

Multi-Objective Optimization Method for Source-Load Coordination Dispatch Considering Demand Response

Wanqi Li¹, Wenying Liu¹, Weizhou Wang², Runqing Bai²

¹School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electrical Power University, Beijing

²State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou Gansu

Email: wanqi72@163.com

Received: Nov. 7th, 2019; accepted: Nov. 22nd, 2019; published: Nov. 29th, 2019

Abstract

With the large-scale wind power connection to the grid, the randomness and volatility of wind power bring new challenges to the system peaking. The traditional dispatch mode of conventional power supply alone cannot meet the scheduling requirements of wind power grid-connected, and wind power consumption is severely limited. To solve the problem of wind power consumption, it is necessary to fully excavate the adjustment capabilities on the load side. In this paper, the energy intensive load with good regulation characteristics is included in the demand response. Firstly, different demand response mechanisms are used to stimulate the energy intensive load of different regulation characteristics. Secondly, aiming at the minimum operating cost of the system and the minimum abandoned wind power, a multi-objective optimization model of source-load coordinated scheduling considering demand response is established. To solve this model, the multiple objectives are transformed into a single objective through defining the objective membership function and the maximized satisfaction index method, and solving with CPLEX. Finally, an example is given to verify that the proposed method can improve the system's wind power consumption level and reduce the operating cost of the system.

Keywords

Wind Power Consumption, Energy Intensive Load, Demand Response, Source-Load Coordination, Multi-Objective Optimization

考虑需求响应的源荷协调调度多目标优化方法

李宛齐¹, 刘文颖¹, 王维洲², 拜润卿²

¹华北电力大学电气与电子工程学院, 北京

²国网甘肃省电力公司, 甘肃 兰州

Email: wanqi72@163.com

收稿日期: 2019年11月7日; 录用日期: 2019年11月22日; 发布日期: 2019年11月29日

摘要

大规模风电接入电网后, 风电的随机性和波动性给系统调峰带来了新的挑战, 仅依靠常规电源的传统调度模式已不能满足风电并网的调度需求, 风电消纳受到严重的限制。为了解决风电消纳的难题, 需要充分挖掘负荷侧的调节能力。本文将具有良好调节特性的高载能负荷纳入需求响应, 首先利用不同的需求响应机制对不同调节特性的高载能负荷进行激励, 其次以系统运行成本最小和弃风功率最小为目标, 建立考虑需求响应的源荷协调调度多目标优化模型。通过定义目标隶属度函数和最大化满意度指标法将所构建的多目标优化问题转化为单目标优化问题, 并利用CPLEX进行求解, 最后通过算例分析验证了论文所提方法可提升系统风电消纳的水平, 并降低了系统运行成本。

关键词

风电消纳, 高载能负荷, 需求响应, 源荷协调, 多目标优化

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

风电出力的波动性、随机性和反调峰等特性增加了电网调度的难度, 风电并网消纳问题日益突出。为了解决风电消纳的难题, 需要挖掘更多的可调节资源, 在发电侧资源有限的现状下, 将负荷侧资源纳入需求响应, 实现源荷协调调度, 能够有效缓解风电接入给电网带来的调度压力。

国内外对高载能负荷参与的源荷协调调度进行了相关研究。文献[1]提出了“源-网-荷”互动运行控制理论和技术总体框架; 文献[2][3]通过算例表明高载能负荷参与“荷-网-源”协调调度能够降低系统总发电成本, 提高系统消纳风电的能力; 文献[4]对碳化硅、电解铝和铁合金进行了精细化建模, 提出了基于能源互联网用户核心理念的高载能-风电协调调度策略。上述研究一方面未考虑高载能负荷的不同调节特性, 不能充分利用负荷的调节能力。另一方面, 仅从电网调度层面上研究了高载能负荷参与源荷协调控制的调节潜力, 认为高载能负荷直接受电网调控, 实际上, 高载能负荷并不能直接参与电网调节, 需要通过需求响应等措施来达到源荷协调控制的目的。

