

面向高比例新能源电网的重大耗能企业需求响应调度

李远征¹ 倪质先² 段钧韬¹ 徐磊³ 杨涛³ 曾志刚¹

摘要 随着国家“双碳”重大战略的提出,高比例新能源并网将成为我国电力能源转型的重要态势.针对火电机组、配电网和需求侧关联的系列运行约束制约了电网对高比例新能源的有效消纳这一问题,本文提出重大耗能企业这一主要电力负荷参与网需求响应(Demand response, DR)的研究思路,通过重大耗能企业与电网协调调度促进新能源消纳,并获得经济补偿以减少运行成本.研究首先基于混合需求侧响应机制,提出以重大耗能企业、新能源、火电机组为核心的协调调度方法,并根据新能源预测值-预测误差的信息依存顺序提出了两步调度策略.在此基础上,进行生产过程行为建模以实现重大耗能企业需求侧响应决策描述,并建立高比例新能源并网的重大耗能企业需求响应与电网协调调度优化模型.最后,基于烟台电网实际系统进行算例分析,验证了重大耗能企业通过需求响应参与电网协调调度以及两步调度策略的有效性.

关键词 重大耗能企业,需求侧响应,新能源并网,协调调度,生产调度

引用格式 李远征,倪质先,段钧韬,徐磊,杨涛,曾志刚.面向高比例新能源电网的重大耗能企业需求响应调度.自动化学报,2023,49(4):754-768

DOI 10.16383/j.aas.c220034

Demand Response Scheduling of Major Energy-consuming Enterprises Based on a High Proportion of Renewable Energy Power Grid

LI Yuan-Zheng¹ NI Zhi-Xian² DUAN Jun-Tao¹ XU Lei³ YANG Tao³ ZENG Zhi-Gang¹

Abstract With the proposal of the national “double carbon” major strategy, the high proportion of renewable energy grid-connection becomes an important trend of China’s power energy transformation. However, a number of operational constraints related to thermal power units, distribution networks and demand sides limit the efficient absorption of renewable energy. This paper considers the idea in which major energy-consuming enterprises, the main power load, participate in the grid demand response (DR), promotes renewable energy consumption through coordinated scheduling between major energy-consuming enterprises and the power grid, and obtains economic compensation to reduce operating costs. Based on a hybrid demand-side response mechanism, this paper proposes a coordinated scheduling method with the major energy-consuming enterprises, renewable energy and thermal power units as the core. After that, a two-step scheduling strategy is proposed according to the information dependence order of the forecast value and forecast error of renewable energy. On this basis, the production process behavior modelling is carried out to realize the description of the demand response of major energy-consuming enterprises, and the optimization model of the demand response and grid coordination scheduling of major energy-consuming enterprises with a high proportion of renewable energy grid-connection is established. Finally, an example analysis is carried out based on the actual system power grid system in Yantai, which verifies the effectiveness of the major energy-consuming enterprises participating in the coordination scheduling of the power grid through demand response and the two-step dispatch strategy.

Key words Major energy-consuming enterprises, demand response (DR), renewable energy grid-connection, coordination scheduling, production dispatch

Citation Li Yuan-Zheng, Ni Zhi-Xian, Duan Jun-Tao, Xu Lei, Yang Tao, Zeng Zhi-Gang. Demand response scheduling of major energy-consuming enterprises based on a high proportion of renewable energy power grid. *Acta Automatica Sinica*, 2023, 49(4): 754-768

收稿日期 2022-01-13 录用日期 2022-05-25

Manuscript received January 13, 2022; accepted May 25, 2022

国家自然科学基金(61991403, 62133003, 62073148)资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61991403, 62133003, 62073148)

本文责任编辑 张俊

Recommended by Associate Editor ZHANG Jun

1. 华中科技大学人工智能与自动化学院图像信息处理与智能控制教育部重点实验室 武汉 430074 2. 华中科技大学中欧清洁与

可再生能源学院 武汉 430074 3. 东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室 沈阳 110819

1. School of Artificial Intelligence and Automation, Ministry of Education Key Laboratory on Image Information Processing and Intelligent Control, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074 2. China-EU Institute for Clean and Renewable Energy, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074 3. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110819

为支撑经济发展与建设制造强国,近年来我国重大耗能企业蓬勃发展,其用电量增长迅猛.据国家能源局统计,2021年上半年我国钢铁、建材、有色、化工和石化等重大耗能企业用电量占全社会电能消耗近一半,其中增长量占全社会电力需求总增量的42%^[1].这导致重大耗能企业用电成本居高不下,并逐步成为制约重大耗能企业发展的重要问题^[2-3].

随着“双碳”重大战略的提出与实施,国家鼓励重大耗能企业使用成本更低的新能源进行生产以实现节能减排,这为降低企业用电成本提供了新思路.与此同时,高比例新能源并网将成为我国电力能源转型的重要态势^[4-5].据统计,我国2018年风电累计并网装机容量已高达1.84亿千瓦,占总发电装机容量的9.7%^[6].预计在2050年达到24亿千瓦,占比高达33.8%^[7].然而,受电网运行工况以及新能源外送等因素的制约,我国弃风问题不容忽视,其中新疆、甘肃等地区弃风率居高不下^[6].由此可见,如何在火电机组发电功率、电力系统负荷以及电网潮流相关约束的制约下^[8-9],进一步提高新能源消纳量已成为大规模新能源并网中亟待解决的关键问题.

在此背景下,随着重大耗能企业智能化技术的不断进步^[10],其与含大规模新能源电网的协调调度成为解决以上问题的潜在手段.合理的协调调度既可以降低重大耗能企业用电成本,又可以提高新能源消纳水平.针对这一问题,需求侧响应(Demand response, DR)作为一种调控电网负荷的有效手段,可以驱动用户调整用电行为,从而获得经济补偿以降低自身成本,同时也可在保证用户用电需求的前提下改善新能源消纳问题^[11-12].值得注意的是,重大耗能企业是我国最大的电能用户,约占全国负荷总量的70%^[13],这意味着重大耗能企业需求侧响应在促进新能源消纳方面具有较大潜力.此外,工业信息部近年出台的《工业领域电力需求侧管理工作指南》大力鼓励工业用能单位积极开展需求侧响应,从而降低自身成本并促进新能源消纳^[14].

现有的对于需求侧响应促进新能源消纳的研究主要分为两类:

- 1) 面对电力市场中潜在的DR用户整体,根据常见的响应规律建立DR模型,在此基础上研究其对于新能源消纳的促进作用^[15-17];

- 2) 对居民和商业用户需求侧响应促进新能源消纳的研究.文献[18]构建基于价格响应的居民混合能源系统的需求响应运行和风电的日前调度模型,加强风电消纳并降低居民用电成本.文献[19]

针对居民用电,制定了主动式负荷需求响应策略,基于补偿促进居民改变自身用电量增强对于新能源的消纳.文献[20]从聚合商的角度建立了考虑供暖、通风和空调的DR模型,以平衡每小时风力发电量.文献[21]基于可再生分布式发电和需求响应制定了用户群的两阶段需求侧响应模型,通过补偿提高用户经济性,使其参与电网协调调度从而提升新能源的消纳水平.

在上述研究中,需求侧响应资源较为分散,单位容量较小,需要根据调配结合成容量较大的需求侧响应资源参与电力市场的响应计划.相比之下,重大耗能企业具有自动化程度高、总量大的特点.因此,其相比其他资源更易于实现需求侧响应^[22].但是目前这一方面的研究较少,文献[23]建立了涵盖工业、其他各类用电管理模块以及光伏发电模块的智能用电管理架构,验证了工业需求侧响应可以促进新能源的消纳并降低自身成本.文献[24]以含风电的工业微电网为研究对象,以系统运营成本最低为目标建立了含风电工业微电网的自发电经济调度双层模型,基于Benders的求解结果表明了模型可以提高风电消纳并降低工业微电网成本.此外,文献[25]研究分时定价策略对生产过程进行建模,仿真结果验证了生产企业消纳新能源的潜力.

以上研究验证了工业需求侧响应对于电网调控具有积极的作用.然而,其中大多数研究只建立了广义工业负荷模型,并没有研究重大耗能企业用户在需求侧响应过程中自身具体的生产调度行为.此外,为了满足电力系统中的功率平衡约束,源侧的火电机组出力必将随着需求侧响应而进行调整^[26-27],与其相关的约束也制约新能源的消纳,且上述工作尚未对火电机组与重大耗能企业需求侧响应之间的协调调度开展研究.

因此,本文开展以下三个方面的工作:

- 1) 基于混合需求侧响应机制建立重大耗能企业、不确定新能源、火电机组的协调调度模型,并考虑新能源不确定性提出相应的两步协调调度策略;

- 2) 建立重大耗能企业并行生产网络的行为模型,分析其潜在生产行为,进行需求侧响应决策描述;

- 3) 以重大耗能企业需求侧响应为核心,建立了风电-火电机组组合-耗能企业需求侧响应两步协调调度优化模型,最小化弃风量、发电成本和生产成本.

上述三点也是本文的创新点,基于此使用改进烟台电网进行算例分析,结果验证了重大耗能企业通过需求响应参与电网协调调度以及两步调度策略的有效性.

1 考虑新能源不确定性的两步协调调度策略

1.1 基于重大耗能企业混合需求侧响应的协调调度方法

为了实现火电机组、新能源(本文以风电为例)与重大耗能企业之间的协调调度,减少弃风量并提高重大耗能企业运行的经济性,本文所提出的调度方法示意图如图1所示.其中,主要涉及信息总线、调度总线和输电总线,调度系统通过信息总线收集风电预测信息和地区负荷信息,结合该信息制定价格型和激励型DR方案.然后,系统通过调度总线对火电机组组合,风电机组及外部备用进行调度,经过输电总线向地区负荷及重大耗能企业用户供电,并通过信息总线传递价格型和激励型DR方案,从而实现重大耗能企业的需求侧响应.

