

• 电气工程 •

DOI:10.15961/j.jsuese.202100247



本刊网刊

考虑需求侧响应的电气设备调度混合分散式优化

程 杉¹, 尚冬冬^{1*}, 代 江², 钟仕凌¹

(1.智慧能源技术湖北省工程研究中心(三峡大学), 湖北 宜昌 443002; 2.贵州电网有限责任公司电力调度控制中心, 贵州 贵阳 550002)

摘 要:为了缓解用能持续增加对电力系统造成的负担和解决大规模电气设备联合调度时的优化计算问题, 提出了考虑需求侧响应的大规模可控用电设备和储能设备的混合分散式优化调度方法。首先, 建立可控用电设备负荷和储能设备的数学模型, 在此基础上, 构建了以系统和各设备运行特性为约束, 以系统购电费用、用户不满意费用 and 储能设备损耗费用之和最小为目标函数的混合整数非线性集中式优化数学模型。其次, 针对此高维、多目标和多约束且难于求解的非线性集中式优化模型, 采用拉格朗日松弛法将其分解为两个子问题, 即分别对应可控电气设备负荷的优化调度问题和储能设备的优化调度问题。对于前者又可进一步分解为各可控电气设备负荷的优化调度子问题, 并通过内点法求解计算; 对于后者又可分解为各个储能设备问题的混合整数线性优化调度子问题, 并通过Benders分解法并行求解计算。然后, 为了验证所提混合分散式优化方法的有效性及其优越性, 基于算例, 对比分析集中式和分散式优化调度时的目标函数值和电气设备优化调度结果, 不同规模电气设备对集中式和分散式优化方法计算效率的影响。根据结果可见, 所提优化调度方法与集中式优化方法的目标函数值基本一致, 但所提方法对应的电气设备优化调度结果可以很好地响应分时电价策略, 储能设备削峰填谷效果好; 而且, 所提混合分散式优化方法可以降低优化问题的求解复杂度, 计算效率高, 几乎不受电气设备规模的影响。

关键词:需求响应; 混合整数非线性规划; 分散式优化; 拉格朗日松弛法; 内点法; Benders分解

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2021)06-0235-09

Hybrid Decentralized Optimization of Dispatching Electrical Units with Consideration of Demand-side Response

CHENG Shan¹, SHANG Dongdong^{1*}, DAI Jiang², ZHONG Shiling¹

(1.Hubei Provincial Eng. Center for Intelligent Energy Technol. (CTGU), Yichang 443002, China;

2.Electric Power Dispatching and Control Center of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China)

Abstract: In order to alleviate the burden of continuous increasing energy consumption falling on the power system and solve the complex calculation problem in the joint dispatching of large-scale electrical equipment, a hybrid decentralized optimization of dispatching the large-scale controllable appliances and energy storage equipment considering demand side response was proposed in this paper. Firstly, two mathematical models of controllable electrical equipment load and energy storage equipment were established. On this basis, a mixed integer non-linear centralized optimization model was mathematically formulated under the constraints of the operation characteristics of the system and equipment, with the objective of minimizing the sum of electricity purchase cost, users' dissatisfaction cost and energy storage equipment loss cost. Secondly, for tackling the difficult nonlinear centralized optimization problems of high dimensionality, multi objectives and multiple constraints, the Lagrange relaxation method was used to decompose the problem into two sub-problems, namely, optimally scheduling the controllable electrical equipment load and optimizing the dispatch of the energy storage equipment. Then, the former was further decomposed into optimizing dispatch of each con-

收稿日期:2021-03-23

基金项目:国家自然科学基金项目(51607105); 三峡大学硕士学位论文培优基金项目(2021SSPY069)

作者简介:程 杉(1981—), 男, 教授, 博士. 研究方向: 新能源微电网运行优化与控制等. E-mail: hpucquyzu@ctgu.edu.cn

* 通信作者:尚冬冬, E-mail: 820676577@qq.com

网络出版时间:2021-11-11 16:22:33

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20211110.1347.003.html

trollable electrical equipment and solved by the interior point method, while the latter was decomposed into a set of mixed integer linear optimization sub-problems of scheduling each energy storage equipment and solved in parallel by the Benders decomposition method. Thirdly, a series of numerical simulations together with comparison analysis were performed to verify the effectiveness and superiority of the proposed dispatch optimization method. For example, the optimization objective value and the optimal dispatch solution corresponding to the proposed method were illustrated and compared with those of the centralized method to demonstrate the effectiveness of the hybrid decentralized optimization method. And the influence of different numbers of dispatching equipment on the computation efficiency was investigated on the centralized and decentralized optimization method to show the superiority of the proposed hybrid decentralized optimization method. According to the numerical simulation results, the optimization objective value of the proposed method is basically consistent with that of the centralized. Moreover, the identified dispatch solution enables to efficiently respond to the time-of-use and results in good effect of peak-shaving and valley-filly. Besides, the calculation efficiency of the proposed hybrid decentralized optimization method is of high computation efficiency and not affected by the increasing number of the schedulable electrical equipments.

Key words: demand response; mixed integer nonlinear programming; decentralized optimization; Lagrangian relaxation method; interior point method; Benders decomposition

需求响应作为一种灵活、快捷的响应手段,具有短期内提高需求弹性、平滑负荷曲线等重要作用^[1]。江苏电力需求响应的探索和实践^[2]表明需求响应是促进电力供应侧和需求侧平衡的一种有效的解决方案。

储能利用低储高发为电力系统提供“削峰填谷”,既缓解电网运行压力,又发挥其梯次利用以获取经济效益^[3]。国内外学者对储能参与需求侧响应管理(demand side management, DSM)进行了广泛研究,其有助于增强负荷调度有效性,这一结论得到了普遍认可。针对小规模智能用电设备和储能联合调度问题,优化调度模型和方法^[4-8]有效解决了诸如家庭等具有小规模电器和储能的优化调度问题,但并不完全适用于楼宇、园区等涉及较大规模电气设备参与联合调度的场景。因为在这些场景中优化变量显著增加,优化模型中含有高维变量和多项约束条件,对优化计算方法要求更高。针对智能光伏楼宇的能量管理问题,史训涛等^[9]提出了基于粒子群优化算法的离线优化和基于在线学习与认知规则的混合在线决策方法,但该方法受学习数据影响并且存在不稳定性;鞠明远^[10]提出了基于云端数据的楼宇供电策略,通过遗传算法优化用电设备的开启状态和储能系统的功率输出,但该方法计算效率较低且结果不稳定。