在利用需求响应促进风电消纳方面, 国内外学者已经开展了部分研究工作。文献[5]分析了电价对用户需求的影响, 建立了实时电价机制下的负荷模型; 文献[6]提出了一种考虑需求响应的电力系统优化调度方法; 文献[7]在含风电电力系统中计及用户侧互动进行日前调度和运行模拟研究, 研究结果表明需求响应提高了风能的利用效率; 文献[8]通过优化电动汽车充放电时间的方法提高风电消纳水平, 建立计及需求响应的风电-电动汽车协同调度的多目标优化模型。在以上对需求响应的研究中, 大多考虑分布式、小容量的负荷, 鲜有对基于需求响应的大容量高载能负荷参与源荷协调调度的研究。文献[9]以提高风电消纳能力为目标建立了高载能用户错峰峰谷电价决策模型, 但文中未考虑如何进行常规电源与高载能负荷的协调控制。

本文在上述研究的基础上, 考虑高载能负荷的不同调节特性, 分别基于电价和激励机制引导负荷对调度需求进行响应调节, 建立考虑需求响应的源荷协调调度多目标优化模型, 算例结果表明, 论文所提方法在提高风电消纳能力的同时, 减小了系统的运行成本。

2. 源荷协调调度特性分析

高载能负荷调节特性分析

高载能负荷是指能源价值占总价值比例达到 30%以上的用户负荷[10], 具有响应速度快、调节范围大等特点。根据调节特性, 高载能负荷分为可连续调节负荷和可离散调节负荷。

1) 可离散调节负荷

可离散调节负荷指在生产过程中不能连续调节, 调节操作需要保持几个调节时段的负荷。这类负荷调节频率不易过高, 每次调节有功率稳定时长要求, 且有最大调节次数限制。典型的可离散调节负荷包括电解铝、碳化硅等。某电解铝厂典型运行曲线如图 1 所示。

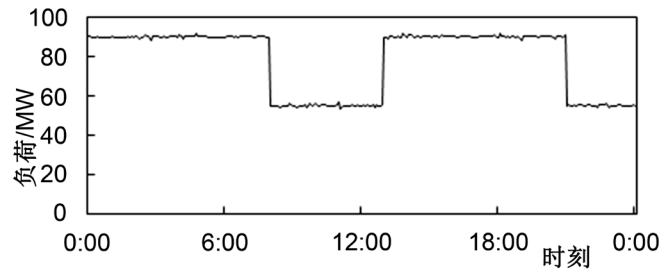


Figure 1. Actual curve of discretely adjustable intensive energy load
图 1. 可离散调节负荷运行曲线

可离散调节负荷的调节约束包括调节功率约束、功率稳定时长约束和调节次数约束, 可表示为:

a) 调节功率约束

$$\alpha_k^t \Delta P_{DL,k,\min} \leq \Delta P_{DL,k}^t \leq \alpha_k^t \Delta P_{DL,k,\max} \quad (1)$$

式中, α_k^t 为可离散调节负荷的调节状态, $\alpha_k^t = 1$ 表示参与调节, $\alpha_k^t = 0$ 则反之; $\Delta P_{DL,k}^t$ 为可离散调节负荷 k 在 t 时刻的调节功率; $\Delta P_{DL,k,\max}$ 和 $\Delta P_{DL,k,\min}$ 分别为可离散调节负荷 k 调节功率的上、下限。

b) 功率稳定时长约束

$$\sum_{t=t}^{t+T_{DL,k,\text{on}}^{\min}-1} \alpha_k^t \leq 1 \quad (2)$$

式中, $T_{DL,k,\text{on}}^{\min}$ 为可离散调节负荷 k 最小功率稳定时长, 该式表示可离散调节负荷 k 在 $T_{DL,k,\text{on}}^{\min}$ 时间内最多只能调节一次。

c) 调节次数约束

$$0 \leq \sum_{t=1}^T |\alpha_k^{t+1} - \alpha_k^t| \leq N_{k,\max} \quad (3)$$

式中, $N_{k,\max}$ 为可离散调节负荷 k 允许的最大调节次数。

2) 可连续调节负荷

可连续调节负荷是指可以在一定范围内连续调节, 没有稳定功率时长要求的负荷。这类负荷能够为系统提供旋转备用, 主要指铁合金负荷等。铁合金生产线的启停成本较高, 一般都不间断, 因此不易参