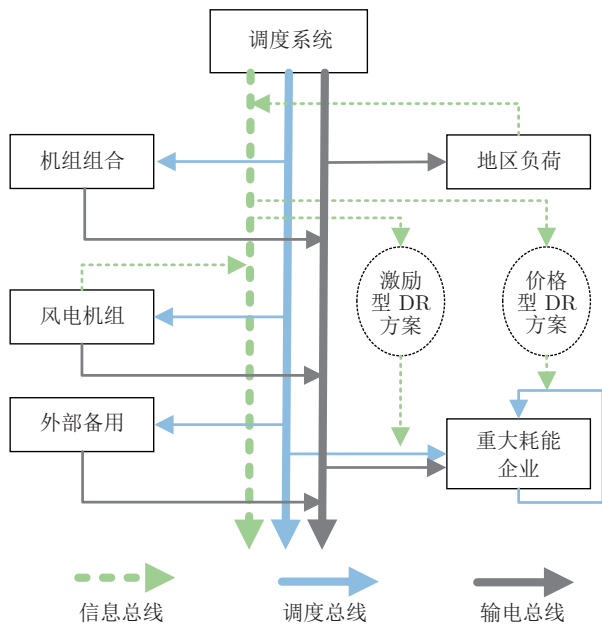


图1 基于混合需求侧响应的协调调度方法示意图
Fig.1 The chart of hybrid demand response based coordination scheduling method

值得注意的是,耗能企业与电力系统并非属于同一主体,不存在直接调度关系.因此,调度系统提供了面对重大耗能企业用户的递进式混合需求侧响应方案,以促使重大耗能企业更多地使用新能源,减少其对火电的依赖.基础方案为价格型需求侧响应,即电力系统根据日前负荷信息及预测新能源发电功率制定分时电价信息,其中新能源出力峰值电价低于出力谷值电价,负荷高峰期电价高于低峰期电价.在价格的间接调控下,用户在满足生产要求

的前提下,将用电负荷往新能源出力峰值时段靠拢,并避开用电高峰期,以最小化生产成本.在此基础上,用户自愿决定是否参加促进风电消纳的激励需求侧响应.若选择参加,用户通过调整自身的用电行为参与促进对风电的消纳将得到电网的经济补偿,从而进一步降低用电成本.

基于以上两种方案,此调度方法实现对火电机组、风电机组与重大耗能企业的协调调度,利用风电导向的混合需求侧响应计划间接调控构建以风电为主的企业用电计划,增强风电消纳能力^[28],降低重大耗能企业对于火电的需求,从而减少用电成本.

1.2 考虑风电不确定性的两步协调调度策略

在上述调度系统中,风电出力的不确定性加大了含高比例风电电网的调度策略制定难度^[22].不合理的协调策略不仅不能促进风电消纳,甚至无法满足重大耗能企业生产电力需求.详细来说,在满足电力系统中的功率平衡的前提下,若调度风电功率小于实际风电功率,系统必须弃风.反之,若调度风电功率高于实际风电功率,则代表当前发电侧功率小于供电侧负荷,重大耗能企业生产需求将无法得到满足.

为了实现重大耗能企业与不确定性风电的高效协调,基于风电不确定性中预测值-预测误差的信息依存顺序,提出两步调度策略.从而在考虑风电不确定性的情况下保证调度计划的可行性和经济性.具体流程如图2所示,第1步调度是传统的确定性日前调度,而第2步调度考虑风电的不确定性,将风功率场景集合引入,以提升调度效果.

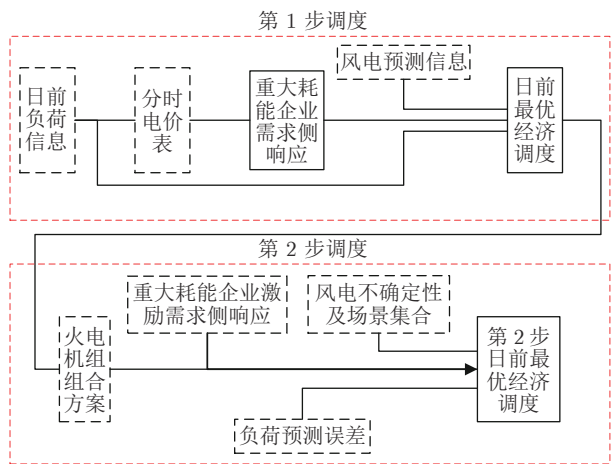


图2 两步调度策略流程图
Fig.2 Structure of stepwise scheduling

在第1步调度中,根据日前负荷信息和分时电价表,重大耗能企业用户进行价格型需求侧响应决

策, 最小化自身生产成本, 并进一步计算出重大耗能企业负荷信息. 调度系统结合预测风功率, 以发电成本为目标函数, 优化得到火电机组组合方案, 并保留足够的机组备用以供第 2 步调度针对风电预测误差进行调整.

在第 2 步调度中, 针对风电功率的预测误差进行表征采样, 并在价格需求侧响应的基础上, 根据具体风电场景为重大耗能企业提供促进风电消纳的激励需求侧响应. 重大耗能企业自愿选择是否参加. 如果参加激励需求侧响应, 则会按照风电消纳量得到经济补偿. 在此基础上, 以最小化发电成本、重大耗能企业生产成本以及系统弃风量为目标, 建立多目标经济调度模型. 之后对每一个风电功率场景进行优化并结合场景出现的概率计算目标函数的期望值, 得到每个时段火电机组的出力及参与激励需求侧响应的重大耗能企业用户的响应方案. 需要指出的是, 第 2 步优化调度受第 1 步结果的约束, 是对第 1 步调度的进一步优化.

2 重大耗能企业需求侧响应行为分析及建模

2.1 生产过程行为模型

重大耗能企业作为电网中最大的电力用户之一, 其用电行为特性将直接影响到整个电网运行的经济性. 当前重大耗能企业主要集中在水泥、合金、钢材、焦化、纺织等行业, 本文以纺织行业的生产流程为例对生产过程进行建模.

纺织工业是我国国民经济的传统支柱产业, 属于传统的重大耗能企业^[29]. 其日用能负荷值、峰谷差值区间较小且稳定^[29-30], 生产模式为连续不间断式生产, 在不同的步骤之间可以加入保存器对半成品进行暂时保存. 纺织企业可以通过关停某些生产设备来对生产负荷进行调整.

纺织行业的生产过程可以简化为如下的并行生产过程 (Parallel manufacturing process, PMP). PMP 系统的网络架构如图 3 所示. 此模型作为线型网络, 生产对象必须依次通过每一台机器进行加工, 并引入缓存器增加机器-机器生产网络的柔性, 使其具有更大的调节空间. 通过调节 PMP 系统的生产计划来进行需求侧响应是本文主要的负荷调控手段.

本文将一天平均划分为 $T = 24$ 个调度时段, 则该网络行为约束可用式 (1)~(6) 描述.

$$0 \leq N_{M,t,i} \leq N_{M,t,i}^{\max} \quad (1)$$

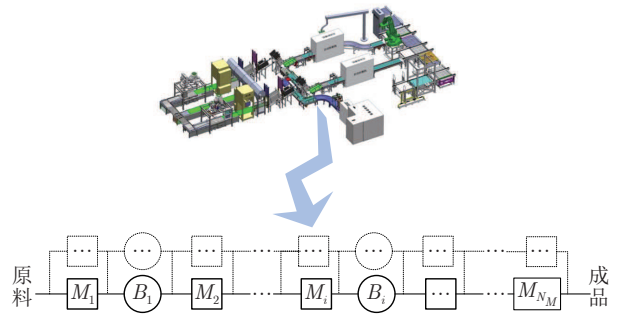


图 3 生产过程架构

Fig.3 Structure of PMP system

$$0 \leq N_{B,t,i} \leq N_{B,t,i}^{\max} \quad (2)$$

$$N_{M,t,i} \leq N_{M,t-1,i-1} + N_{B,t-1,i-1} \quad (3)$$

$$N_{B,t,i} = N_{B,t-1,i} + N_{M,t-1,i} - N_{M,t-1,i+1} \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{N_M-1} N_{M,T,i} + \sum_{j=1}^{N_B} N_{B,T,j} = 0 \quad (5)$$

$$\sum_{i=2}^{N_M} N_{M,1,i} + \sum_{j=1}^{N_B} N_{B,1,j} = 0 \quad (6)$$

式中, N_M 和 $N_B = N_M - 1$ 为生产网络中机器和缓存器的数量; $N_{M,t,i}$ 和 $N_{B,t,i}$ 为时段 t 中第 i 台机器或缓存器中生产对象个数; $N_{M,t,i}^{\max}$, $N_{B,t,i}^{\max}$ 分别为第 i 台机器和缓存器在第 t 个时段的最大加工数量和最大存储容量.

式 (1) 和式 (2) 分别表示了机器和缓存器时段中的最大加工和最大存储容量约束. 式 (3) 为机器的行为约束, 保证了机器在该时段加工数量不大于上一时段上一级机器和缓存器中的产品数量之和. 式 (4) 代表缓存器中生产对象数量满足与流入、流出之间的平衡约束. 此外, 本文中假设在调度周期开始和结束时生产网络之中没有半成品, 即时段 $t = 1$ 和时段 $t = T$ 生产网络中的缓存器都应为空, 并且生产对象必须从第 1 台机器进入生产网络, 从最后一台机器完成加工, 如式 (5) 和式 (6) 所示.

2.2 重大耗能企业需求侧响应决策描述

本文中电网为重大耗能企业用户提供了混合需求侧响应方案. 重大耗能企业用户期望在满足 PMP 生产约束的情况下, 根据电网给出的发电预测量及分时电价, 调整自身生产计划以最小化用电成本. 此外在该模型中进行了如下假设:

1) PMP 系统中机器及缓存器的耗电功率与其生产对象个数成正比;

2) 在每一个调度时段内, 电价已知且为定值;

3) 风电消纳补偿价格系数为定值.

a) PMP 生产用电成本. 重大耗能企业用户的用电成本由 PMP 生产过程中设备用电成本、基础固定用电成本和参与需求侧响应后的补偿组成, 其数学表达如式 (7)~(9) 所示.

$$J_1 = \sum_{t=1}^T (F_{M,t} + F_{B,t}) + C_{\text{FIXED}} - S_{\text{IDR}} \cdot w \cdot \Delta P_W \quad (7)$$

$$F_{M,t} = \sum_{i=1}^{N_M} \alpha_t N_{M,t,i} C_{M,i} \quad (8)$$

$$F_{B,t} = \sum_{i=1}^{N_B} \alpha_t N_{B,t,i} C_{B,i} \quad (9)$$

式中, $C_{M,i}$ 和 $C_{B,i}$ 分别为第 i 台机器和缓存器加工或存放一个生产对象时的耗电量; α_t 为时段 t 的电价水平; $F_{M,t}$ 和 $F_{B,t}$ 分别为机器和缓冲器的成本函数; C_{FIXED} 为一个调度周期的基础固定电费; S_{IDR} 表征工业用户是否参加需求侧响应; w 为风电消纳补偿价格系数, 本文将该系数设置为 0.645 ¥/kWh; ΔP_W 为风电消纳的增加量.

b) PMP 生产约束. PMP 系统在进行需求侧响应时, 除了满足式 (1)~(6) 所示行为约束外, 还应达到单调度周期生产要求, 即周期内生产数量应大于目标生产数.

$$\sum_{t=1}^T N_{M,t,N_M} \geq N_{\text{TAR}} \quad (10)$$

式中, N_{TAR} 为一个调度周期内 PMP 的最小生产数量.

