

DOI: 10.7667/PSPC171229

计及可转移负荷的含风电场日前调度模型

于娜, 李伟蒙, 黄大为, 陈厚合, 李国庆

(东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 风电的高渗透率给电力系统运行带来了一系列复杂的问题, 需求响应(Demand Response, DR)项目的实施成为应对这些问题的有效途径。为此, 对可转移负荷的特性进行了研究, 构建了可转移负荷的模型, 并将其融入到含风电场的前日调度中, 以提高调度的灵活性。在研究可转移负荷特性的基础上, 综合考虑用户参与 DR 项目的水平对风电利用率和系统运行的影响, 以火电机组运行成本、环境成本以及激励成本总和最小为目标函数, 建立日前调度优化模型, 并用商业软件 CPLEX 对模型进行求解。算例分析结果表明, 激励用户转移负荷的 DR 能够降低系统运行成本, 减少火电机组污染气体排放, 改善负荷曲线, 提高风电利用率。

关键词: 需求响应; 可转移负荷; 风电; 日前调度

Day-ahead scheduling model in wind power integrated system incorporating shiftable load

YU Na, LI Weimeng, HUANG Dawei, CHEN Houhe, LI Guoqing

(School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: The high penetration of the wind energy raises a series of complicated issues. The implementation of Demand Response (DR) project is an effective way to deal with these issues. Hence, in this paper, the characteristics of shiftable load are studied, and the shiftable load model is built and incorporated into the scheduling with wind farm to improve the flexibility. On the basis of studying the shiftable load characteristics, considering the influence of the customer's participation levels in the DR project on the utilization of wind power and the system operation, the scheduling optimization model is established with the minimum the sum of operating cost, environmental cost of the thermal power unit and incentive cost, the model is solved by the commercial software CPLEX. The results of case study show that the DR can decrease the operating cost, reduce the pollutant discharge of the thermal power unit, perfect the load curve and improve the wind power utilization percentage.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51307019, No. 51377016, and No. 51477027).

Key words: demand response; shiftable load; wind power; day-ahead scheduling

0 引言

近年来,以风电为代表的可再生能源发展迅猛,可再生能源输出功率的不确定性给电力系统的运行调度带来巨大挑战^[1-2]。随着可再生能源发电渗透率不断提升,如何充分利用发电侧与需求侧的可调节资源实现电力系统经济性与环保性的多元协调调度

成为当今的研究热点之一。DR 作为电力市场环境下的重要的零排放柔性资源,能有效改善负荷需求分布,优化资源配置,是适应可再生能源不确定性,解决系统灵活性调度问题的有效途径。

DR 项目分为两大类^[3]: 基于价格的 DR 和基于激励的 DR。DR 的实施和发展大致分为人工阶段、半自动阶段和全自动阶段 3 个阶段^[4]。美国的自动需求响应(Automated Demand Response, ADR)系统的迅速发展极大提高了需求侧资源的利用效率,确保了 DR 实施的可靠性和灵活性^[5]。日本与德国也积极开展了 DR 示范验证项目,但其发展水平仍处于人工或半自动阶段。为支持 DR 的发展,我国政

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51307019, 51377016, 51477027); 长江学者和创新团队发展计划项目资助(IRT1114); 吉林省科技发展计划项目资助(20130102026JC, 20140101210JC)

府也相继出台了《电力需求侧管理办法》、《电网企业实施电力需求侧管理目标责任考核方案》等政策性文件^[6]。在价格 DR 方面,构建了包括阶梯电价、分时电价、尖峰电价等多种类型电价的体系结构;在激励 DR 方面,部分省市亦制定了直接负荷控制和可中断负荷补偿政策。

开展 DR 项目的关键在于负荷的响应特性,具有可调节性的负荷大致可分为以下三类^[7]: 1) 可中断负荷,根据需要可对用电量进行全部或部分削减,主要为高耗能大工业负荷; 2) 可转移负荷,一个调度周期内总用电量不变,但各时段的用电量可在一定范围内灵活调节,主要参与对象为大、中型工商业用户; 3) 可平移负荷,受生产工艺或工序约束,只能将用电曲线整体平移,如工业流水线设备。用户根据自身 DR 特性,可以参与电力系统不同时间尺度的调控^[8]。