与离散调节。但在生产过程中负荷可以承受一定程度的波动，具有连续调节能力。某铁合金厂典型运行曲线如图2所示。

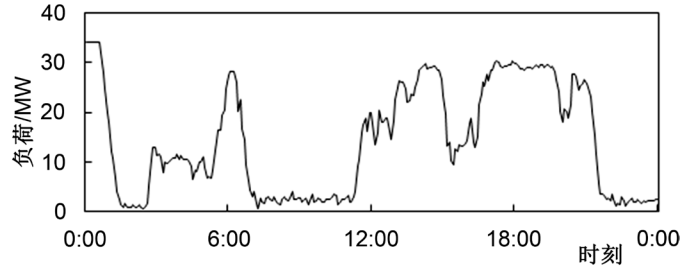


Figure 2. Actual curve of continuously adjustable intensive energy load
图2. 可连续调节负荷运行曲线

因可连续调节负荷调节较为灵活，只需要考虑调节功率约束，可表示为：

$$\beta_j^t \Delta P_{SL,j,\min} \leq \Delta P_{SL,j}^t \leq \alpha_j^t \Delta P_{SL,j,\max} \quad (4)$$

式中， β_j^t 为可连续调节负荷的调节状态， $\beta_j^t = 1$ 表示参与调节， $\beta_j^t = 0$ 则反之； $\Delta P_{SL,j}^t$ 为可连续调节负荷 j 在 t 时刻的调节功率； $\Delta P_{SL,j,\max}$ 和 $\Delta P_{SL,j,\min}$ 分别为可连续调节负荷 j 调节功率的上、下限。

3. 高载能负荷需求响应模型

3.1. 高载能负荷需求响应方法

结合源荷协调调度特性，本文中采取的需求响应模式为：可连续调节负荷采取基于电价机制的需求响应模式，即系统根据次日风电预测和负荷预测值生成合理的实时电价曲线，可连续调节负荷响应实时电价曲线调节用电功率；可离散调节负荷采取基于激励机制的需求响应模式，即企业与电力公司提前签订电量合同，约定增减用电负荷电量大小及补偿标准等。

3.2. 基于实时电价的需求响应建模

可连续调节负荷用电功率对电价较敏感，为了量化负荷用电功率对实时电价的响应，利用弹性矩阵来表征负荷的电价需求弹性[11]。弹性矩阵指电价的相对变动引起负荷用电功率的相对变动，弹性系数如式(5)所示[12]：

$$\varepsilon_{it} = \frac{\Delta P_{SL,j}^t / P_{SL0,j}^t}{\Delta l_t / l_t} \quad (5)$$

式中， ε_{it} 为自弹性系数； $P_{SL0,j}^t$ 为 t 时段可连续调节负荷 j 的初始用电功率； l_t 为 t 时段用电负荷的初始电价； Δl_t 为 t 时段的电价变化量。

记可连续调节负荷需求响应前后电网在 t 时段的售电收入分别为 $C_{pre,t}$ 和 $C_{after,t}$ ，表达式为：

$$C_{pre,t} = P_{SL0,j}^t \cdot l_t \quad (6)$$

$$C_{after,t} = (P_{SL0,j}^t + \Delta P_{SL,j}^t) \cdot (l_t + \Delta l_t) \quad (7)$$

可连续调节负荷的响应成本 $C_{cost,SL}$ 即为可连续调节负荷参与需求响应前后电网售电收入的变化：

$$C_{cost,SL} = C_{pre,t} - C_{after,t} = \sum_{j=1}^{N_{SL}} \sum_{t=1}^T \left[\frac{l_t}{\varepsilon_{it} P_{SL0,j}^t} (\Delta P_{SL,j}^t)^2 + \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_{it}} \right) \Delta P_{SL,j}^t \right] \quad (8)$$

式中, N_{SL} 为可连续调节负荷总数; T 为调度时段总数。由式(8)可知 $C_{\text{cost,SL}}$ 是 $\Delta P'_{SL,j}$ 的二次函数。

