 33.69%、1.51%、10.94%,这说明本文所提双层递阶 协同优化调度机制能够更大程度地挖掘民用负荷调 节能力,促进风电消纳,降低调度运行成本。

(2)模型计算效率对比分析。

为了验证本文所提模型(模型2)在减少计算时间、提高求解效率方面的优越性,另外选择了基于反复迭代的双层优化模型^[18](模型3)进行仿真比较分析。2种模型的计算结果如表3所示。

表 3	横 刊?	与模型3	的优化	▶结果対比
105	1天王 4	コルチェノ	H J V L P	

Table 3 Comparison of optimization results between Model 2 and Model 3

	0000	cen model	2 und Wioder 5	
描刊	弃风电量 /	综合调度	居民负荷用电成本 /	计算时
侠望	$(MW \cdot h)$	成本 / 万元	[元·(kW·h) ⁻¹]	间/s
2	3 2 2 3 . 6 6	8435.12	0.57	82
3	3 2 4 5 . 3 7	8411.02	0.57	175

由表3可以看出,模型2与模型3的计算结果相 近,但模型2的计算时间降低了53.1%。由此可知, 本文所提模型能在保证精度的条件下,大幅降低模 型的求解时间,更具有实用价值。

5 结论

针对广域民用负荷难以直接参与电网协调优化 调度的问题,本文在利用负荷代理分区聚合广域分 布民用负荷的基础上,引入了递阶协同优化调度机 制,实现了广域源--荷侧资源的协调优化控制。通过 仿真算例得到了如下结论:

(1)利用负荷代理分区聚合广域民用负荷,构建 广域源-荷双层优化调度模型,能够有效解决广域民 用负荷难以直接参与电网层协调优化的问题,挖掘 民用负荷调节潜力,减少弃风电量;

(2)通过引入双层递阶协同优化调度机制,在上 层模型中考虑负荷调节范围及调节时序的不确定 性,利用下层模型优化解的形式将民用负荷个体的 调节性能约束信息反馈传递给上层模型,能够有效 应对负荷代理难以准确获取聚合负荷调节能力的问 题,在保证双层调度模型优化效果的同时兼顾模型 的求解效率,为广域民用负荷直接参与电网优化调 度提供了一种有利于实际应用的指导意见。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

 [1] 吕良,刘文颖,张临建,等.考虑风电集群接入电网分区的多元 优化控制方法[J].电力自动化设备,2019,39(7):23-29.
 LÜ Liang,LIU Wenying,ZHANG Linjian, et al. Multi-element optimization control method of power grid partition integrated with wind power cluster[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(7):23-29.

- [2] 胡弘,韦化,李昭昱.风电接入下核电参与电力系统调峰的协 调优化模型[J].电力自动化设备,2020,40(5):31-39.
 HU Hong, WEI Hua, LI Zhaoyu. Coordinated optimization model considering nuclear power participating in peak load regulation of power system with wind power[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(5):31-39.
- [3]卫婧菲,刘其辉.居民小区电动汽车光伏充电站三分段能量管理策略[J].电力自动化设备,2017,37(8):249-255.
 WEI Jingfei,LIU Qihui. Tri-period energy management strategy for PV-assisted EV charging station in residential area[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(8):249-255.
- [4] 陈璐,徐青山,杨永标,等. 促进削峰填谷的居民实时积分套餐 优化设计[J]. 电力自动化设备,2020,40(7):134-142.
 CHEN Lu, XU Qingshan, YANG Yongbiao, et al. Optimization design of residents' real-time score plan for promoting peakload shifting[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7):134-142.
- [5] 刘文颖,文晶,谢昶,等.考虑风电消纳的电力系统源荷协调多目标优化方法[J].中国电机工程学报,2015,35(5):1079-1088.
 LIU Wenying, WEN Jing, XIE Chang, et al. Multi-objective optimal method considering wind power accommodation based on source-load coordination [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5):1079-1088.
- [6] 赵冬梅,殷加玞.考虑源荷双侧不确定性的模糊随机机会约束 优先目标规划调度模型[J].电工技术学报,2018,33(5):1076-1085.
 ZHAO Dongmei,YIN Jiafu. Fuzzy random chance constrained

preemptive goal programming scheduling model considering source-side and load-side uncertainty[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2018,33(5):1076-1085.

- [7] 李亚龙,刘文颖,谢昶,等. 高载能负荷消纳受阻风电的供应 链博弈决策方法探究[J]. 电力系统自动化,2017,41(7):135-143.
 LI Yalong,LIU Wenying,XIE Chang,et al. Supply chains game based decision-making method of congested wind power consumption for high-energy load[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(7):135-143.
- [8] 孙宇军,王岩,王蓓蓓,等.考虑需求响应不确定性的多时间尺度源荷互动决策方法[J].电力系统自动化,2018,42(2):106-113,159.

SUN Yujun, WANG Yan, WANG Beibei, et al. Multi-time scale decision method for source-load interaction considering demand response uncertainty[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018,42(2):106-113,159.