3 重大耗能企业需求侧两步协调调度优化模型

本节阐述了发电侧的调度模型. 电网期望在满足机组组合发电约束、线路输电约束以及用户用电需求的前提下实现发电成本和弃风量的最小化. 在此模型中用到了如下的假设:

1) 假设风力发电的不确定性可使用风速的随机性进行表征. 真实风速 v 与预测风速有如下的数学关系:

$$v = v_{\text{fore}} + \Delta v \quad (11)$$

$$\Delta v \sim N(\mu_v, \sigma_v^2) \quad (12)$$

式中, v_{fore} 为风速的预测值, Δv 为风速预测误差, 本文中假设该误差满足期望和方差分别为 μ_v, σ_v^2 的高斯分布.

2) 假设风电场中风机为变速变桨风机, 风速与风电机组的风电功率之间的数学关系满足如下的数学模型^[31-33]:

$$P_W = \begin{cases} 0, & 0 \leq v < v_{ci} \\ a_w + b_w v^3, & v_{ci} \leq v < v_{ra} \\ P_{ra}, & v_{ra} \leq v \leq v_{co} \\ 0, & v > v_{co} \end{cases} \quad (13)$$

$$a_w = \frac{P_{ra} v_{ci}^3}{v_{ra}^3 - v_{ci}^3}, \quad b_w = \frac{P_{ra}}{v_{ra}^3 - v_{ci}^3} \quad (14)$$

式中, P_W 为某一台风电机组的有功功率; $v, v_{ci}, v_{ra}, v_{co}$ 分别代表实际风速, 切入风速, 速率风速和切出风速. 切入风速指使风电机组开始工作的风速, 切出风速指风电机组输出功率达到额定值对应的风速, a_w, b_w 均为模型相关参数, P_{ra} 代表风电机组切出风功率, 这些参数由风机自身决定.

本文中所考虑的风电-火电机组-重大耗能企业需求侧响应协调调度优化模型为两步调度模型, 第 1 步为预测调度, 第 2 步为协调调度. 其中除了调度系统之外, 主要包括了表征电源侧的机组组合模型、提供线路潮流约束的配电网模型及描述重大耗能企业生产过程的 PMP 模型.

1) 模型 1. 第 1 步预测调度模型

如图 4 所示, 在第 1 步调度优化中, 该模型首先根据日前信息预测电力系统负荷, 并制定合理的分时电价. 重大耗能企业用户根据分时电价在保证满足生产目标数量的前提下, 最小化 PMP 系统的生产成本, 即实现 PMP 需求侧响应调度, 得到 PMP 系统在预测条件下的负荷需求.

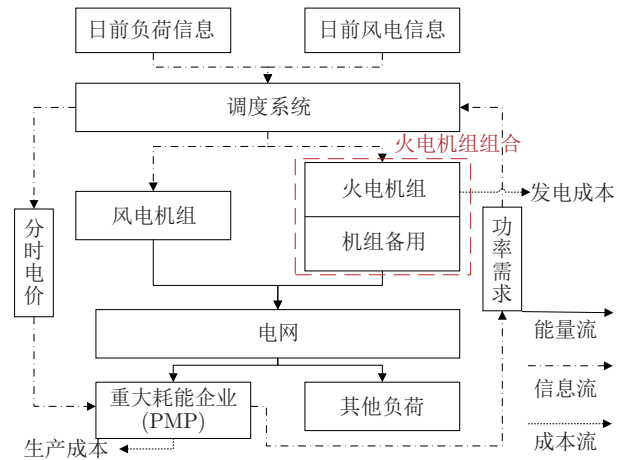


图 4 分步协调调度第 1 步模型
Fig.4 Scheduling model of Step 1

在此基础上, 根据 PMP 负荷和电网其他负荷的预测信息, 本模型在满足机组组合发电约束、线路输电约束以及用户用电需求的前提下, 通过优化火电机组组合方案、调度火电风电机组出力、最小化机组组合的发电成本并预留相应的机组出力备用以供第 2 步进行调整. 因此, 除第 2 节中式 (1) ~ (10) 已经详细介绍的 PMP 生产过程模型之外, 第 1 步调度的数学模型如下.

a) 发电成本. 系统发电成本为机组组合的运行成本, 即火电机组组合发电成本和启动成本的总和, 可表示为

$$J_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_T} [F(P_{T,t,i}) + S_{T,t,i}] \quad (15)$$

$$F(P_{T,t,i}) = (aP_{T,t,i}^2 + bP_{T,t,i} + c) \times s_{t,i} \quad (16)$$

$$S_{T,t,i} = \left[\alpha_i + \beta_i \left(1 - e^{-\frac{T_{t,i}^{\text{off}}}{\tau_i}} \right) \right] \times s_{t,i} \quad (17)$$

$$s_{t,i} = \begin{cases} 1, & t \in M_{\text{on},i} \\ 0, & t \notin M_{\text{on},i} \end{cases} \quad (18)$$

式中, N_T 为火电机组的台数; $F(\cdot)$ 为火电机组的发电成本函数; a, b, c 为耗量系数; $P_{T,t,i}$ 为第 i 台火电机组在时段 t 的发电功率; $S_{t,i}$ 为机组启动成本; $\alpha_i, \beta_i, \tau_i$ 为相关系数; $T_{t,i}^{\text{off}}$ 为机组 i 在时段 t 的停运时间; $s_{t,i}$ 为第 i 台火电机组在时段 t 的启停状态; $M_{\text{on},i}$ 为第 i 台火电机组处于最小启动时间内的时段 t 组成的集合. 式 (18) 表明在时段 t 内, 若第 i 台火电机组处于最小启动时间段内 $s_{t,i}$ 为 1, 否则为 0.

b) 约束条件. 在进行最优经济调度的过程中, 协调调度需要满足发电机组、电网以及用电需求等一系列约束以保证电网的安全运行和用户的用电需求. 其中, 电网约束可表示如下.

i) 系统功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^{N_T} P_{T,t,i} + \sum_{i=1}^{N_W} P_{W,t,i} = D_{\text{Local},t} + D_{\text{PMP},t} \quad (19)$$

$$D_{\text{PMP},t} = \sum_{i=1}^{N_M} N_{M,t,i} C_{M,i} + \sum_{i=1}^{N_B} N_{B,t,i} C_{B,i} \quad (20)$$

式中, N_W 为风电机组的总数量; $D_{\text{Local},t}$ 为该时段电网上的其他负荷的功率需求预测量, 该负荷可由日前信息进行预测; $P_{W,t,i}$ 为第 i 台风电机组在时段 t 的发电功率; $D_{\text{PMP},t}$ 为该时段生产过程的功率需求.

ii) 火电及风电机组出力约束

$$P_{T,t,i,\min} \leq P_{T,t,i} \leq P_{T,t,i,\max} \quad (21)$$

$$0 \leq P_{W,t,i} \leq P_{W,t,i}^{\text{fore}} \quad (22)$$

式中, $P_{T,t,i,\max}$ 为机组组合的最大输出功率, $P_{T,t,i,\min}$ 为最小输出功率, $P_{W,t,i}^{\text{fore}}$ 为第 i 台风电机组在时段 t 的预测风功率.

iii) 火电机组备用约束

$$\sum_{i=1}^{N_T} R_{T,t,i} \geq \Delta D_{\text{Local},t} \quad (23)$$

$$\sum_{i=1}^{N_T} R_{T,t,i} \leq \sum_{i=1}^{N_T} P_{T,t,i,\max} - D_{\text{PMP},t} + \sum_{i=1}^{N_W} P_{W,t,i} - D_{\text{Local},t} \quad (24)$$

式中, $R_{T,t,i}$ 为时段 t 火电机组 i 的备用; $\Delta D_{\text{Local},t}$ 为 $D_{\text{Local},t}$ 的预测误差.

式 (23) 保证了机组备用满足第 2 步调整的需求, 式 (24) 描述了机组备用受限于最大机组出力.

iv) 火电机组爬坡约束

$$-r_{d,i} \Delta t \leq P_{T,t,i} - P_{T,t-1,i} \leq r_{u,i} \Delta t \quad (25)$$

式中, $r_{u,i}, -r_{d,i}$ 分别为机组组合的最大上升速率和最大下降速率.

v) 火电机组启停机约束

$$\sum_{k=t}^{t+M_{\text{up},i}-1} x_{i,k}^{\text{sche}} \geq M_{\text{up},i} (x_{i,t}^{\text{sche}} - x_{i,t-1}^{\text{sche}}) \quad (26)$$

$$\sum_{k=t}^{t+M_{\text{down},i}-1} (1 - x_{i,k}^{\text{sche}}) \geq M_{\text{down},i} (x_{i,t-1}^{\text{sche}} - x_{i,t}^{\text{sche}}) \quad (27)$$

$$x_{i,0}^{\text{sche}} = 0 \quad (28)$$

式中, $M_{\text{up},i}, M_{\text{down},i}$ 分别为机组组合最小运行时间和最小停机时间; 此外, $x_{i,t}^{\text{sche}}$ 代表机组 i 在时段 t 的工作状态. 式 (26) 和式 (27) 分别保证了机组组合的最小运行时间和最小停止时间. 式 (28) 中定义 0 时刻的机组 i 的状态, 从而方便 1 时刻的状态计算.

vi) 电网潮流约束

$$P_{\text{farm},t} = \sum_{i=1}^{N_W} P_{W,t,i} \quad (29)$$

$$P_{Gi} = P_{Di} - s_{\text{farm}} P_{\text{farm}} + s_{\text{PMP}} D_{\text{PMP}} + \sum_{j \in N_i} B_{ij} (\theta_i - \theta_j) \quad (30)$$

式中, P_{Gi} , P_{Di} 为总线 i 的发电功率和需求功率; θ_i , N_i 为总线 i 的相角和与其相连的总线数; B_{ij} 为总线 i , j 间的转换矩阵; s_{farm} 和 s_{PMP} 分别为该总线上风电场的个数以及 PMP 的个数; $P_{farm,t}$ 为时段 t 单个风电场的输出功率, N_W 为风电场中风机台数. 在该约束中假设电网中存在多个风力发电场和重大耗能企业用户, 其可能接入在电网中同一或不同总线上.

vii) 电网输送功率约束

$$|TL_i^t| \leq TL_{i,\max}^t \quad (31)$$

式中, TL_i^t 为支路 i 在时间 t 内输送功率; $TL_{i,\max}^t$ 为支路 i 在时间 t 内最大输送功率.