3.3. 基于激励机制的需求响应建模

基于激励的可离散调节高载能负荷通过与电力公司提前签订电量合同, 由调度中心直接控制。高载能负荷获得补偿一般有两种方式: 一是独立于现有电价政策的直接补偿; 二是在现有电价基础上给予折扣优惠。本文中采用折扣电价的方式对可离散调节负荷进行补偿。

可离散调节负荷的补偿成本 $C_{\text{cost,DL}}$ 可表示为:

$$C_{\text{cost,DL}} = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{N_{DL}} \gamma_t \alpha'_k Q'_{DL,k} \quad (9)$$

式中, N_{DL} 为可离散调节负荷总数; γ 为可离散调节负荷的电价折扣率; $Q'_{DL,k}$ 为 t 时段可离散调节负荷 k 的用电量。

4. 考虑需求响应的源荷协调调度多目标优化模型

4.1. 目标函数

模型的目标函数包括系统总运行成本最小和弃风功率最小。

1) 系统总运行成本最小

系统总运行成本 F_1 包括: 常规电源的发电成本、可连续调节负荷的调度成本和可离散调节负荷的补偿成本。表达式为:

$$\min F_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} \left[U'_{Gi} f_{Gi}(P'_{Gi}) + S'_{Gi} \right] + C_{\text{cost,DL}} + C_{\text{cost,SL}} \quad (10)$$

式中, N_G 为常规电源总数; P'_{Gi} 为常规电源 i 在 t 时刻的有功出力; $f_{Gi}(P'_{Gi}) = a_i P'^2_{Gi} + b_i P'_{Gi} + c_i$ 为常规电源 i 在 t 时刻的燃料成本, 其中 a_i 、 b_i 、 c_i 为常规电源 i 的燃料成本参数; U'_{Gi} 为常规电源 i 在 t 时刻的启停状态变量, $U'_{Gi} = 1$ 表示开机, $U'_{Gi} = 0$ 表示停机; S'_{Gi} 为常规电源 i 在 t 时刻的启停成本。

2) 弃风功率最小

考虑到风电消纳效益, 建立各个时刻弃风功率最小的目标函数。

$$\min F_2 = \sum_{w=1}^{N_W} (P'_{W\text{forecast},w} - P'_{W\text{plan},w}) \quad (11)$$

式中, N_W 为风电场个数; $P'_{W\text{forecast},w}$ 为风电场 w 在 t 时刻的风电预测功率; $P'_{W\text{plan},w}$ 为风电场 w 在 t 时刻的有功计划出力。

4.2. 约束条件

1) 功率平衡约束

$$\sum_{w=1}^{N_W} P'_{W\text{plan},w} + \sum_{i=1}^{N_G} U'_{Gi} P'_{Gi} = \sum_{j=1}^{N_{SL}} P'_{SL,j} + \sum_{k=1}^{N_{DL}} P'_{DL,k} + P'_L \quad (12)$$

式中, $P'_{SL,j}$ 为可连续调节负荷在 t 时刻的用电功率; $P'_{DL,k}$ 为可离散调节负荷 k 在 t 时刻的用电功率; P'_L 为 t 时刻系统负荷预测值。

2) 风电出力约束

$$0 \leq P'_{W\text{plan},w} \leq P'_{W\text{forecast},w} \quad (13)$$

3) 电源约束包括出力约束、爬坡率约束、旋转备用约束和最小持续开机/停机时间约束, 与文献[10]中的式(8)~式(10)一致, 此处不再赘述。

4) 高载能负荷约束

可离散调节负荷的约束如式(1)~(3)所示, 可连续调节负荷的约束如式(4)所示, 考虑到高载能企业参与调节的积极性, 应保证可连续调节负荷参与需求响应后电费支出不大于响应前, 即:

$$C_{\text{cost,SL}} \geq 0 \quad (14)$$

5) 电价调整约束

$$\Delta l_{\min} \leq \Delta l_t \leq \Delta l_{\max} \quad (15)$$

式中, Δl_{\max} 和 Δl_{\min} 分别为电价变化量上、下限。将式(5)代入式(15)可将电价变化量约束变为对可连续调节负荷调节功率的约束:

$$\beta_j^t \frac{\Delta l_{\min} \varepsilon_{it} P_{\text{SL}0,j}^t}{l_t} \leq \Delta P_{\text{SL},j}^t \leq \beta_j^t \frac{\Delta l_{\max} \varepsilon_{it} P_{\text{SL}0,j}^t}{l_t} \quad (16)$$