上述文献^[4-10]中,无论是针对大规模还是小规模设备调度问题的求解方法均采用集中式优化控制方法,该方法根据优化控制的需要建立相应的单目标或多目标优化函数和全局约束条件。集中式优化控制方法最主要的不足:一是,由于采用全局性约束条件使得某些变量的搜索空间变大,进而造成计算量进一步增大,优化会极其费时甚至陷入“维数灾”;二是,需要收集大量信息,对用户信息隐私安全造成威胁,也忽视了可调控负荷和储能的分布特性。分散

式优化算法具有保护用户隐私,降低计算负担和保证独立性调度等方面的优势,可以很好地解决以上不足。周军^[11]和杨昭^[12]等采用了交替方向乘子法对智能楼宇群的电能共享问题进行分散式优化求解。交替方向乘子法虽然收敛精度高^[13-14],但如果子模块出现通信故障或其他故障,将会影响其他子模块求解,缺乏备用性。而拉格朗日松弛法优化时,子模块仅需与上层协调器通信,可解决交替方向乘子法缺乏备用性的问题。因此,为引导产消者用户充放电行为缓解线路过载,基于拉格朗日对偶分解原理,吴界辰^[15]采用了次梯度法并建立了迭代的分散式配网节点电价出清模型;汪樟垚^[16]提出了一种仅考虑用户利益的基于拉格朗日分解的分散式需求响应方法;为解决次梯度法收敛速度较慢的问题,程杉等^[17]提出了一种变步长的改进拉格朗日对偶松弛法以解决充储电站调度问题,使其收敛速度更快。但上述文献均未考虑经拉格朗日松弛法分解后的混合整数优化问题存在分解性。

基于以上考虑,为解决大规模电气设备联合调度时的优化计算效率问题,本文提出了考虑需求侧响应的电气设备调度混合分散式优化方法,基于用户侧建立优化调度的数学模型,同时,考虑了用户参与优化调度侧的意愿和利益,以购电费用、不满意费用和储能损耗费用之和最小为目标函数。含大规模可调控负荷和储能的联合优化调度其实质为含高维变量和多约束的混合整数非线性规划(mixed-integer nonlinear program, MINP)问题,为实现并行分布式计算,本文首先通过拉格朗日松弛法(Lagrangian relaxation, LR)将该问题解耦为可控电气设备负荷的优化调度和储能设备的优化调度两组子问题。前者为凸优化问题,通过内点法求解^[18];后者为混合整数优化问题,通过Benders分解法求解^[19],进一步降低优化问题的求解复杂度。

1 用户侧集中式优化模型

1.1 集中式调度框架

用户侧的集中式调度框架如图1所示,其中,中心控制器(center controller, CC)收集每个用电设备的实际可调度时间段和储能的初始能量以及每时段的能量,以进行集中调度,制定用电设备的调度及储能的充放电计划。

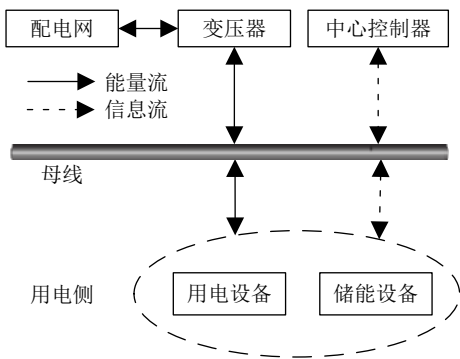


图1 集中式调度框架图

Fig. 1 Centralized scheduling architecture

1.2 可调控负荷和储能设备模型

将一天分为 J 个时段,每个时间段间隔为 ΔT 。

1.2.1 可调控负荷模型

电器设备分为可调控负荷和不可控负荷。下面建立可调控负荷的数学模型。

1) 设备的能量约束^[20]

每台设备在调度时段内总能量满足以下约束:

$$\sum_{h \in H} p_a^h \Delta T \geq E_a, \forall a \in A \quad (1)$$

式中: p_a^h 为第 a 台可调控负荷在第 h 时段消耗的功率; E_a 为第 a 台可调控负荷至少消耗的能量; H 为时段的集合, $H = \{1, 2, \dots, J\}$; A 为设备集合, $A = \{1, 2, \dots, N_a\}$; N_a 为设备数量。

2) 可控时间段约束

当设备在某时间点启动时,设定在该时间点所在的时间段末尾之后才能开始调度。同时,当设备在某时间点断开时,必须在该时间点所在时间的上一时段末结束调度^[17]。即:

$$\begin{cases} J_{j,a} = \left\lfloor \frac{T_{j,a}}{\Delta T} \right\rfloor \\ J_{d,a} = \left\lceil \frac{T_{d,a}}{\Delta T} \right\rceil \end{cases}, \forall a \in A \quad (2)$$

式中, $\lfloor \cdot \rfloor$ 和 $\lceil \cdot \rceil$ 分别表示向下和向上取整符号, $T_{j,a}$ 和 $T_{d,a}$ 分别为第 a 台可调控负荷实际接入和断开的时点, $J_{j,a}$ 和 $J_{d,a}$ 分别为负荷接受和结束调度。

3) 负荷功率上下限约束

第 a 台可调控负荷的可调度时间段 $H_a = [J_{j,a}, J_{d,a}]$ 。

调度时段必须在可控时间段内,在可控时间段外都无法进行调度。即满足:

$$\begin{cases} p_a^{\min} \leq p_a^h \leq p_a^{\max}, \forall h \in H_a \\ p_a^h = 0, \text{其他} \end{cases}, \forall a \in A \quad (3)$$

式中, $p_a^{\min}$ 和 $p_a^{\max}$ 分别为第 a 台可调控负荷在第 h 时段消耗功率的下限和上限。

1.2.2 储能模型

1) 状态约束

储能设备同一时段不能同时充放电^[21],即满足:

$$\begin{aligned} \delta_{b,c}^h + \delta_{b,d}^h &\leq 1, \delta_{b,c}^h, \delta_{b,d}^h \in \{0, 1\}, \\ \forall b \in B, h \in H \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $\delta_{b,c}^h$ 和 $\delta_{b,d}^h$ 分别为第 b 个储能设备在第 h 时段的充电和放电状态; B 为储能设备集合, $B = \{1, 2, \dots, N_b\}$, N_b 为储能数量。

2) 功率上下限约束

储能充放电功率需在允许范围内,即:

$$\begin{cases} 0 \leq p_{b,c}^h \leq \delta_{b,c}^h p_{b,c}^{\max} \\ 0 \leq p_{b,d}^h \leq \delta_{b,d}^h p_{b,d}^{\max} \end{cases}, \forall b \in B, h \in H \quad (5)$$