综上, 第 1 步预测调度模型中解决的优化问题可以概括如下. 首先重大耗能企业根据分时电价最小化 PMP 生产用电成本, 即

$$\begin{aligned} \arg \min_{N_M, t, i, N_B, t, i} J_1 \\ \text{s.t. } (1) \sim (6), (8) \sim (10) \end{aligned} \quad (32)$$

之后, 发电侧根据风电预测值最小化发电成本

$$\begin{aligned} \arg \min_{P_T, t, i, P_W, t, i, x_{i,t}^{\text{sche}}, \theta_i} J_2 \\ \text{s.t. } (16) \sim (31) \end{aligned} \quad (33)$$

2) 模型 2. 第 2 步协调调度模型

第 2 步调度建立了火电机组组合和需求侧的 PMP 协调调度模型. 特别地, 由于风电功率存在较大的波动且第 2 步重新制定 PMP 方案后系统负荷变化较大, 为了保证系统能满足功率平衡, 第 2 步调度引入了外部备用. 这种备用对应较高的惩罚价格, 并将作为电网发电成本的一部分.

第 2 步调度最小化发电成本、弃风量以及 PMP 的生产成本. 如图 5 所示, 在相关约束的限制下, 根据风电样本集、分时电价表以及第 1 步调度得到的火电机组组合方案和系统备用、对机组组合的备用、参加激励需求侧响应 PMP 生产方案、风电出力以及外部备用的接入进行协调调度, 得到最优调度计划. 第 2 步使用第 1 步预留的火电机组发电备用对其发电功率进行调整, 从而实现两步调度.

第 2 步调度数学模型可表述如下.

a) 发电成本. 由于第 2 步调度引入了外部备用, 因此电力系统的运行成本为第 1 步调度中发电成本与外部备用成本的和; 此外, 第 2 步调度还旨在最小化 PMP 的生产成本, 即式 (7) 所示, 以及最小化弃风量. 因此, 第 2 步中的发电成本 (包括火电机组组合发电成本、启动成本及外部备用成本) 如下所示:

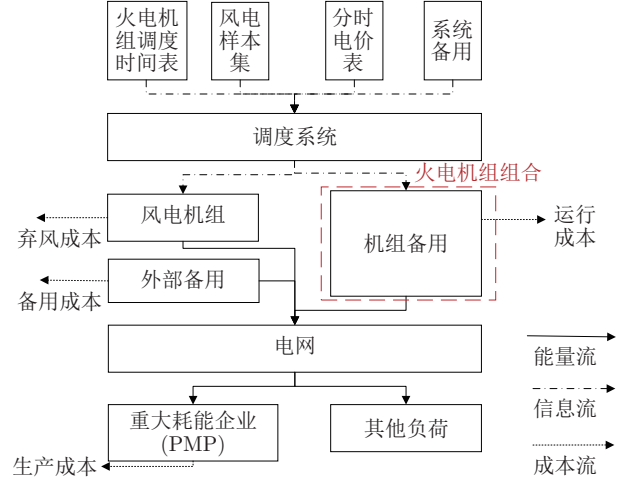


图 5 第 2 步调度模型

Fig.5 Scheduling model of Step 2

$$\begin{aligned} J_3 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_T} [F(P_{T,t,i}^{\text{AD}}) + S_{T,t,i}] + \\ \sum_{t=1}^T C_{\text{outres}}^t \end{aligned} \quad (34)$$

$$C_{\text{outres}}^t = \lambda P_{\text{outres}}^t \quad (35)$$

式中, C_{outres}^t 为时段 t 外部备用成本, P_{outres}^t 为该时段的外部备用功率, $P_{\text{outres}}^t > 0$ 表示从外部购买电力, $P_{\text{outres}}^t < 0$ 表示向外出售多余电力; λ 为外部成本系数, 本文中取 $\lambda = 20$.

b) 弃风量.

$$J_4 = \sum_{t=1}^T P_{WP,\text{cur}}^t \quad (36)$$

$$P_{WP,\text{err}}^{t,j} = \sum_{i=1}^{N_W} (P_{W,t,i}^{\text{Fact}} - P_{W,t,i}) \quad (37)$$

$$P_{WP,\text{cur}}^t = \sum_{j=1}^{N_{\text{Sample}}} P(P_{WP,\text{err}}^{t,j} > 0) \cdot P_{WP,\text{err}}^{t,j} \quad (38)$$

式中, $P_{WP,\text{err}}^{t,j}$ 代表时段 t 内第 j 次采样所得的总弃风量, $P_{W,t,i}^{\text{Fact}}$ 代表此次采样时段 t 风电机组 i 的真实最大风功率 (即真实风速对应的风功率), N_{Sample} 表示采样次数, $P(A)$ 表示事件 A 发生的概率.

本文使用拉丁超立方采样法^[25]对风功率进行独立采样得到相应的不确定性集, 在此基础上对与调度风功率、不确定性集中的实际风功率以及其对应的概率相关的弃风量进行计算得出弃风量, 如式 (38) 所示.

c) 约束条件. 与第 1 步调度相比, 第 2 步调度中以 PMP 表征的重大耗能企业可能通过第 2 节中

的激励型需求侧响应制度参加电力系统的协调调度, 因此, 本部分模型约束条件包括了式 (1) ~ (6) 和式 (10) 所示 PMP 相关约束以及式 (19) ~ (21)、式 (23) ~ (25)、式 (29) ~ (31) 所示的电力系统相关约束. 由于引入外部备用, 以及预测风速与真实风速存在差距, 对部分约束进行调整.

i) 调整后功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^{N_T} P_{T,t,i}^{AD} + \sum_{i=1}^{N_W} P_{W,t,i} + P_{\text{outres}}^t = D_{\text{Local},t} + D_{\text{PMP},t}^{AD} \quad (39)$$

$$P_{T,t,i} - R_{T,t,i} \leq P_{T,t,i}^{AD} \leq P_{T,t,i} + R_{T,t,i} \quad (40)$$

$$P_{T,t,i,\min} \leq P_{T,t,i}^{AD} \leq P_{T,t,i,\max} \quad (41)$$

式中, $P_{T,t,i}^{AD}$ 为调整后机组组合出力.

ii) 调整后风电机组出力约束

$$0 \leq P_{W,t,i} \leq P_{W,t,i}^{\text{Fact}} \quad (42)$$

式 (42) 保证了调整后风电机组出力不会大于真实风速对应的风功率.

iii) 调整后爬坡约束

$$-r_{d,i} \Delta t \leq P_{T,t,i}^{AD} - P_{T,t-1,i}^{AD} \leq r_{u,i} \Delta t \quad (43)$$

式 (43) 保证了调整后的机组组合出力仍满足机组的爬坡约束.

iv) 调整后的线路功率约束

$$|TL_{t,i}^{AD}| \leq TL_{t,i,\max}^t \quad (44)$$

式中, $TL_{t,i}^{AD}$ 为第 2 步调度后支路 i 在时间 t 的传输功率.

综上, 在第 2 步协调调度模型中所解决的多目标优化问题可以总结如下:

$$\begin{aligned} & \arg \min_{P_{T,t,i}^{AD}, P_{W,t,i}, P_{\text{outres}}^t, N_{M,t,i}, N_{B,t,i}, \theta_i} [J_1, J_3, J_4] \\ & \text{s.t. (1) ~ (6), (8) ~ (10)} \\ & \quad (19) ~ (21), (23) ~ (25) \\ & \quad (29) ~ (31), (39) ~ (44) \end{aligned} \quad (45)$$

4 求解算法

本研究中的问题属于机组组合 (Unit commitment, UC) 问题的扩展, 在数学上是一个 NP-难问题^[34]. 为了对上述模型进行高效快速的求解, 本文基于混合整数规划制定求解算法, 如图 6 所示. 图中所示求解算法主要根据第 1 节中阐述两步调度策