综上所述, 本文建立的荷源协调调度多目标优化模型为:

$$\begin{cases} \min F = \{F_1, F_2\} \\ \text{s.t.} \begin{cases} h_i(X) = 0, & i = 1, 2, \dots, p \\ g_j(X) \leq 0, & j = 1, 2, \dots, q \end{cases} \end{cases} \quad (17)$$

式中, F 为目标函数, 以系统总成本 F_1 最小和各时刻弃风功率 F_2 最小为目标, 分别如式(10)和式(11)所示; $X = [U_{Gi}^t, P_{Gi}^t, \Delta P_{\text{SL},j}^t, \Delta P_{\text{DL},k}^t, \alpha_k^t, \beta_j^t]$ 为决策变量; $h_i(X)$ 为等式约束; $g_j(X)$ 为不等式约束。

5. 荷源协调调度优化模型求解

本文选用模糊数学的方法来解决多目标优化问题。求解思路为: 先求出各子目标在约束条件下的最优解, 再利用这些最优解通过隶属度函数将子目标函数模糊化, 最后求取使交集的隶属度函数最小的解, 这样即可将多目标问题转化为单目标问题。

由于本文中目标函数最大值在实际工程中毫无意义, 选取降半 Γ 形分布为隶属度函数。对于本文中两个目标函数, 定义第 i 个目标函数 F_i 的隶属度为 λ_i , 如式(18)所示:

$$\lambda_i = \begin{cases} 1 & x \leq F_{i\min} \\ \frac{F_{i\min} - F_i}{F_{i\min}} & x > F_{i\min} \end{cases} \quad (18)$$

式中, $F_{i\min}$ 分别表示单独考虑第 i 个目标函数的最小值。在式(18)中, $\lambda_i = 0$ 表示对第 i 个目标函数值完全不满意, $\lambda_i = 1$ 表示对第 i 个目标函数值完全满意。

子优化目标模糊化后, 定义满意度指标 μ 为相应隶属度中的最小值, 即:

$$\mu = \min \{\lambda_1, \lambda_2\} \quad (19)$$

则源荷协调调度多目标模型变为:

$$\max \mu \quad (20)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} F_{1\min} \leq F_1 \\ F_{2\min} \leq F_2 \\ 0 \leq \mu \leq 1 \end{cases} \quad (21)$$

至此, 式(1)~式(4)、式(10)~式(16)与式(18)~式(21)构成了源荷协调调度模型。

对模型多目标进行模糊化处理, 用 MATLAB 编程, 采用商业求解器 CPLEX 对模型进行求解。

6. 算例分析

6.1. 算例

选取包含 6 台常规电源和 1 个风电场的系统进行仿真, 对所提出的考虑需求响应的源荷协调调度多目标优化方法进行验证。常规电源的运行参数取自文献[13]。负荷所需正旋转备用、负旋转备用分别为系统负荷的 8%和 2%, 风电所需的正、负旋转备用为风电出力的 15%。弹性系数 $\varepsilon_H = -0.3$, 取自文献[14]。实际负荷的弹性系数还需通过调研得到。高载能负荷的原始电价为 410 元/(MW·h)。可离散调节负荷的电价折扣率为 50%。系统的负荷预测和风电预测数据如图 3 所示。