式中, $p_{b,c}^h$ 和 $p_{b,d}^h$ 分别为第 b 个储能设备在第 h 时段的充电和放电功率, $p_{b,c}^{\max}$ 和 $p_{b,d}^{\max}$ 分别为第 b 个储能设备充电和放电的最大功率。

3) 能量及其上下限约束^[22]

每台智能设备在 h 时段内需满足以下能量约束:

$$\begin{aligned} e_b^{\min} \leq e_b^0 + \sum_{t=1}^h \left(n_b^c p_{b,c}^t - \frac{p_{b,d}^t}{n_b^d} \right) &\leq e_b^{\max}, \\ \forall b \in B, h \in H \end{aligned} \quad (6)$$

式中, e_b^0 为第 b 个储能设备初始的能量, n_b^c 和 n_b^d 分别为第 b 个储能设备充电和放电效率, $p_{b,c}^t$ 和 $p_{b,d}^t$ 分别为第 b 个储能设备在第 h 时段之前的 t 时段的充电和放电功率。

1.2.3 系统功率约束

1) 用户侧功率供需平衡。即:

$$p_0^h + \sum_{a \in A} p_a^h + \sum_{b \in B} p_{b,c}^h = \sum_{b \in B} p_{b,d}^h + g^h, \forall h \in H \quad (7)$$

式中, p_0^h 为不可控负荷在第 h 时段功率, g^h 为第 h 时段购电功率。

2) 购电功率上下限约束

系统向上级电网购买功率需满足以下约束:

$$0 \leq g^h \leq g^{\max}, \forall h \in H \quad (8)$$

式中, $g^{\max}$ 为用户购电功率 g^h 的上限。

将式(7)进行处理,即:

$$0 \leq p_0^h + \sum_{a \in A} p_a^h + \sum_{b \in B} p_{b,c}^h - \sum_{b \in B} p_{b,d}^h \leq g^{\max}, h \in H \quad (9)$$

1.3 目标函数

为综合考虑用户的利益和意愿,以用户侧向电网的购电费用、用户的不满意度费用^[23]和储能的损耗费用^[24]之和的最小作为目标函数。为更加准确地体现调度结果的合理性,同时更全面地反映用户的意愿,本文引入不满意度费用,并通过调度结果与用户期望的偏差程度定量。集中式优化调度模型为:

$$\begin{aligned} \min_{p_l, \partial, p_s} F(p_l, \partial, p_s) = & \sum_{h \in H} c^h g^h + \\ & \sum_{h \in H} \sum_{a \in A} \omega_a^h (p_a^h - \bar{p}_a^h)^2 + \sum_{h \in H} \sum_{b \in B} (r_{b,c} p_{b,c}^h + r_{b,d} p_{b,d}^h) \\ \text{s.t. 式 (1)、(3) ~ (7)、(9)} \end{aligned} \quad (10)$$

式中, c^h 为电网在 h 时段售电的分时电价, ω_a^h 为用户对于第 a 台可控负荷在第 h 时段的单位不满意度费用, $\bar{p}_a^h$ 为第 a 台可控负荷在第 h 时段的期望功率, $r_{b,c}$ 和 $r_{b,d}$ 分别为单位充电损耗费用和单位放电损耗费用, p_l 为可控设备消耗功率集合, ∂ 为储能充放电状态集合, p_s 为储能充放电功率集合。

2 分散式优化模型

上述集中式优化模型采用传统优化方法难以直接求解且计算效率较低,因此,采用拉格朗日对偶松弛法和 Benders 分解法进行混合分散求解,提高计算精度以及效率。

2.1 分散式优化框架

图2为本文的分散式优化框架。与图1相比,分散式优化框架增加了本地控制器(local controller, LC)。LC可作为可控负荷及储能的能量调度单元,统计每个可控负荷和每个储能信息,并单独优化调度可控负荷和储能。

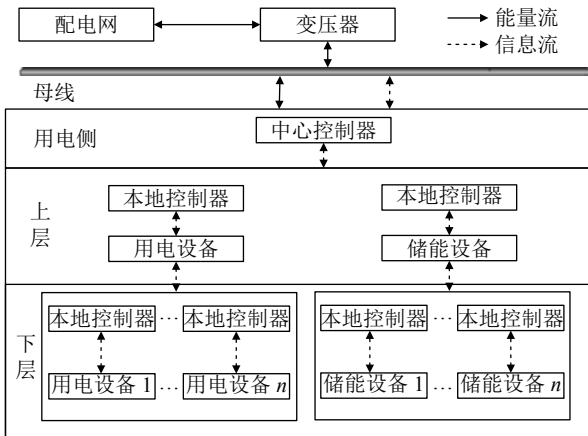


图2 混合分散式调度框架图

Fig. 2 Hybrid decentralized scheduling framework

分散式优化框架包括上下两层,其结构分别为上层分解协调和下层分散优化。上层中,采用拉格朗

日松弛法将用户侧集中式优化模型即式(10)分解为两个子问题,两个子问题分别对应于可控负荷的调度和储能设备的调度。下层中,分别采用内点法和 Benders 分解法对这两个子问题进行求解,得到每个可控负荷和每个储能设备的优化调度方案。下层中,各设备的优化调度方案分别传至上层验证是否满足实际情况。若调度结果不符合式(9),则将验证结果传递至下层,下层继续求解;若验证通过,上层直接下达调令使各设备执行。

2.2 上层分解协调过程

对可控负荷和储能设备的优化调度去耦合约束式(9)涉及可控负荷和储能之间的耦合约束,故将该约束乘以拉格朗日乘子,以惩罚项的形式加入原目标函数中并进行简化,得到原问题式(10)的拉格朗日松弛问题:

$$\begin{aligned} L(p_l, \partial, p_s) = & F(p_l, \partial, p_s) + \\ & \sum_{h \in H} \lambda^h \left(p_0^h + \sum_{a \in A} p_a^h + \sum_{b \in B} p_{b,c}^h - \sum_{b \in B} p_{b,d}^h - g^{\max} \right) + \\ & \sum_{h \in H} \mu^h \left(-p_0^h - \sum_{a \in A} p_a^h - \sum_{b \in B} p_{b,c}^h + \sum_{b \in B} p_{b,d}^h \right) = \\ & \sum_{h \in H} \sum_{a \in A} [(c^h + \lambda^h - \mu^h) p_a^h + \omega_a^h (p_a^h - \bar{p}_a^h)^2] + \\ & \sum_{h \in H} \sum_{b \in B} [m_b^h p_{b,c}^h + t_b^h p_{b,d}^h] + \tau \end{aligned} \quad (11)$$