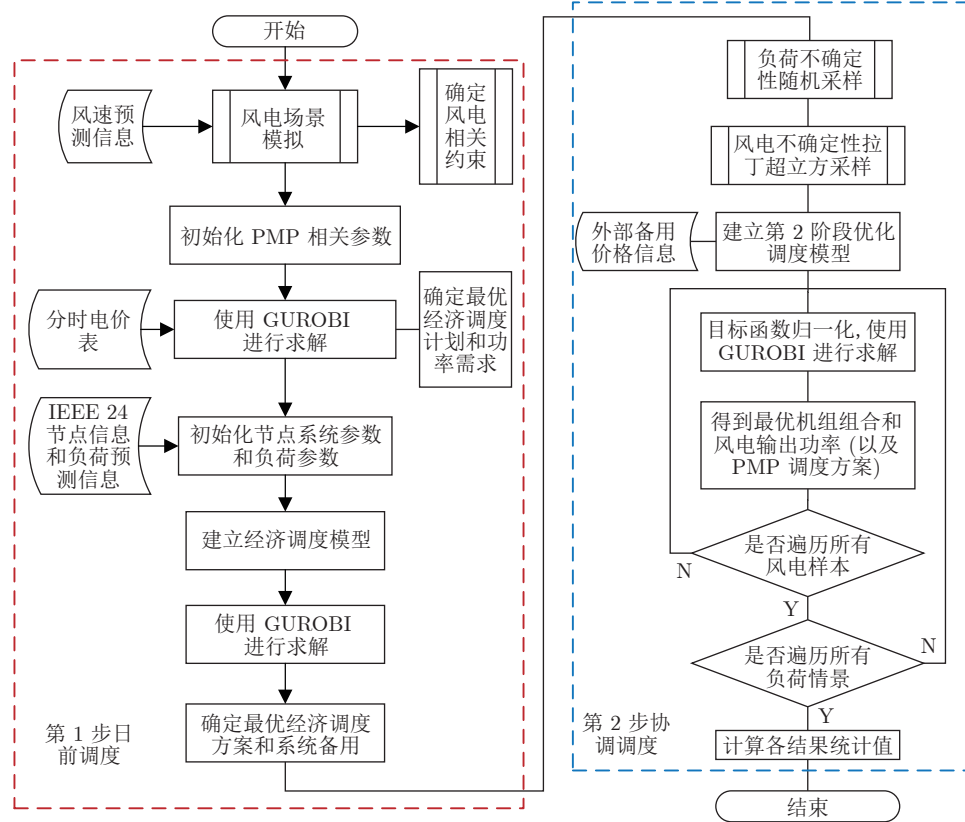


图 6 两步调度优化模型的求解算法

Fig. 6 Solution algorithm of two-step optimization model

略流程,将第3节中具体数学模型转化为混合整数规划问题并基于商业求解器 GUROBI 进行求解.

在对不确定性因素的处理方面,本文采用在表征风电的不确定性样本集的基础上使用嵌套优化策略,对每一种负荷场景下的每一个风电样本下的调度模型进行求解,得到对应的解及其概率,最终再计算出各目标函数的期望值.

另外,由于第2步优化调度模型为包含了发电成本、弃风量、以及生产成本三个目标函数的多目标优化调度模型,这对实现系统的最优调度提出了挑战.

$$\arg \min_{\substack{P_{T,t,i}^{\text{AD}}, P_{W,t,i}, P_{\text{outres}}^t, \\ N_{M,t,i}, N_{B,t,i}, \theta_i}} \sum_{q=1}^3 w_q f_{J_q}$$
$$f_{J_q} = \begin{cases} 1, & J_q(x) \leq J_q^{\min} \\ \frac{J_q^{\max} - J_q(x)}{J_q(x) - J_q^{\min}}, & J_q^{\min} < J_q(x) < J_q^{\max} \\ 0, & J_q(x) \geq J_q^{\max} \end{cases}$$

s.t. (1) ~ (6), (8) ~ (10)
(19) ~ (21), (23) ~ (25)
(29) ~ (31), (39) ~ (44)

(46)

为了解决这一问题,这里采用加权和法将多目标函数划归为单目标函数,并使用归一化的方法去除目标函数的量纲,将第2步中的多目标优化问题(45)转化为如式(46)所示的单目标优化问题.式中, $J_q(x)$ 为第2步模型的第 q 个目标函数,即 J_1, J_2, J_3 . $J_q^{\max}$ 和 $J_q^{\min}$ 分别为经过悲观/乐观评估 $J_q(x)$ 得到的上/下界估计值.需要指出的是,上/下界不需要精准取值,因为目的只是实现标么化. $f_{J_q}(x)$ 为处理之后的标么值, w_q 为各目标函数权重.

5 算例及结果分析

5.1 算例设计

本文基于改进的烟台电网节点系统进行仿真,该节点系统包含了26条总线,39条支路,其拓扑图如附录A所示^[35].其中主要包括了5台火电机组,其耗量系数、最小启停时间等参数如表1所示.本文设置一个表征重大耗能企业需求侧响应的PMP系统通过节点接入电网.参考国家标准 GB/T 39973-2021^[30],设置其相关参数如表2所示.本文中每个生产对象代表纺织工业中的1000米机织染整布,并设置一个调度周期的生产任务为25个生产对象.

此外,考虑到新能源并网的情况,本算例还通

表 1 发电机组相关参数

Table 1 Related coefficients of thermal generators

节点	最小时间 (h)		耗量系数					
	启动	停止	a	b	c	α	β	γ
1	0	0	0.077	242.20	759.49	129.0	129.0	2
4	0	0	0.084	242.91	761.81	129.0	129.0	2
9	0	0	0.181	167.25	159.70	64.5	64.5	1
21	0	0	0.187	168.09	160.54	64.5	64.5	1
25	5	3	0.032	68.95	920.61	967.5	967.5	6

表 2 PMP 网络结构参数

Table 2 Parameters of PMP system

单元编号	最大加工容量 (个)	功率 (kW/个)
M_1	2	48
B_1	4	4
M_2	2	32
B_2	4	4
M_3	2	12
B_3	4	4
M_4	2	36
B_4	4	4
M_5	2	32
B_5	4	4
M_6	2	21

过节点20接入了一个风电场,并基于内蒙古某风电场的实际情况设置预测风速.风速预测误差均值设置为0,预测误差设置为8%的预测风速.基于风功率模型计算该风电场24小时预测风电功率.电网系统基于日前信息的预测负荷信息如图7所示,假设电网负荷波动幅度为预测值的10%.

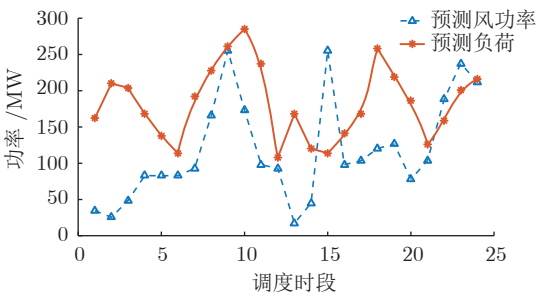


图 7 预测风电功率以及负荷需求信息

Fig.7 Forecast power outputs of wind and power demand of local loads

根据该负荷曲线,假设电力市场为重大耗能企业需求侧响应提供的价格型需求侧响应分时电价表如表3所示.

为了验证本文所提出的两步调度优化模型的有

表 3 分时定价策略表
Table 3 Time-of-use price strategy

用电场景	用电时段	消耗电价 (¥ /kWh)	需求电价 (¥ /kWh)	固定费用 (¥)
高峰期	2 am, 7~12 am, 5~7 pm	1.08296	121.26	331.66
低峰期	0~1 am, 3~6 am, 1~4 pm, 8~12 pm	0.53367	0	

效性, 设计了算例 1 与算例 2 以比较验证重大耗能企业用户参与第 2 步协调调度的有效性. 算例 1 与算例 2 的主要区别在于第 2 步中重大耗能企业用户是否参与风电消纳导向的激励型需求侧响应, 若不参与则该系统为一个传统的价格导向的需求侧响应策略, 即算例 2 是一种已有的需求侧响应方法. 此外设计了算例 3, 其中给出了 6 种不同的权重, 以测试权重对优化结果的影响, 同时验证两步调度优化模型在不同权重之下的有效性与稳定性.

算例 1. 发电成本、生产成本、弃风量三个目标函数的权重分别为 1/3, 1/3, 1/3. PMP 参与第 2 步调度中风电导向激励型需求侧响应.

算例 2. 发电成本、生产成本、弃风量三个目标函数的权重分别为 1/3, 1/3, 1/3. PMP 不参与第 2 步调度中风电导向激励型需求侧响应.

算例 3. 为了验证对 J_1 , J_3 , J_4 三个目标函数偏重不同的情况下两步调度优化模型的有效性 & 探讨不同权重因子对优化结果的影响, 本算例中设计了 6 种不同的权重比例, 其发电成本、生产成本、弃风量三个目标函数的权重如下:

- 1) 3-1: 1, 1/3, 2/3;
- 2) 3-2: 1, 3/2, 1/2;
- 3) 3-3: 1, 2, 3;
- 4) 3-4: 1, 1/2, 1/2;
- 5) 3-5: 1, 2, 1;
- 6) 3-6: 1, 1, 2.

权重比例反映了对不同目标函数的重视程度. 在此算例中, PMP 系统参与第 2 步调度中激励型

需求侧响应.

5.2 结果分析

基于两步求解策略对以上三个算例进行求解, 其求解结果包括了火电发电量和外部备用需求的其他参数均在表 4 中列出. 由于最小化弃风量等同于最大化风电消纳量, 表中仅列出了风电消纳量的值. 此外, 外部备用为外部正负备用绝对值之和.

1) 结果 1. 两步经济调度有效性分析

算例 1 的模拟结果如表 4 中算例 1 部分所示. 一方面在第 1 步优化中, 最优经济调度策略下的发电成本为 ¥ 208 110.02, 生产成本为 ¥ 3 528.15, 风电消纳量为 2 531.54 MWh. 其调度甘特图如图 8(a) 所示. 而在第 2 步细化调度中 PMP 参与了激励型需求侧响应, 上述三个目标函数的值分别为 ¥ 244 436.30, ¥ 3 478.16, 以及 2 738.45 MWh. 显然, 第 2 步调度风电消纳量相比第 1 步调度上升了 8.17%. 这是由于第 2 步调度重新规划了如图 8(b) 所示的 PMP 调度计划, 通过将生产计划调整到风电出力更高的时段, 改变了图 9 所示负荷曲线, 进而利用 PMP 网络的柔性增强了 PMP 生产负荷与风电功率的相关性, 在第 1 步调度的基础上增强了对风电的消纳能力. 第 2 步调度中发电成本上升了 17.46%, 这主要是因为引入了外部备用. 在第 2 步调度中火电机组的备用出力和火电发电成本期望值高于第 1 步调度对应值, 具体证明见附录 B, 但是由于风电消纳量的增加导致了第 2 步调度结果中火电机组出力的减少, 发电成本随之下降.