- [9] 文刚,翁维华,赵岩,等.考虑负荷聚集商参与的源荷互动双层 优化模型[J].电网技术,2017,41(12):3956-3963.
 WEN Gang, WENG Weihua, ZHAO Yan, et al. A bi-level optimal dispatching model considering source-load interaction integrated with load aggregator[J]. Power System Technology, 2017,41(12):3956-3963.
- [10] 王珂,刘建涛,姚建国,等. 基于多代理技术的需求响应互动调度模型[J]. 电力系统自动化,2014,38(13):121-127.
 WANG Ke,LIU Jiantao,YAO Jianguo, et al. A multi-agent based interactive scheduling model considering demand response[J].
 Automation of Electric Power Systems,2014,38(13):121-127.
- [11]何西,涂春鸣,王丽丽,等.考虑用户行车习惯的电动汽车充电 双层控制策略[J].电力系统自动化,2018,42(3):64-69.
 HE Xi, TU Chunming, WANG Lili, et al. Double-layer charging strategy for electric vehicles considering users' driving patterns[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42 (3):64-69.
- [12] 高赐威,李倩玉,李扬. 基于 DLC 的空调负荷双层优化调度和 控制策略[J]. 中国电机工程学报,2014,34(10):1546-1555.
 GAO Ciwei, LI Qianyu, LI Yang. Bi-level optimal dispatch

and control strategy for air-conditioning load based on direct load control[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(10):1546-1555.

- [13] 仲悟之,李梓锋,肖洋,等.高渗透联网风电集群有功分层递阶 控制策略[J].电网技术,2018,42(6):1868-1874.
 ZHONG Wuzhi,LI Zifeng,XIAO Yang, et al. Active hierarchical progressive control strategy of highly penetrated networked wind power cluster[J]. Power System Technology,2018,42(6): 1868-1874.
- [14] 崔杨,冯鑫源,李鸿博,等.限风情况下风电场群有功分层协调 控制策略[J].太阳能学报,2016,37(11):2807-2813.
 CUI Yang,FENG Xinyuan,LI Hongbo, et al. Hierarchical coordinated control strategy on active power of clustered wind farms during wind curtailment[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2016,37(11):2807-2813.
- [15] 李国庆,庄冠群,田春光,等.基于大规模储能融合蓄热式电锅 炉的风电消纳多目标优化控制[J].电力自动化设备,2018,38 (10):46-52,59.

LI Guoqing, ZHUANG Guanqun, TIAN Chunguang, et al. Multiobjective optimization control of wind power consumption based on regenerative electric boiler system integrated with largescale energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10):46-52, 59.

[16] 刘越. 需求响应资源分布式组合优化技术研究[D]. 南京:东 南大学,2017.

LIU Yue. Research on distributed combination optimization technology of demand response resource[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.

[17] 梁劲. 输配电企业营运的激励与契约机制设计研究[D]. 武

汉:武汉大学,2004.

LIANG Jin. An analysis on incentive and contracts' mechanism design in electricity transmission and distribution operation[D]. Wuhan:Wuhan University, 2004.

 [18] 张涛,王成,王凌云,等.考虑虚拟电厂参与的售电公司双层优 化调度模型[J].电网技术,2019,43(3):952-961.
 ZHANG Tao,WANG Cheng,WANG Lingyun, et al. A bi-level optimal dispatching model of electricity retailers integrated with VPPs[J]. Power System Technology,2019,43(3):952-961.

[19] 毕明凯,何世伟,黎浩东,等.基于随机客流OD的市郊铁路停站方案优化研究[J].铁道学报,2018,40(10):1-7.
BI Mingkai, HE Shiwei, LI Haodong, et al. Research on optimization of suburban railway stop schedule based on random traffic OD[J]. Journal of the China Railway Society,2018,40 (10):1-7.

作者简介:



张雨薇(1992—),女,黑龙江鸡西人, 博士研究生,主要研究方向为电力系统分析 与控制(E-mail:zyw19920309@163.com); 刘文颖(1955—),女,北京人,教授,博 士研究生导师,主要研究方向为电力系统分

士研究生导师,主要研究方向为电力系统分析与控制、新能源电力系统特性与多能互补 等(**E-mail**:liuwenyingls@sina.com);

张雨薇

夏 鹏(1992—),男,湖南衡阳人,博 士,主要研究方向为新能源电力系统特性与

多能互补等(E-mail:xiapeng23@163.com)。

(编辑 陆丹)

Double-layer hierarchical and cooperative optimal scheduling model of wide area source-load based on agent technology