式中: m_b^h 和 t_b^h 分别为模型转化后第 b 个设备充电功率和放电功率系数, $m_b^h = c^h + \lambda^h - \mu^h + r_{b,c}$, $t_b^h = -c^h - \lambda^h - \mu^h + r_{b,d}$; τ 为常数, $\tau = \sum_{h \in H} [(c^h + \lambda^h - \mu^h) p_0^h - \lambda^h g^{\max}]$; λ 和 μ 均为拉格朗日乘子, $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_J) \geq 0$, $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_J) \geq 0$ 。

显而易见,可将以上拉格朗日松弛问题式(11)分解为两个子问题:

1) 可控负荷调度子问题,如式(12)所示:

$$\min_{p_l} L_1(p_l, \lambda, \mu) = \sum_{h \in H} \sum_{a \in A} [(c^h + \lambda^h - \mu^h) p_a^h + \omega_a^h (p_a^h - \bar{p}_a^h)^2] \quad (12)$$

2) 储能调度子问题,如式(13)所示:

$$\min_{\partial, p_s} L_2(\partial, p_s, \lambda, \mu) = \sum_{h \in H} \sum_{b \in B} [m_b^h p_{b,c}^h + t_b^h p_{b,d}^h] \quad (13)$$

式(11)分解后,剩余项如式(14)所示:

$$\tau(\lambda, \mu) = \sum_{h \in H} [(c^h + \lambda^h - \mu^h) p_0^h - \lambda^h g^{\max}] \quad (14)$$

当 λ 和 μ 确定时,式(14)作为常数项返回到式(11)的对偶问题迭代求解。将松弛函数中的 λ 和 μ 看成变

量,式(11)的对偶问题的表达式为:

$$D(\lambda, \mu) = \max_{\lambda, \mu} [\min_{p_1} L_1(p_1, \lambda, \mu) + \min_{\partial, p_s} L_2(\partial, p_s, \lambda, \mu) + \tau] \quad (15)$$

将对偶问题式(15)的最优值 D 作为下界,原问题式(10)的最优值 F 作为上界,且迭代过程中 $D < F$ 恒成立,根据 D 与 F 差值判断是否收敛^[25]。根据拉格朗日乘子并行计算各子问题的内部变量 p_1 、 ∂ 、 p_s ,并将决策变量 ∂ 、 p_1 、 p_s 和 λ 、 μ 的值代入式(10)和(15),若对偶间隙满足精度 ε ,即 $(F - D)/D < \varepsilon$,且原问题的耦合条件式(9)成立,则判定已收敛,迭代结束,可近似将下界值认为是原问题式(10)的最优解。若以上的任一条件不满足,则此时不收敛,更新乘子重新迭代计算,直至式(9)成立且对偶间隙满足精度条件时迭代才结束。

采用次梯度法^[17]对拉格朗日乘子进行更新:

$$\begin{cases} \lambda(k+1) = \lambda(k) + y_\lambda(k) \frac{s_\lambda(k)}{\|s_\lambda(k)\|_1}, \\ \mu(k+1) = \mu(k) + y_\mu(k) \frac{s_\mu(k)}{\|s_\mu(k)\|_1} \end{cases} \quad (16)$$

式中, y_λ 和 y_μ 分别为 λ 和 μ 的迭代步长, $s_\lambda = [s_\lambda^1, s_\lambda^2, \dots, s_\lambda^J]$ 和 $s_\mu = [s_\mu^1, s_\mu^2, \dots, s_\mu^J]$ 分别为 λ 和 μ 的次梯度, $\|s_\lambda(k)\|_1$ 和 $\|s_\mu(k)\|_1$ 分别为 $s_\lambda(k)$ 和 $s_\mu(k)$ 的1范数。

$s_\lambda(k)$ 和 $s_\mu(k)$ 的更新公式为:

$$\begin{cases} s_\lambda^h(k+1) = p_0^h + \sum_{a \in A} p_a^h(k) + \sum_{b \in B} p_{b,c}^h(k) - \sum_{b \in B} p_{b,d}^h(k) - g^{\max}, \\ s_\mu^h(k+1) = -p_0^h - \sum_{a \in A} p_a^h(k) - \sum_{b \in B} p_{b,c}^h(k) + \sum_{b \in B} p_{b,d}^h(k) \end{cases} \quad (17)$$

迭代步长为 $y_\lambda(k) = 1/(f_\lambda + e_\lambda k)$, $y_\mu(k) = 1/(f_\mu + e_\mu k)$,其中, f_λ 、 e_λ 、 f_μ 和 e_μ 均为常数且为合适的值时,收敛速度更快。

2.3 下层分散优化过程

2.3.1 各可控负荷的优化调度

式(12)可进一步分解为 N_a 个子问题:

$$\begin{aligned} \min_{p_a} L_{1a}(p_a, \lambda, \mu) &= \sum_{h \in H} [(c^h + \lambda^h - \mu^h) p_a^h + \omega_a^h (p_a^h - \bar{p}_a^h)^2], a \in A \\ \text{s.t. 式(1)、(3)} \end{aligned} \quad (18)$$

使用内点法^[18]求解由式(18)表示的优化问题,构造惩罚函数:

$$\begin{aligned} \psi(p_{a1}, \lambda, \mu, r^{(i)}) &= L_{1a}(p_{a1}, \lambda, \mu) - r^{(i)} \left[\frac{1}{E_a - \sum_{h \in H} p_a^h} + \frac{1}{p_a^h - p_a^{\max}} + \frac{1}{p_a^{\min} - p_a^h} \right], \\ \forall a \in A, h \in H_a \end{aligned} \quad (19)$$