表 4 三个算例对应目标函数值及相关功率
Table 4 Objective values and corresponding power information of three cases

算例	调度步骤	发电成本 (¥)	生产成本 (¥ /单位)	风电消纳量 (MWh)	系统负荷 (MWh)	火电发电量 (MWh)	外部备用 (MWh)
算例 1~3	第 1 步	208 110.02	3 528.41	2 531.54	5 083.35	2 551.81	—
算例 1	第 2 步	244 436.30	3 478.16	2 738.45	5 038.90	2 454.23	268.00
算例 2		256 888.21	3 528.41	2 826.61	5 087.74	2 479.80	333.46
算例 3-1		187 535.17	3 493.58	2 528.95	5 031.14	2 446.30	55.89
算例 3-2		187 862.76	3 492.16	2 527.15	5 032.68	2 448.78	56.75
算例 3-3		243 154.81	3 469.97	2 871.31	5 027.01	2 445.36	401.30
算例 3-4		187 717.58	3 492.03	2 529.73	5 033.88	2 447.81	56.34
算例 3-5		242 932.61	3 469.97	2 871.31	5 035.34	2 448.59	398.39
算例 3-6		242 928.22	3 469.97	2 871.31	5 035.15	2 448.35	398.55

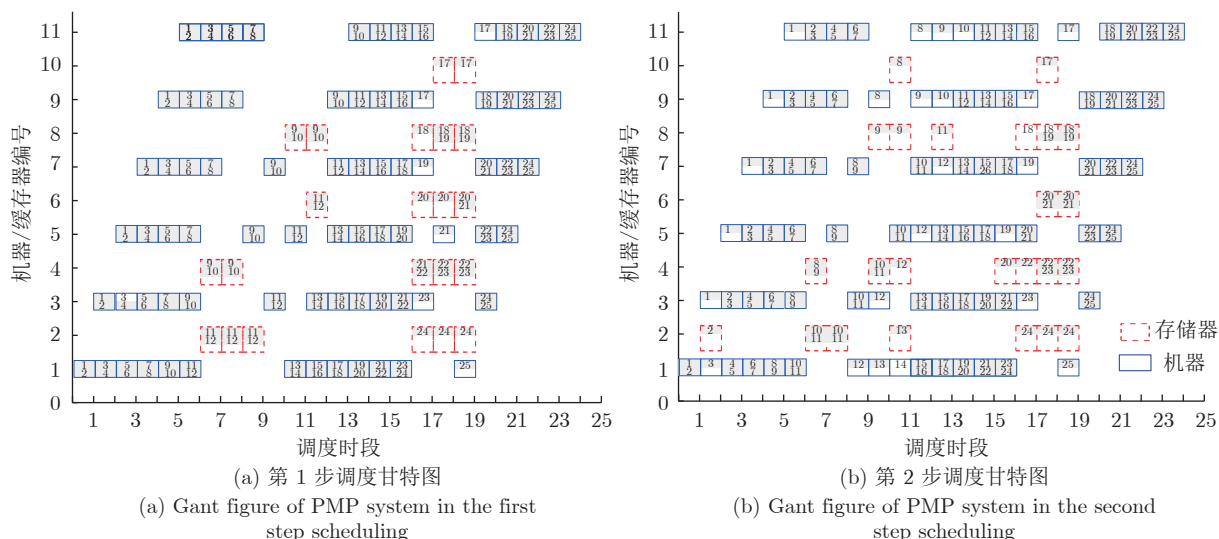


图 8 两步调度中 PMP 系统的调度甘特图

Fig.8 Gant figures of PMP system in stepwise scheduling

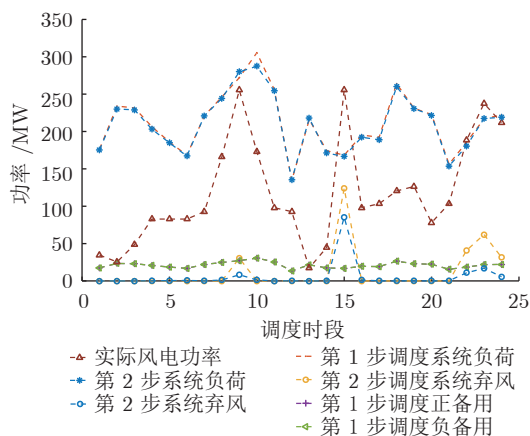


图 9 算例 1 求解结果中各时段功率信息

Fig.9 Power information from solution of Case 1

因此,在风电导向的需求侧响应机制下,PMP 生产成本降低了 1.42%。此外,在实际调度中,生产成本降低又将带动 PMP 更高比例地参与第 2 步调度中的需求侧响应。这是整个模型得以实施的基础。

值得注意的是,第 2 步调度中 PMP 改变自身用电行为,这导致了整个系统负荷从 5083.35 MWh 变化到 5038.90 MWh。此外,该系统对于风电消纳增加了 206.91 MWh。因此,在电力系统功率平衡的约束下,风电消纳量的增加引起火电机组通过第 2 步调度调整后总功率下降了 97.58 MWh。由于第 2 步调整中只调节火电机组的发电功率而不进行启停操作,因此机组组合的发电成本下降。但是,系统使用了 268.00 MWh 的外部备用以保证系统运行安全以及用户需求。而根据表 4 中第 1 步调度所得数据可计算出火电机组平均的发电价格为

81.53 ¥/MWh, 低于本文中外部备用的价格,即 129 ¥/MWh。因此,引入的外部备用使系统的发电成本上升了 17.36%,以此保证调度策略的可行性。

2) 结果 2. 重大耗能企业需求侧响应协调调度有效性分析

为了进一步探讨第 2 步需求侧响应对于系统运行的影响,本文对算例 2 进行求解。与算例 1 相反,在算例 2 中 PMP 不参与第 2 步调度中的激励型需求侧响应。在这种情况下,一方面最优风电消纳量为 2826.61 MWh,与算例 1 基本保持一致。如图 10 所示,第 1 步调度后的系统负荷与第 2 步调度后的系统负荷曲线几乎完全重合,即第 2 步并没有对系统负荷做出调整,系统负荷与实际风电功率曲线的相关性不高,调度系统不能通过 PMP 负荷的柔性来增强对风电的消纳。

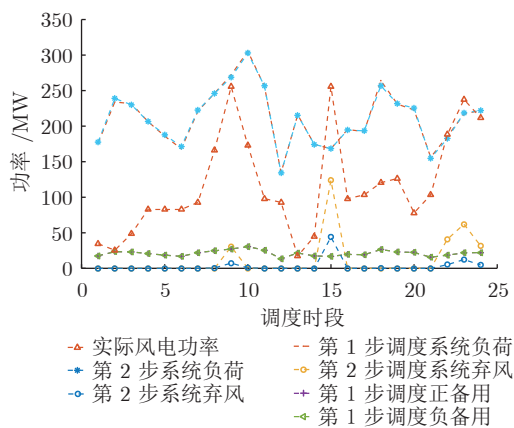


图 10 算例 2 求解结果中各时段功率信息

Fig.10 Power information from solution of Case 2

另一方面, 算例 2 中系统所需的外部备用增加了 65.46 MWh, 达到了 333.46 MWh. 这意味着系统使用了额外的外部备用以促进风电的消纳, 并保证系统的正常运行. 然而, 外部备用的引入导致发电成本增加了 ¥ 12451.92. 这是因为在负荷较高的时段火电机组组合和风电机组不能很好地满足系统负荷需求, 从而导致较多外部备用的引入. 显然这是不经济的, 在经济调度目标的导向下, 系统并不会引入多余的外部备用来促进风电的消纳. 此外, 相比 PMP 参与第 2 步需求侧响应, 其生产成本也将上升 ¥ 50.25. 因此, 在第 2 步调度中引入激励型需求侧响应策略可以降低系统对于外部备用的使用并提高风电的消纳水平. 因此, 本文所提出的两步调度策略可以有效地增加风电消纳量, 降低外部备用的引入, 提高了系统经济效益.

3) 结果 3. 权重因子对优化结果影响分析

在上述优化调度中, 发电成本的权重与生产成本和弃风量权重一致, 然而权重因子的确定将影响到系统目标函数的组成, 影响了最终优化结果. 为了研究权重因子对于优化结果的影响, 本文对表 4 中算例 3 的求解结果进行分析探讨, 如图 11 所示.

从图 11 中可以看出, 权重因子对风电消纳量和发电成本有着显著的影响.

1) 较大的权重因子代表对该目标函数更高的重视程度, 能够得到更优的目标函数值. 在图 11(a) 和图 11(c) 中, 可以看到风电消纳量及发电成本随着权重的改变产生了明显的变化. 其中, 权重越大对应的风电消纳量越高, 发电成本越低, 结合表 4 中火电机组组合发电量的优化结果, 可知引起发电成本变化的因素主要来自于外部备用的引入.

2) 由于存在最小生产量限制及 PMP 生产过程约束, PMP 生产成本并不随权重的变化而产生明显的波动, 如图 11(b) 所示.

6 结束语

针对可持续发展要求下高比例风电并网以及电网运行经济性的要求, 结合重大耗能企业领域需求侧响应并从经济调度的角度出发, 研究了生产过程的行为模型, 并在此基础上建立了高比例风电渗透的智能电网背景下两步优化需求侧响应调度模型, 提出两步优化调度策略以实现电力系统的经济协调调度.