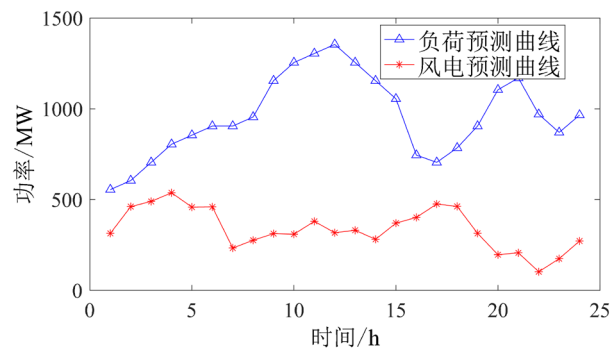


Figure 3. Prediction curve of wind power and load
图 3. 风电和负荷预测曲线

高载能负荷调节参数如表 1 所示, 其中电解铝和碳化硅为可离散调节负荷, 铁合金为可连续调节负荷。

Table 1. Parameters of high energy load
表 1. 高载能负荷参数

高载能负荷	Pmax/MW	Pmin/MW	功率稳定时长/h	最大调节次数	单位调节成本 (元/(MW·h))
电解铝	65	13	3	6	180
碳化硅	35	0	3	4	70
铁合金	40	8	-	-	200

为了比较说明不同需求响应模式对调度计划的影响, 选取 4 种调度模式进行对比分析, 模式定义为:
1) 模式 1: 只考虑发电侧资源的传统调度模式; 2) 模式 2: 引入基于激励的可离散调节负荷调度模式;
3) 模式 3: 引入基于电价的可连续调节负荷调度模式; 4) 模式 4: 引入基于电价响应的可连续调节负荷和基于激励的可离散调节负荷调度模式。

6.2. 结果分析

图 4 为四种模式下等效负荷曲线对比。可以看出, 与模式 1 相比, 模式 2、模式 3 和模式 4 均补偿了负荷低谷期的用电功率缺额, 模式 4 将基于电价和基于激励的需求响应两者相结合的效果最好, 因此本文所提多目标优化方法能够最大程度补偿用电功率缺额, 有效提升了等效负荷低谷期负荷曲线的高度, 缓解了常规电源的调节压力。

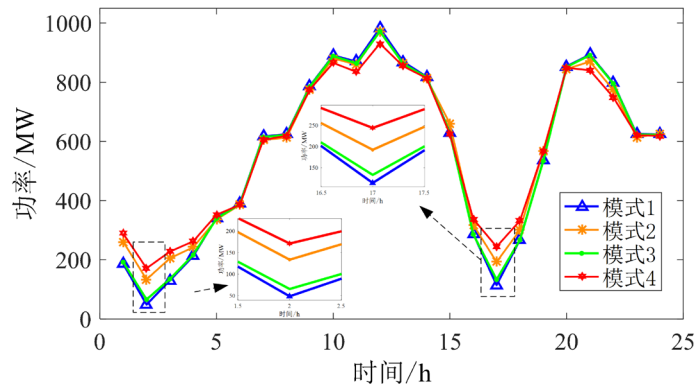


Figure 4. Equivalent load curve under different dispatching modes
图 4. 不同模式下等效负荷曲线

图 5 为四种模式下弃风曲线对比。可以看出, 模式 1 机组受到最小启停时间和最小技术出力的约束, 灵活调节能力有限, 在风电大发的时段(1~4 时段和 16~20 时段)存在大量的弃风, 弃风电量为 1805.3 MW·h, 弃风率为 21.84%; 考虑需求响应后, 模式 2、模式 3 和模式 4 的弃风电量分别降为 293.28 MW·h、588.30 MW·h 和 253.04 MW·h, 与模式 1 相比分别降低了 83.75%、67.41%和 85.98%。模式 4 弃风电量最小, 验证了本文所提方法能够最大程度地提高风电消纳水平。