式中: p_{a1} 为第 a 个可控负荷在可调度时间段 H_a 内各时段吸收功率的集合; $r^{(i)}$ 为惩罚因子,是递减的正数序列; i 为迭代次数。

采用内点法^[18]迭代求解的流程如图3所示。

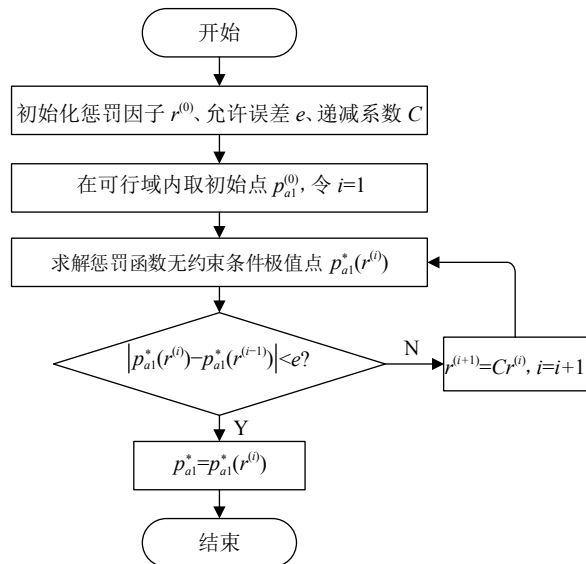


图3 内点法流程图

Fig. 3 Internal point method flowchart

2.3.2 各储能的优化调度

同样地,可将式(13)分解为 N_b 个子问题:

$$\begin{aligned} \min_{\partial_b, p_b} L_{2b}(\partial_b, p_b, \lambda, \mu) &= \sum_{h \in H} (m_b^h p_{b,c}^h + t_b^h p_{b,d}^h) \\ \text{s.t. 式(4)、(6)}, b \in B \end{aligned} \quad (20)$$

式中,式(4)为整数变量约束,式(5)为整数变量和连续变量耦合约束,式(6)为连续变量约束。问题式(20)可采用广义Benders^[26]分解法迭代求解,则可将式(20)分解为主问题式(21)和子问题式(22),分别如下:

1) 主问题数学形式为:

$$\begin{aligned} L_{2b, \text{lower}} &= \min_{\partial_b} L_{2b} \\ \text{s.t. 式(4)、可行割约束、不可行割约束} \end{aligned} \quad (21)$$

2) 子问题数学形式为:

$$\begin{aligned} L_{2b, \text{upper}} &= \min_{p_b} L_{2b} \\ \text{s.t. 式(5)、(6)} \end{aligned} \quad (22)$$

将主问题的最优解作为下界,子问题的最优解作为上界。采用广义Benders分解法求解储能调度问题的具体步骤如下:

步骤1: 初始化原储能调度问题的上界、下界及储能充放电状态变量 ∂_b 的值。

步骤2: 求解松弛主问题式(21), 求解得到储能充放电状态变量 ∂_b 的值, 并更新下界。

步骤3: 将储能充放电状态变量 ∂_b 的值代入求解子问题式(22)。根据强对偶定理, 通过求解子问题的对偶问题求解连续型决策变量的值。子问题的对偶问题在第 k 次迭代时的数学形式推导如下:

将式(5)和(6)以惩罚项的形式加入原目标函数, 则子问题的拉格朗日松弛问题为:

$$L_{2b}(\alpha, \beta, \chi, \delta) = \sum_{h \in H} (m_b^h p_{b,c}^h + t_b^h p_{b,c}^h) + \alpha^h [p_{b,c}^h - \partial_{b,c}^h p_{b,c}^{\max}] + \beta^h [p_{b,d}^h - \partial_{b,d}^h p_{b,d}^{\max}] + \chi^h \left[e_b^0 + \sum_{t=1}^h \left(n_b^c p_{b,c}^t - \frac{p_{b,d}^t}{n_b^d} \right) - e_b^{\max} \right] + \delta^h \left[e_b^{\min} - e_b^0 - \sum_{t=1}^h \left(n_b^c p_{b,c}^t - \frac{p_{b,d}^t}{n_b^d} \right) \right] \quad (23)$$

由级数性质得:

$$\sum_{h \in H} \left[(\chi^h - \delta^h) \sum_{t=1}^h \left(n_b^c p_{b,c}^t - \frac{p_{b,d}^t}{n_b^d} \right) \right] = \sum_{h \in H} \left[\left(n_b^c p_{b,c}^h - \frac{p_{b,d}^h}{n_b^d} \right) \sum_{t=h}^H (\chi^t - \delta^t) \right] \quad (24)$$

对式(23)进行处理得:

$$L_{2b}(\alpha, \beta, \chi, \delta) = \sum_{h \in H} \left[(m_b^h + \alpha^h + n_b^c \sum_{t=h}^H (\chi^t - \delta^t)) p_{b,c}^h + \sum_{h \in H} \left[(t_b^h + \beta^h + \frac{1}{n_b^d} \sum_{t=h}^H (\chi^t - \delta^t)) p_{b,d}^h + \sum_{h \in H} [-\partial_{b,c}^h p_{b,c}^{\max} \alpha^h - \partial_{b,d}^h p_{b,d}^{\max} \beta^h + \chi^h (e_b^0 - e_b^{\max}) + \delta^h (e_b^{\min} - e_b^0)] \right] \quad (25)$$

由式(23)可得函数 L_{2b} 的对偶问题形式如下:

$$\begin{aligned} \max_{\alpha, \beta, \chi, \delta} Y_{2b} &= \sum_{h \in H} [-\partial_{b,c}^h p_{b,c}^{\max} \alpha^h - \partial_{b,d}^h p_{b,d}^{\max} \beta^h + (e_b^0 - e_b^{\max}) \chi^h + (e_b^{\min} - e_b^0) \delta^h] \\ \text{s.t. } m_b^h + \alpha^h + n_b^c \sum_{t=h}^H (\chi^t - \delta^t) &\geq 0, \\ t_b^h + \beta^h - \frac{1}{n_b^d} \sum_{t=h}^H (\chi^t - \delta^t) &\geq 0, \\ \alpha^h, \beta^h, \chi^h, \delta^h &\geq 0, \forall b \in B \end{aligned} \quad (26)$$

式中, Y_{2b} 为函数 L_{2b} 的对偶函数, α 、 β 、 χ 、 δ 对应于式(5)和(6)中的拉格朗日乘子。

对偶问题的解有3种情况:

1) 对偶问题无可行解, 则原问题无最优解, 即该

模型可行域为空集。

2) 对偶问题有最优解, 求解得到各拉格朗日乘子的值, 则返回可行割约束式(27)到主问题求解, 并更新上界。

$$L_{2b} \geq \sum_{h \in H} [-\partial_{b,c}^h p_{b,c}^{\max} \alpha^h - \partial_{b,d}^h p_{b,d}^{\max} \beta^h + (e_b^0 - e_b^{\max}) \chi^h + (e_b^{\min} - e_b^0) \delta^h], \forall b \in B \quad (27)$$