ZHANG Yuwei¹, LIU Wenying¹, XIA Peng¹, LI Yalou², AN Ning², LIN Li¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Participation of wide area civil loads in demand response has become a new way to promote wind power consumption. However, the complex regulation time sequence characteristics of wide area civil loads make it difficult to conduct direct scheduling of wide area civil loads in the optimal scheduling of power grid layer. Therefore, a double-layer hierarchical and cooperative optimal scheduling model of wide area source-load based on agent technology is proposed. On the basis of load agent partition aggregating wide area civil loads, the upper layer (power grid scheduling layer) model cooperatively optimizes the initial scheduling plans of wind power, conventional power generation and load agent based on the simplified adjustment ability of aggregated loads within the load agent, considering the uncertainty of load regulation time sequence. Considering the regulation performance constraints of civil load individuals, the lower layer (load agent layer) model optimizes the scheduling plan of civil load individuals with the objective of minimizing the deviation from the initial scheduling plan of load agents. A hierarchical and cooperative optimization link is introduced between the upper and lower layer models to transmit the optimization solution of lower layer model to upper layer model, which modifies the initial scheduling plans of wind farms and conventional power generations and forms the final wide area source-load scheduling plans. Simulative results of examples verify the effectiveness and superiority of the proposed model, and show that the proposed model can not only ensure the optimization effect, but also significantly improve the solution efficiency, thus providing a feasible solution for wide area civil loads to directly participate in the power grid optimization scheduling. Key words: load agent; wide area source-load; double-layer optimization; hierarchical and cooperative optimization; optimal scheduling

114



(a)调节时序集中分布于风电多发时段对电网调度的影响



附录 B

约束式(18)中不确定量设置的目的在于使负荷代理及风电场选择报告真实预测值获得的利益不小 于任意虚报预测值获得的利益,因此采用鲁棒优化法将不等式中的不确定量消除。

约束式(14)中不确定量设置的目的是模拟负荷调节时序的不确定性,首先将其转换为随机机会约束,然后通过等价转换为确定性约束。

式(14)对应的随机机会约束为:

$$\begin{cases} p_{\rm r} \{ P_{\rm Rk}^t \le P_{\rm RFk}^t + \Delta P_{\rm Rk}^{\rm up.t} \} \ge \beta^{\rm up} \\ p_{\rm r} \{ P_{\rm Rk}^t \ge P_{\rm RFk}^t - \Delta P_{\rm Rk}^{\rm down\,t} \} \ge \beta^{\rm down} \end{cases}$$
(B1)

其中, β^{up}、β^{down} 为负荷可调节量达到调节限值的置信水平。对式(B1)进行正态等价转换后得到式(B2)。

$$\begin{cases} \boldsymbol{\Phi} \left\{ \left(\frac{P_{Rk}^{t} - P_{RFk}^{t}}{\Delta P_{Rk}^{up,t}} - \boldsymbol{\mu}_{Rk}^{up,t} \right) / \boldsymbol{\sigma}_{Rk}^{up,t} \right\} \geq \boldsymbol{\beta}^{up} \\ \boldsymbol{\Phi} \left\{ \left(\frac{P_{RFk}^{t} - P_{Rk}^{t}}{\Delta P_{Rk}^{down,t}} - \boldsymbol{\mu}_{Rk}^{down,t} \right) / \boldsymbol{\sigma}_{Rk}^{down,t} \right\} \geq \boldsymbol{\beta}^{down} \end{cases}$$
(B2)

其中, Φ(·)为标准正态分布函数。将式(B2)中的标准正态分布函数取反函数并展开得到式(B3)。

$$\begin{cases} P_{Rk}^{t} \geq [\sigma_{Rk}^{up,t} \boldsymbol{\Phi}^{-1}(1-\boldsymbol{\beta}^{up}) + \boldsymbol{\mu}_{Rk}^{up,t}] \Delta P_{Rk}^{up,t} + P_{RFk}^{t} \\ P_{Rk}^{t} \leq P_{RFk}^{t} - [\sigma_{Rk}^{down,t} \boldsymbol{\Phi}^{-1}(1-\boldsymbol{\beta}^{down}) + \boldsymbol{\mu}_{Rk}^{down,t}] \Delta P_{Rk}^{down,t} \end{cases}$$
(B3)

式(B3)为确定性约束,且与式(14)等价,从而得到电网调度层的确定性模型。

附录 C

表 C1 常规机组容量及调节参数

Table C1 Capacity and adjustment parameters of thermal power units						
额定功率/MW	粉皂/公	技术出力范围/%	煤耗成本参数			
	奴 里/百		(<i>a</i> , <i>b</i> , <i>c</i>)			
600	1	50~100	(0.00041, 20.350, 896.79)			
300	2	50~100	(0.00070, 25.321, 578.89)			

表 C2 民用负荷具体参数信息 Table C2 Civil load specific parameter information

负荷 总容量/MW	单一负荷容量	负荷数量 功率范围	中变节国	调节速率	调节时间间隔	用电价格/	功率补偿价格/	
			功举犯国			[元·(kW·h)-1]	[元·(kW·h) ⁻¹]	
电动汽车	120	$30 kW/90 kW \cdot h$	4000	-15~30 kW	额定功率充放电	无	0.6/1.0	1.2
蓄热电锅炉	75	15/20/40 MW	3	0~15/20/40MW	±5%/min	无	0.2	0.8
空调	45	1.5 MW	30	0.15~1.5 MW	离散调节	1 h	0.6	1.0













(a)负荷代理有功调度计划初始值及修正值



(b)负荷代理内民用负荷有功调度计划优化结果



Fig.C4 Calculation results under the scattered time distribution of load regulation