算例结果分析表明, 两步模型可以在单步调度的基础上处理好不确定性因素并提出经济性能更优的调度方案. 此外, 重大耗能企业用户通过新能源消纳导向的需求侧响应, 参与电力系统的协调调度, 可以在保证系统经济性及生产要求的基础上进一步

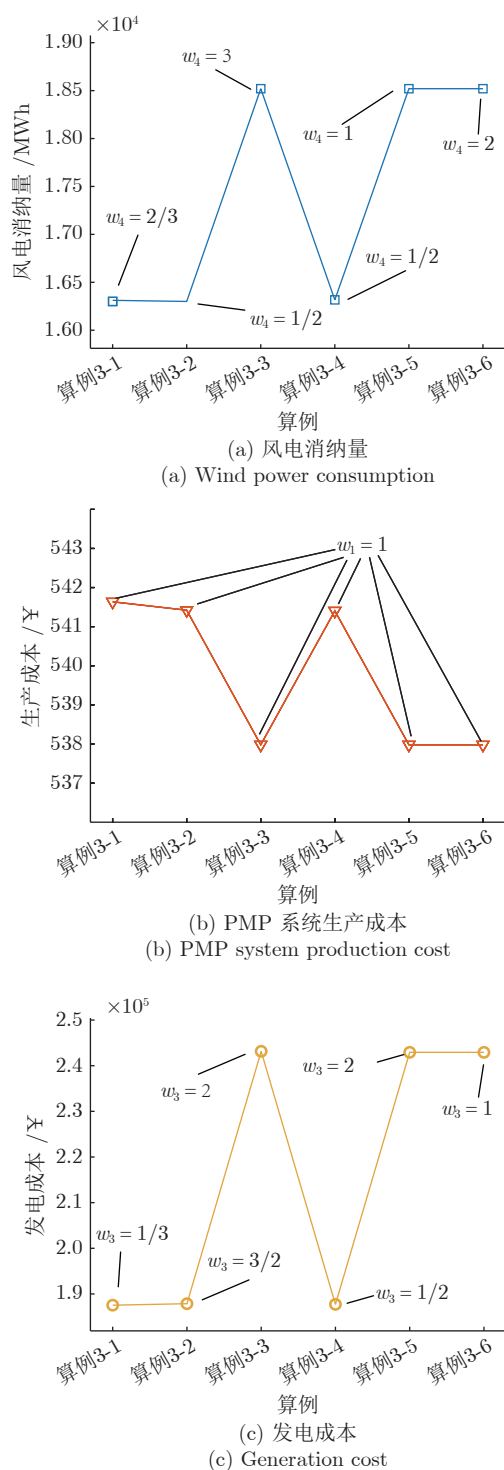


图 11 在不同权重作用下算例 3 目标函数值比较图

Fig.11 Objective values comparison of subcases mentioned in Case 3 with different weights

提高新能源消纳水平, 并降低生产运行成本. 对于权重因子的分析表明系统需要根据实际情况制定合理的权重因子, 下一步将对两步调度模型中权重因子的决策机制以及各目标函数间的内部关系做进一步研究探讨.

附录 A 烟台电网拓扑图

所采用的烟台电网拓扑如图 A1 所示。

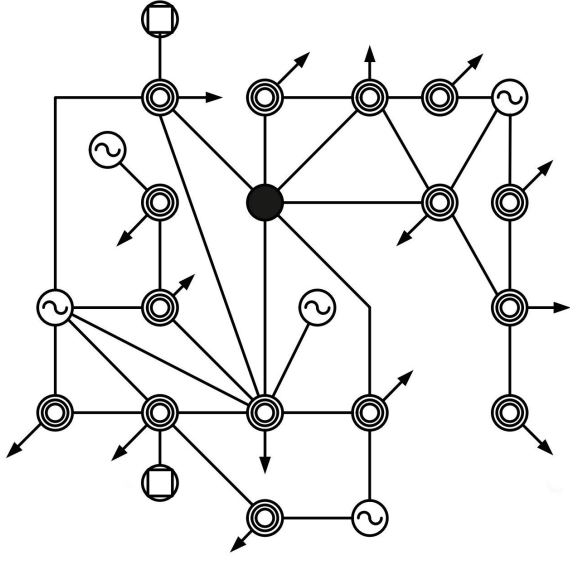


图 A1 烟台电网拓扑图

Fig. A1 Topology of Yantai power grid topology

附录 B 第 2 步调度火电机组发电成本期望值增大证明

定理 A1. 在任一时段内, 第 2 步调度后火电机组发电成本之期望高于第 1 步对应值, 即对于任意时段 t 有:

$$E\left(\sum_{i=1}^{N_T} F(P_{T,i}^{AD})\right) > \sum_{i=1}^{N_T} F_i(P_{T,i}) \quad (A1)$$

证明. 根据抽样所得的风电不确定集优化得到的火电机组出力 P 及对应的概率 Q 分别记为¹

$$P = [P_{T,i}^{AD,1}, \dots, P_{T,i}^{AD,j}, \dots, P_{T,i}^{AD,N_{\text{Sample}}}]^T \quad (A2)$$

$$Q = [P_1, \dots, P_j, \dots, P_{N_{\text{Sample}}}]^T \quad (A3)$$

其中, $P_{T,i}^{AD,j}$ 代表第 2 步调度得到的火电机组 i 出力, 其期望值记为 $E(P_{T,i}^{AD})$, 方差记为 $D(P_{T,i}^{AD})$, P_j 为第 j 次抽样对应的概率。

记 $P_{T,i}$ 为第 1 步调度得到的火电机组 i 出力, 在同一时段内 $P_{T,i}$ 是一个常数, 但是由于风电实际出力的随机性, $P_{T,i}^{AD}$ 是一个方差不为 0 的随机变量。此外, 在本文中火电机组正负备用绝对值相等, 因此第 2 步调度调整后火电出力的期望值与第 1 步所得的火电出力相等, 即

¹ 由于所证明的命题与时段 t 无关, 因此为了简化标记将下标 t 省略。

$$E(P_{T,i}^{AD}) = Q^T P = P_{T,i} \quad (A4)$$

第 2 步调度后总火电成本为

$$\begin{aligned} E\left[\sum_{i=1}^{N_T} F_i(P_{T,i}^{AD})\right] &= \sum_{i=1}^{N_T} E[F_i(P_{T,i}^{AD})] = \\ &= \sum_{i=1}^{N_T} E\left[a_i(P_{T,i}^{AD})^2 + b_i P_{T,i}^{AD} + c_i\right] = \\ &= \sum_{i=1}^{N_T} a_i E[(P_{T,i}^{AD})^2] + \sum_{i=1}^{N_T} b_i E(P_{T,i}^{AD}) + \sum_{i=1}^{N_T} c_i \end{aligned} \quad (A5)$$

将方差公式 $D(X) = E(X^2) - E^2(X)$ 代入式 (A5), 可以得到

$$\begin{aligned} E\left[\sum_{i=1}^{N_T} F_i(P_{T,i}^{AD})\right] &= \sum_{i=1}^{N_T} a_i [D(P_{T,i}^{AD}) + E^2(P_{T,i}^{AD})] + \\ &+ \sum_{i=1}^{N_T} b_i E(P_{T,i}^{AD}) + \sum_{i=1}^{N_T} c_i = \\ &= \sum_{i=1}^{N_T} a_i D(P_{T,i}^{AD}) + \sum_{i=1}^{N_T} a_i E^2(P_{T,i}^{AD}) + \\ &+ \sum_{i=1}^{N_T} b_i E(P_{T,i}^{AD}) + \sum_{i=1}^{N_T} c_i \end{aligned} \quad (A6)$$

将式 (A4) 代入式 (A6), 可以得到

$$\begin{aligned} E\left[\sum_{i=1}^{N_T} F(P_{T,i}^{AD})\right] &= \\ &= \sum_{i=1}^{N_T} a_i D(P_{T,i}^{AD}) + \sum_{i=1}^{N_T} a_i P_{T,i}^2 + \\ &+ \sum_{i=1}^{N_T} b_i P_{T,i} + \sum_{i=1}^{N_T} c_i = \\ &= \sum_{i=1}^{N_T} a_i D(P_{T,i}^{AD}) + \sum_{i=1}^{N_T} F_i(P_{T,i}) \end{aligned} \quad (A7)$$

由于 $D(P_{T,i}^{AD}) > 0$, 又有 $a_i > 0, \forall i \in \{1, 2, \dots, N_T\}$, 从而可以得到

$$E\left[\sum_{i=1}^{N_T} F(P_{T,i}^{AD})\right] - \sum_{i=1}^{N_T} F_i(P_{T,i}) = \sum_{i=1}^{N_T} a_i D(P_{T,i}^{AD}) > 0 \quad (A8)$$

□

References

- 1 Zhao Zi-Yuan. High-energy-consuming industries wear a "tightening spell" on electricity. *China Energy News*, 2021-10-18 (019)