3) 对偶问题存在无界最优解, 则返回不可行割约束式(28)到主问题求解, 并更新上界。

$$0 \geq \sum_{h \in H} [-\partial_{b,c}^h p_{b,c}^{\max} \alpha^h - \partial_{b,d}^h p_{b,d}^{\max} \beta^h + (e_b^0 - e_b^{\max}) \chi^h + (e_b^{\min} - e_b^0) \delta^h], \forall b \in B \quad (28)$$

步骤4: 若上界与下界之差小于误差精度, 则原问题收敛, 达到最优解并跳出循环; 否则, 返回到步骤2继续求解。

2.4 算法流程

本文所述解决大规模用电设备和储能联合调度的算法流程如图4所示。

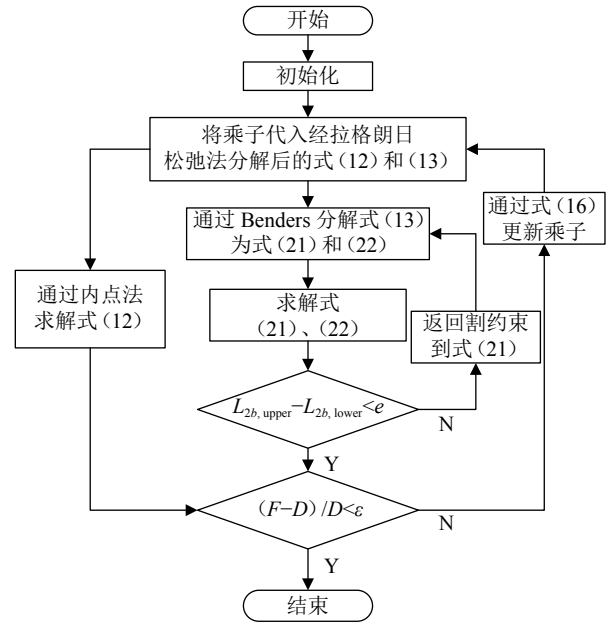


图 4 算法流程图

Fig. 4 Algorithm flowchart

3 算例分析

3.1 基础数据

本文取 ΔT 为1 h, 采用实际用电设备和储能数据进行计算, 以5台用电设备和1台储能设备验证结论有效性, 其中, 用电设备和储能的参数值如表1和2所示。

系统从电网购电电价和各时刻的不可转移负荷功率如图5所示。

表 1 用电设备参数

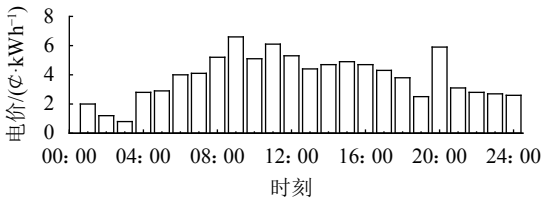
Tab. 1 Electrical equipment parameters

用电设备	参数					
	$T_{j,a}/\text{h}$	$T_{d,a}/\text{h}$	E_a/kWh	$P_a^{\max}/\text{kW}$	$P_a^{\min}/\text{kW}$	ω_a
1	1	23	18.00	1.0	0.5	0.036
2	4	11	16.00	2.5	1.0	0.072
3	17	21	8.00	2.0	1.0	0.036
4	11	15	8.75	2.0	1.5	0.036
5	14	19	5.00	1.5	0	0.072

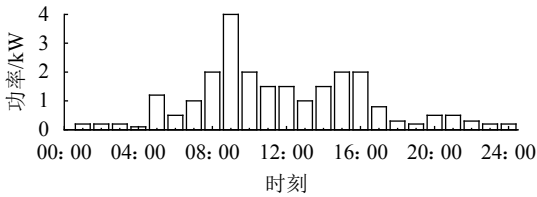
表 2 储能设备参数

Tab. 2 Parameters of ES equipment

参数	数值	参数	数值
$e_b^{\min}/\text{kWh}$	1.776	$p_{b,d}^{\min}/\text{kW}$	1.770
$e_b^{\max}/\text{kWh}$	7.548	n_b^c	0.839
e_b^0/kWh	1.776	n_b^d	0.764
$P_{b,c}^{\max}/\text{kW}$	1.320		



(a) 分时电价



(b) 不可控负荷功率

图 5 分时电价和不可转移负荷功率

Fig. 5 Time-of-use electricity price and nontransferable load power

3.2 仿真结果

3.2.1 不同调度策略对比

利用第1.3节的集中式优化算法和本文所提混合分散式优化算法进行联合调度优化所得目标值如表3所示。

表 3 不同策略优化目标值

Tab. 3 Optimizing target values for different strategies

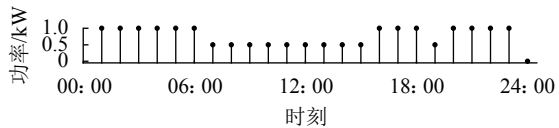
算法	购电费用/元	不满意度费用/元	储能损耗费用/元
本文算法	324.741 3	9.905 3	5.860 0
集中式优化	323.788 8	9.907 3	6.782 7

由表3可见,在使用本文所提混合分散式优化算法和集中式优化算法进行联合调度时,两种调度方式在购电费用、用电的不满意度费用和储能损耗费

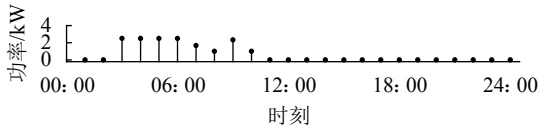
用的优化值基本相等,表明本文所提算法能近似代替集中式优化算法。

3.2.2 联合调度分散式优化结果

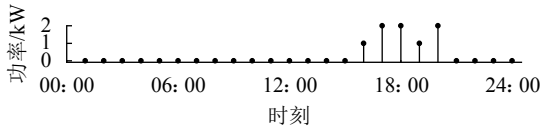
用电设备的调度结果如图6所示。



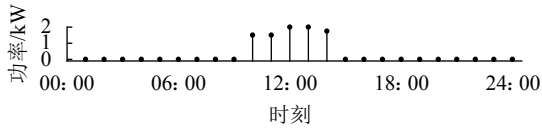
(a) 设备 1



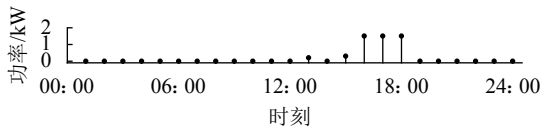
(b) 设备 2



(c) 设备 3



(d) 设备 4



(e) 设备 5

图 6 用电设备调度结果

Fig. 6 Power equipment scheduling results

由图6可见,设备的调度结果及时响应分时电价,在09:00、11:00和20:00这3个时刻电价较高时,由于设备放电功率的限制,部分负荷转移到其他电价相对较低的时刻。在设备的允许调度时段内,相应设备直接从电网购电的时间段主要分布在电价较低的时段,保证了经济性。