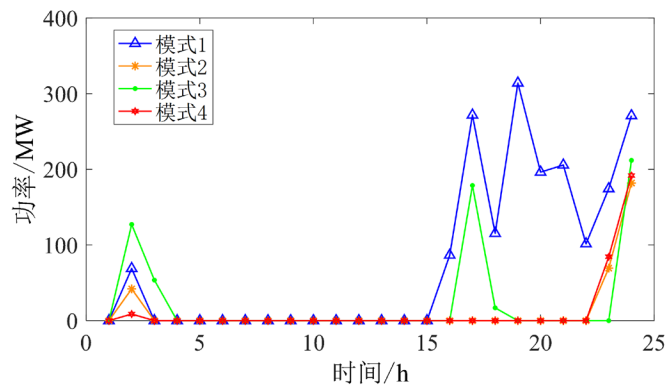


Figure 5. Abandoned wind curve under different dispatching modes
图 5. 不同模式下弃风曲线

表 2 为 4 种模式下的成本对比, 通过分析可知: 模式 4 总成本最低且弃风电量最小。将基于电价的可连续调节负荷和基于激励的可离散调节负荷共同纳入调度能够最大程度地减小系统的弃风电量, 降低系统总运行成本。因此, 本文提出的源荷协调调度优化方法经济性最好且弃风电量最小。

Table 2. Cost comparison of four scheduling modes
表 2. 4 种模式下成本对比

模式	模式 1	模式 2	模式 3	模式 4
总成本/元	2,032,000	1,857,400	1,848,700	1,845,300
常规电源发电成本/元	2,032,000	1,777,300	1,840,500	1,777,300
可离散调节负荷调节成本/元	-	80,038	-	51,585
可连续调节负荷调节成本/元	-	-	8245.1	16,385

7. 结论

在含风电系统的调度问题中, 针对常规电源调峰能力不足导致弃风的难题, 本文将高载能负荷纳入需求响应, 根据高载能负荷的不同调节特性, 综合考虑了基于电价和基于激励的需求响应机制, 建立了考虑需求响应的源荷协调调度多目标优化模型, 提出了一种考虑需求响应的源荷协调调度多目标优化方法, 并进行了算例仿真。结果表明, 本文所提方法能够有效地促进风电消纳, 减小系统的运行成本。

基金项目

国家科技支撑计划(2015BAA01B04); 国家电网公司科技项目(52272216002D)。

参考文献

- [1] 姚建国, 杨胜春, 王珂, 杨争林, 宋晓芳. 智能电网“源-网-荷”互动运行控制概念及研究框架[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(21): 1-6+12.
- [2] 李明, 杨烈奎, 王维洲, 等. 针对甘肃电网的高载能企业参与可再生能源消纳“荷-网-源”协调控制[J]. 中国电力, 2015, 48(12): 115-121.
- [3] 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.
- [4] 晋宏杨, 孙宏斌, 郭庆来, 等. 基于能源互联网用户核心理念的高载能-风电协调调度策略[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 139-145.
- [5] Palensky, P. and Dietrich, D. (2011) Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 7, 381-388. <https://doi.org/10.1109/TII.2011.2158841>
- [6] Zhao, C., Wang, J., Watson, J.P. and Guan, Y. (2013) Multi-Stage Robust Unit Commitment Considering Wind and Demand Response Uncertainties. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28, 2708-2717. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2244231>
- [7] 杨楠, 王波, 刘涤尘, 赵洁, 王贺. 计及大规模风电和柔性负荷的电力系统供需侧联合随机调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 63-69+17.
- [8] 侯建朝, 胡群丰, 谭忠富. 计及需求响应的风电-电动汽车协同调度多目标优化模型[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(7): 22-27.
- [9] 崔强, 王秀丽, 王维洲. 考虑风电消纳能力的高载能用户错峰峰谷电价研究[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 946-952.
- [10] 朱丹丹, 刘文颖, 蔡万通, 等. 风电消纳目标下基于电量与功率滚动优化的荷源控制方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(5): 80-85.
- [11] 秦祯芳, 岳顺民, 余贻鑫, 等. 零售端电力市场中的电量电价弹性矩阵[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(5): 16-19.
- [12] 艾欣, 刘晓. 基于需求响应的风电消纳机会约束模型研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2011, 38(3): 17-22.
- [13] Ting, T.O., Rao, M.V.C. and Loo, C.K. (2006) A Novel Approach for Unit Commitment Problem via an Effective Hybrid Particle Swarm Optimization. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21, 411-418. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2005.860907>
- [14] King, C. and Chatterjee, S. (2003) Predicting California Demand Response. *Public Utilities Fortnightly*, 141, 27-32.