- (赵紫原. 高耗能行业用电戴上“紧箍咒”. 中国能源报, 2021-10-18 (019))
- 2 Chai Tian-You. Industrial process control systems: Research status and development direction. *Scientia Sinica Informationis*, 2016, **46**(8): 1003–1015
(柴天佑. 工业过程控制系统研究现状与发展方向. 中国科学: 信息科学, 2016, **46**(8): 1003–1015)
- 3 Liu Qing, Zhang Cheng-Long, Xiong Hua-Wen, Weng Yu-Yan, Wang Hong, Tan Qing-Kun, et al. Prediction method and prospect of unit consumption of main high energy consuming products based on technical analysis [Online], available: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20211126.1851.002.html>, November 29, 2021
(刘青, 张成龙, 熊华文, 翁玉艳, 王红, 谭清坤, 等. 基于技术分析的主要高耗能产品单耗预测方法及展望 [Online], available: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20211126.1851.002.html>, 2021-11-29)
- 4 Sun Qiu-Ye, Teng Fei, Zhang Hua-Guang. Energy internet and its key control issues. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(2): 176–194
(孙秋野, 滕菲, 张化光. 能源互联网及其关键控制问题. 自动化学报, 2017, **43**(2): 176–194)
- 5 Ping Zuo-Wei, He Wei, Li Jun-Lin, Yang Tao. Sparse learning for load modeling in microgrids. *Acta Automatica Sinica*, 2020, **46**(9): 1798–1808
(平作为, 何维, 李俊林, 杨涛. 基于稀疏学习的微电网负载建模. 自动化学报, 2020, **46**(9): 1798–1808)
- 6 National Energy Administration of the People's Republic of China. Grid-connected operation of wind power in 2018 [Online], available: http://www.nea.gov.cn/2019-01/28/c_137780779.htm, June 1, 2022
(中华人民共和国国家能源局. 2018 年风电并网运行情况 [Online], available: http://www.nea.gov.cn/2019-01/28/c_137780779.htm, 2022-06-01)
- 7 Energy Research Institute of the National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. China 2050 high renewable energy penetration scenario and roadmap study [Online], available: <https://www.efchina.org/Attachments/Report>, June 1, 2022
(中华人民共和国国家发展和改革委员会能源研究所. 中国 2050 高比例可再生能源发展情景暨路径研究 [Online], available: <https://www.efchina.org/Attachments/Report>, 2022-06-11)
- 8 Partha P, Gehan A J. Optimal power flow solution incorporating stochastic wind and solar power. *Energy Conversion and Management*, 2017, **148**: 1194–1207
- 9 Zhang L D, Yuan Y, Chen B. Cost-benefit analysis method for optimizing spinning reserve requirements with consideration of wind power generation under carbon trading environment. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Energy Internet. Beijing, China: IEEE, 2017. 182–187
- 10 Yang T, Yi X L, Lu S W, Johansson K H, Chai T Y. Intelligent manufacturing for the process industry driven by industrial artificial intelligence. *Engineering*, 2021, **7**(9): 1224–1230
- 11 Qi Bing, Zeng Lu-Kun, Ye Qiu-Zi, Sun Yi, Li Bin, Chen Song-Song, et al. Cooperative control of aggregated loads at demand side for accommodating new energy. *Power System Technology*, 2019, **43**(1): 324–331
(祁兵, 曾璐琨, 叶秋子, 孙毅, 李彬, 陈宋宋, 等. 面向新能源消纳的需求侧聚合负荷协同控制. 电网技术, 2019, **43**(1): 324–331)
- 12 Daraeepour A, Kazempour S J, Pawtinho-echeverr D, Conejo A J. Strategic demand-side response to wind power integration. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, **31**(5): 3495–3505
- 13 National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. Annual data [Online], available: <http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>, June 1, 2022
(中华人民共和国国家统计局. 年度数据查询 [Online], available: <http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>, 2022-06-01)
- 14 Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Ministry of industry and information technology on the issuance of “industrial areas of power demand-side management work guidelines” [Online], available: https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/zh/art/2020/art_8484d825f13548cda4e59007bfb85553.html, June 1, 2022
(中华人民共和国工业和信息化部. 工业和信息化部关于印发《工业领域电力需求侧管理工作指南》的通知 [Online], available: https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/zh/art/2020/art_8484d825f13548cda4e59007bfb85553.html, 2022-06-01)
- 15 Bitaraf H, Rahman S. Reducing curtailed wind energy through energy storage and demand response. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017, **9**(1): 228–236
- 16 Ju Li-Wei, Qin Chao, Wu Hong-Liang, He Pu-Yu, Yu Chao, Tan Zhong-Fu. Wind power accommodation stochastic optimization model with multi-type demand response. *Power System Technology*, 2015, **39**(7): 1839–1846
(鞠立伟, 秦超, 吴鸿亮, 何璞玉, 于超, 谭忠富. 计及多类型需求响应的风电消纳随机优化调度模型. 电网技术, 2015, **39**(7): 1839–1846)
- 17 Kiran B D H, Kumari M S. Demand response and pumped hydro storage scheduling for balancing wind power uncertainties: A probabilistic unit commitment approach. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2016, **81**: 114–122
- 18 Jiang Y B, Xu J, Sun Y Z, Wei C Y, Wang J, Ke D P, et al. Day-ahead stochastic economic dispatch of wind integrated power system considering demand response of residential hybrid energy system. *Applied Energy*, 2017, **190**: 1126–1137
- 19 Tang Yi, Lu Zhen-Zhen, Fu Xiang-Yun. Demand response strategies for promoting consumption of distributed power generation with residential active loads. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, **39**(24): 49–55
(汤奕, 鲁针针, 伏祥运. 居民主动负荷促进分布式电源消纳的需求响应策略. 电力系统自动化, 2015, **39**(24): 49–55)
- 20 Ali M, Degefa M Z, Humayun M, Safdarian A, Lehtonen M. Increased utilization of wind generation by coordinating the demand response and real-time thermal rating. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, **31**(5): 3737–3746
- 21 Zeng B, Zhang J H, Yang X, Wang J H, Dong J, Zhang Y Y. Integrated planning for transition to low-carbon distribution system with renewable energy generation and demand response. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, **29**(3): 1153–1165
- 22 Yang Qing. Power demand response: Seek stillness in movement. *State Grid*, 2017, (1): 48–53
(杨青. 电力需求侧响应: 动中求静. 国家电网, 2017, (1): 48–53)
- 23 Shi Jun-Yi, Wen Fu-Shuan, Cui Peng-Cheng, Sun Lei, Shang Jin-Cheng, He Yang. Intelligent energy management of industrial loads considering participation in demand response program. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, **41**(14): 45–53
(史俊祎, 文福拴, 崔鹏程, 孙磊, 尚金成, 何洋. 参与需求响应的工业用户智能用电管理. 电力系统自动化, 2017, **41**(14): 45–53)
- 24 Ding Hao, Gao Feng, Liu Kun, Guan Xiao-Hong, Wu Jiang. An economic dispatch model in an industrial microgrid with wind power based on robust optimization. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, **39**(17): 160–167
(丁浩, 高峰, 刘坤, 管晓宏, 吴江. 基于鲁棒优化的含风电工业微电网经济调度模型. 电力系统自动化, 2015, **39**(17): 160–167)
- 25 Wang Y, Li L. Time-of-use based electricity demand response for sustainable manufacturing systems. *Energy*, 2013, **63**: 233–244
- 26 Ai Xin, Zhou Shu-Peng, Zhao Yue-Qun. Study on time of use pricing of user side considering wind power uncertainty. *Power System Technology*, 2016, **40**(5): 1529–1535
(艾欣, 周树鹏, 赵阅群. 考虑风电不确定性的用户侧分时电价研究. 电网技术, 2016, **40**(5): 1529–1535)
- 27 Safdarian A, FotuhiFuruzaba M, Lehtonen M. A medium-term decision model for discos: Forward contracting and TOU pricing. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, **30**(3): 1143–1154
- 28 Bitaraf H, Rahman S. Reducing curtailed wind energy through energy storage and demand response. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018, **9**(1): 228–236

- 29 The Preparation Team of "The Textile Industry Energy Management System Implementation Guide". "The textile industry energy management system implementation guide" preparation instructions [Online], available: <https://www.cnis.ac.cn/ynbm/zhfy/bzyjq/gbyjq/201807/P020181229665278846253.pdf>, June 1, 2022
(《纺织行业能源管理体系实施指南》编制小组.《纺织行业能源管理体系实施指南》编制说明 [Online], available: <https://www.cnis.ac.cn/ynbm/zhfy/bzyjq/gbyjq/201807/P020181229665278846253.pdf>, 2022-06-01)
- 30 State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China. The textile industry energy management system implementation guide. GB/T 39973-2021, 2021.
(中华人民共和国国家市场监督管理总局. 纺织行业能源管理体系实施指南. GB/T 39973-2021, 2021.)
- 31 Bouffard F, Galiana F D. Stochastic security for operations planning with significant wind power generation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2008, **23**(2): 306–316
- 32 Santamariaban G, Reyesballesteros A, Gershenson C. Wind speed forecasting for wind farms: A method based on support vector regression. *Renewable Energy*, 2016, **85**: 790–809
- 33 Zhao M, Chen Z, Blaabjer F. Probabilistic capacity of a grid connected wind farm based on optimization method. *Renewable Energy*, 2006, **31**: 2171–2187
- 34 Fu Y, Li Z, Wu L. Modeling and solution of the large-scale security-constrained unit commitment. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, **28**(4): 3524–3533
- 35 Li Zhi, Han Xue-Shan, Yang Ming, Lei Yu, Kang Kai. Power system dispatch considering wind power grid integration. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, **34**(19): 15–19
(李智, 韩学山, 杨明, 雷宇, 康凯. 计及接纳风电能力的电网调度模型. 电力系统自动化, 2010, **34**(19): 15–19)



李远征 华中科技大学人工智能与自动化学院副教授. 主要研究方向为人工智能及其在智能电网中的应用, 深度学习, 强化学习和大数据分析.

E-mail: yuanyzheng_li@hust.edu.cn

(**LI Yuan-Zheng** Associate professor at the School of Artificial Intelligence and Automation, Huazhong University of Science and Technology. His research interest covers artificial intelligence and its application in smart grid, deep learning, reinforcement learning, and big data analysis.)



倪质先 华中科技大学中欧清洁与可再生能源学院硕士研究生. 2019 年获得武汉理工大学自动化专业学士学位. 主要研究方向为含大规模可再生能源综合电力系统规划、优化及调度.

E-mail: zhixian_ni@hust.edu.cn

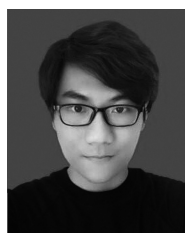
(**NI Zhi-Xian** Master student at China-EU Institute for Clean and Renewable Energy, Huazhong University of Science and Technology. He received his bachelor degree in automation from Wuhan University of Technology in 2019. His research interest covers planning, optimization and scheduling of integrated power systems containing large-scale renewable energy sources.)



段钧韬 华中科技大学人工智能与自动化学院硕士研究生. 主要研究方向为智能电网控制调度, 分布式控制与优化.

E-mail: duanjuntao1@outlook.com

(**DUAN Jun-Tao** Master student at the School of Artificial Intelligence and Automation, Huazhong University of Science and Technology. His research interest covers smart grid control and scheduling, distributed control and optimization.)



徐磊 东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室博士研究生. 主要研究方向为分布式控制及优化, 网络化系统和马尔科夫跳变系统.

E-mail: 2010345@stu.neu.edu.cn

(**XU Lei** Ph.D. candidate at the State Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University. His research interest covers distributed control and optimization, networked systems, and Markovian jump systems.)



杨涛 东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室教授. 主要研究方向为工业人工智能, 信息物理系统, 分布式协同控制和优化. 本文通信作者.

E-mail: yangtao@mail.neu.edu.cn

(**YANG Tao** Professor at the State Key Laboratory of Synthetical Automation for Processes Industries, Northeastern University. His research interest covers industrial artificial intelligence, information physical systems, and distributed cooperative control and optimization. Corresponding author of this paper.)



曾志刚 华中科技大学人工智能与自动化学院教授. 主要研究方向为切换系统控制理论与应用, 计算智能, 系统稳定性和联想记忆.

E-mail: zgzung@hust.edu.cn

(**ZENG Zhi-Gang** Professor at the School of Artificial Intelligence and Automation, Huazhong University of Science and Technology. His research interest covers switching system control theory and application, computational intelligence, system stability, and associative memory.)