储能各时刻的充放电功率及储能各时刻存储的能量如图7所示。由图7中柱状图可见:在01:00—05:00时段内,电价较低,储能在该时段充电后能量达到能量上额;在09:00、11:00时,电价较高,储能设备进行放电,供电给用电设备;19:00受储能荷电状态的限制,由于此时电价较低,储能进行充电,功率至上限;在20:00,电价较高,储能放电提供电能给用电设备;在20:00之后时刻,由于电价较低以及考虑储能运行约束,储能达到静止状态。由图7中点线图可见,储能设备在电价低时进行充电,电价较高时进行放电,对分时电价响应程度大,削峰填谷效果较好。

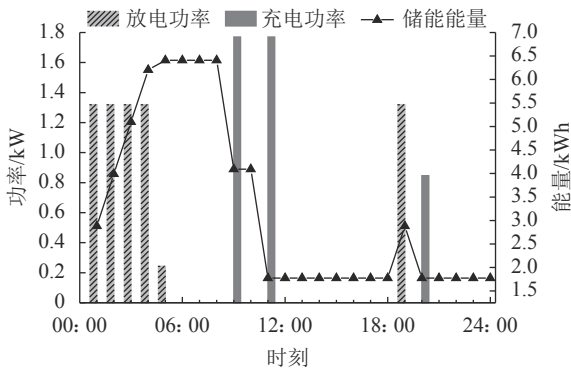


图 7 储能充放电功率和存储能量

Fig. 7 Storage charge and discharge power and stored energy

3.2.3 算法计算效率对比

随着用电设备和储能设备的数量增加,决策变量的数量也随之增加,分别使用第1.3节的集中式优化算法和本文所提的混合分散式优化算法进行求解时所花费时间的对数lg(time)以及使用本文算法的迭代次数如图8所示。

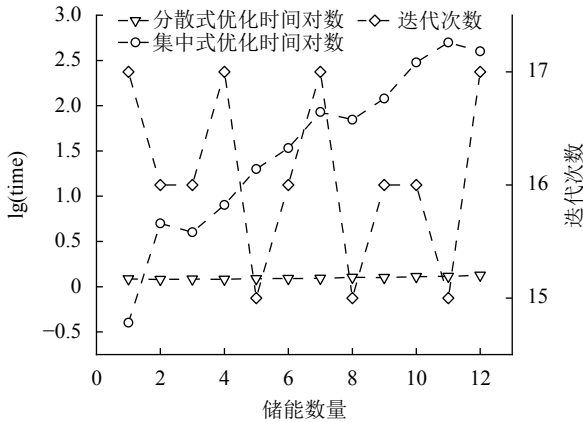


图 8 算法优化时间和迭代次数

Fig. 8 Algorithm optimization time and number of iterations

由图8可知,随着用电设备和储能设备数量的增加,使用集中式优化算法进行联合调度时,时间复杂度高,计算效率低;使用本文所提分散式优化算法进行联合调度时,随着设备的增加,控制变量大幅增加,迭代次数基本稳定在16次左右,优化时间也在1.3 s左右波动,计算效率较高,时间复杂度降低。因此,验证了本文所提算法的有效性以及可扩展性,同时具有计算效率高的优点。

4 结 论

本文主要研究了基于拉格朗日对偶松弛法和Benders分解法的混合分散式优化方法在大规模用电设备和储能联合优化调度问题中的应用。该问题的数学模型是一个含高维变量、多目标和多约束且难于求解的非线性集中式优化模型。首先,采用拉格朗

日松弛法将其分解为两个子问题;然后,分散为各个用电设备和储能的调度问题;最后,分别利用内点法和Benders分解法并行迭代求解。仿真表明,所提混合分散式优化方法与集中式优化方法相比,有较高的计算效率和较低的时间复杂度,并且不受用电设备和储能调度规模的影响,适用于大规模用电设备与储能的联合调度和实时调度。

售电电价策略对用电设备和储能调度产生直接影响。因此,下一步将研究如何制定合适的电价策略,使配网层收益、用户层满意度和储能端损耗达到较好的平衡,实现共赢。目前,随着分布式电源(distributed generation, DG)渗透率的不断提高, DG的影响越来越大,今后可在本文模型及方法的基础上结合多类型DG和负荷(包括电动汽车等主动负荷),实现用户侧能量优化管理。

参考文献:

- [1] Bai Yang,Xie Le,Xia Qing,et al.Institutional design of Chinese retail electricity market reform and related suggestions[J].Automation of Electric Power Systems,2015,39(14): 1-7.[白杨,谢乐,夏清,等.中国推进售电侧市场化的制度设计与建议[J].电力系统自动化,2015,39(14):1-7.]
- [2] Li Zuofeng,Chen Zhenyu.The exploration and practice of Jiangsu power demand response[J].Power Demand Side Management,2018,20(1):4-8.[李作锋,陈振宇.江苏电力需求响应的探索和实践[J].电力需求侧管理,2018,20(1): 4-8.]
- [3] di Giorgio A,Pimpinella L,Liberati F.A model predictive control approach to the load shifting problem in a household equipped with an energy storage unit[C]//Proceedings of the 2012 20th Mediterranean Conference on Control & Automation(MED).Barcelona:IEEE,2012:1491-1498.
- [4] Wang Shouxiang,Sun Zhiqing,Liu Zhe.Co-scheduling strategy of home energy for smart power utilization[J].Automation of Electric Power Systems,2015,39(17):108-113.[王守相,孙智卿,刘喆.面向智能用电的家庭能量协同调度策略[J].电力系统自动化,2015,39(17):108-113.]
- [5] Zhang Yusen,Kong Xiangyu,Sun Bowei,et al.Multi-time scale home energy management strategy based on electricity demand response[J].Power System Technology,2018, 42(6):1811-1819.[张禹森,孔祥玉,孙博伟,等.基于电力需求响应的多时间尺度家庭能量管理优化策略[J].电网技术,2018,42(6):1811-1819.]
- [6] Wu Huicheng,Wang Chun,Zuo Yuanlong,et al.Home energy system optimization based on time-of-use price and real-time control strategy of battery[J].Power System Protection and Control,2019,47(19):23-30.[伍惠铨,王淳,左远龙,等.基于分时电价和蓄电池实时控制策略的家庭能量系统优化[J].电力系统保护与控制,2019,47(19):23-30.]
- [7] Yao Gang,Mao Zhongdong,Zhou Lidan,et al.Home energy management strategy for co-scheduling of electric vehicle and energy storage device[J].Proceedings of the CSU-EPSA, 2020,32(4):35-41.[姚钢,茆中栋,周荔丹,等.协同调度电动

- 汽车与储能装置的家庭能量管理策略[J].[电力系统及其自动化学报](#),2020,32(4):35–41.]
- [8] Chen Chen,Wang Jianhui,Heo Y,et al.MPC-based appliance scheduling for residential building energy management controller[J].[IEEE Transactions on Smart Grid](#),2013,4(3):1401–1410.
- [9] Shi Xuntao,Lei Jinyong,Huang Andi,et al.An energy management algorithm of PV-assisted smart building based on offline optimization and online decision[J].[Electric Power](#),2019,52(10):123–131.[史训涛,雷金勇,黄安迪,等.基于离线优化和在线决策的光伏智能楼宇能量管理算法[J].[中国电力](#),2019,52(10):123–131.]
- [10] Ju Mingyuan.Intelligent electricity consumption strategy based on photovoltaic power supply[D].Jinan:Shandong Jianzhu University,2018.[鞠明远.基于光伏供电的智能楼宇用电策略[D].济南:山东建筑大学,2018.]
- [11] Zhou Jun,Li Jiawang,Ma Hongjun,et al.Distributed optimal scheduling for smart building clusters considering peer-to-peer electric energy sharing[J].[Electric Power Automation Equipment](#),2021,41(10):113–121.[周军,李佳旺,马鸿君,等.考虑点对点电能共享的智能楼宇群分布式优化调度[J].[电力自动化设备](#),2021,41(10):113–121.]
- [12] Yang Zhao,Ai Xin.Distributed optimal scheduling for integrated energy building clusters considering energy sharing[J].[Power System Technology](#),2020,44(10):3769–3778.[杨昭,艾欣.考虑电能共享的综合能源楼宇群分布式优化调度[J].[电网技术](#),2020,44(10):3769–3778.]
- [13] Yang Qingrun,Li Cheng,Ding Tao,et al.Fully distributed dynamic economical dispatching method for power system based on alternating direction multiplier method[J].[Control Theory & Applications](#),2018,35(5):709–716.[杨青润,李澄,丁涛,等.基于交替方向乘子法的电力系统完全分布式动态经济调度方法[J].[控制理论与应用](#),2018,35(5):709–716.]
- [14] Fan Zhong.A distributed demand response algorithm and its application to PHEV charging in smart grids[J].[IEEE Transactions on Smart Grid](#),2012,3(3):1280–1290.
- [15] Wu Jiechen.Research on optimal scheduling model and method for aggregated prosumers based on transactive energy mechanism[D].Beijing:North China Electric Power University,2020.[吴界辰.交互能源机制下的集群产消者优化调度模型与方法研究[D].北京:华北电力大学,2020.]
- [16] Wang Zhangyao.Researching on modeling and coordinative optimization of distributed integrated energy demand response[D].Changsha:Hunan University,2019.[汪樟垚.分布式综合能源需求响应建模与协同优化方法研究[D].长沙:湖南大学,2019.]
- [17] Cheng Shan,Wei Zhaobin,Zhao Zikai,et al.Decentralized optimization of ordered charging and discharging for charging-storage station considering spatial-temporal access randomness of electric vehicles[J].[Electric Power Automation Equipment](#),2021,41(6):28–35.[程杉,魏昭彬,赵子凯,等.考虑电动汽车时空接入随机性的充电站有序充放电分散式优化[J].[电力自动化设备](#),2021,41(6):28–35.]
- [18] Boyd S,Vandenberghe L.Convex optimization[M].Cambridge:Cambridge University Press,2004.
- [19] Shahidehpoor M,Fu Yong,Benders decomposition:Applying Benders decomposition to power systems[J].[IEEE Power and Energy Magazine](#),2005,3(2):20–21.
- [20] Mohsenian-Rad A H,Leon-Garcia A.Optimal residential load control with price prediction in real-time electricity pricing environments[J].[IEEE Transactions on Smart Grid](#),2010,1(2):120–133.
- [21] Zhang Jianglin,Zhuang Huimin,Liu Junyong,et al.Multi-objective optimal operation scheme based on CS-PSO algorithm of battery energy storage system[J].[Advanced Engineering Sciences](#),2018,50(4):193–200.[张江林,庄慧敏,刘俊勇,等.基于CS-PSO算法的电池储能系统多目标优化运行策略[J].[工程科学与技术](#),2018,50(4):193–200.]
- [22] 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.[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.]
- [23] Jiang Libin,Low S.Multi-period optimal energy procurement and demand response in smart grid with uncertain supply[C]//[Proceedings of the 2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference.Orlando:IEEE](#),2011:4348–4353.
- [24] Hopkins M D,Pahwa A,Easton T.Intelligent dispatch for distributed renewable resources[J].[IEEE Transactions on Smart Grid](#),2012,3(2):1047–1054.
- [25] Luo Tian,Wang Keyou,Li Guojie,et al.Reactive power optimization in multi-area VSC-HVDC interconnected power grids based on Lagrangian dual relaxation[J].[Automation of Electric Power Systems](#),2019,43(11):68–76.[罗天,汪可友,李国杰,等.基于拉格朗日对偶松弛的多区域柔性直流互联电网无功优化[J].[电力系统自动化](#),2019,43(11):68–76.]
- [26] Yang Yanhong,Pei Wei,Qu Hui,et al.A planning method of distributed combined heat and power generator based on generalized benders decomposition[J].[Automation of Electric Power Systems](#),2014,38(12):27–33.[杨艳红,裴玮,屈慧,等.基于广义Benders分解的分布式热电联供机组规划方法[J].[电力系统自动化](#),2014,38(12):27–33.]

(编辑 赵 婧)

引用格式: Cheng Shan,Shang Dongdong,Dai Jiang,et al.Hybrid decentralized optimization of dispatching electrical units with consideration of demand-side response[J].[Advanced Engineering Sciences](#),2021,53(6):235–243.[程杉,尚冬冬,代江,等.考虑需求侧响应的电气设备调度混合分散式优化[J].[工程科学与技术](#),2021,53(6):235–243.]