国内外针对不同目的对 DR 已进行了大量研究。比如 DR 的经济性评估,目的是找出 DR 缓解风电间歇性影响的公允价值^[9-10]。文献[11]分别将削峰和需求转移两个方案与机组组合问题相结合,分析了 DR 对风电高渗透运行和系统运行成本节约的影响。文献[12]建议在日前网络约束市场出清制度中考虑 DR,所建模型可增加负荷曲线的灵活性和减少对火电机组爬坡的依赖性。生物柴油发动机可用于补偿间歇式风能^[13]。在高风电渗透下,实时电价可用于降低再调度成本和减少切负荷事件^[14-15]。文献[16]分析了不同类型负荷对电价的响应特性,目的是挖掘不同负荷的需求响应能力。针对含有可再生能源渗透的虚拟电厂,DR 交易可促进分布式可再生能源的消纳,提高虚拟电厂的效益^[17]。

针对高风电渗透率对调度的影响,本文将 DR 融入含风电场日前调度中,对可转移负荷的特性进行研究,并构建可转移负荷模型,从用户参与 DR 的水平、风电渗透率水平、系统运行经济性和环保性的角度出发,建立日前调度模型,利用可转移负荷实现提高调度灵活性、协调风电上网、削峰填谷的目的。

1 可转移负荷特性分析

居民用户、工业用户、商业用户中都有一定的可转移负荷。居民用户的可转移负荷主要包括洗衣机、洗碗机、热水器和空调,居民可通过调整家用电器的使用时间来进行负荷转移,比如在低谷时段运行洗衣机、洗碗机等。具有可转移负荷的工业用户主要分为三类^[18-19]: 1) 高耗能企业,这类企业为主要的可转移负荷用户,由于用电量,其转移负荷行为对系统的贡献是非常巨大的,在合适的 DR

激励下,高耗能企业可将大部分生产安排在夜间进行; 2) 冶金、机械、纺织等三班制企业,由于这类企业的生产任务是连续的,所以只需在不影响整体生产流程的前提下在一定时间范围内转移部分负荷,即可实现错峰用电,例如水泥行业可在低谷时段进行磨粉作业,而在高峰时段利用储料仓的原料,但这类企业转移负荷的能力有限; 3) 管理比较灵活的私人 and 个体企业,虽然用电量相对较少,但由于管理灵活,可自由调整其可转移负荷; 商业用户由于行业性质,转移负荷能力不大,但仍具有负荷转移潜力。比如上海地区商业负荷中中央空调负荷大约占了总负荷的 50%,而中央空调可采用冰蓄冷空调,从而可以实现负荷的转移。

DR 项目的实施如分时电价,通过高峰时段实行高电价,低谷时段实行低电价可以实现负荷的转移。实施 DR 项目后,用户每个时段的负荷为原始负荷加增长的负荷,然后减降低的负荷,可用式(1)表示。

$$D_{j,t}^{\text{new}} = D_{j,t}^{\text{dold}} + D_{j,t}^{\text{u}} - D_{j,t}^{\text{d}} \quad (1)$$

式中: $D_{j,t}^{\text{new}}$ 表示 j 用户 t 时段实施 DR 项目后的总负荷需求; $D_{j,t}^{\text{dold}}$ 表示 j 用户 t 时段实施 DR 项目前的总负荷需求; $D_{j,t}^{\text{u}}$ 表示 j 用户 t 时段增负荷量; $D_{j,t}^{\text{d}}$ 表示 j 用户 t 时段减负荷量。

通常总负荷需求取决于用户消耗电能的生活需求和生产任务,在负荷转移的方式下,用户无需降低生活需求或中断生产任务,只需改变电能使用的时间,保持周期内总用电量不变,从而使生活需求和生产总量不受影响。根据以往的研究,增加和减少的负荷需求具有以下两个限制: 1) 在一个周期内(特指一个工作日内),用户总用电量不变,即负荷增加量与负荷减少量需达到平衡,用式(2)表示; 2) 任何用户都存在一定的不可控的基础负荷,只有部分负荷可以调控,即用户每个时段的增负荷量和减负荷量都有一定的限制,由式(3)和式(4)表示。

$$\sum_{i=1}^{N_T} D_{j,t}^{\text{u}} = \sum_{i=1}^{N_T} D_{j,t}^{\text{d}} \quad (2)$$

$$0 \leq D_{j,t}^{\text{u}} \leq \lambda_{j,t}^{\text{u}} \quad (3)$$

$$0 \leq D_{j,t}^{\text{d}} \leq \lambda_{j,t}^{\text{d}} \quad (4)$$

式中: L_t 为周期内的时段数; $\lambda_{j,t}^{\text{u}}$ 和 $\lambda_{j,t}^{\text{d}}$ 分别表示 j 用户在 t 时段最大允许增/减负荷量。

2 考虑可转移负荷特性的含风电场日前调度模型

风电出力与风速直接相关,随机性较大,仅依

靠常规火电机组难以应对这种波动给电力系统运行调度带来的一系列问题。当风电渗透率和负荷峰谷差较大时, 由于火电机组的频繁启停, 将影响电网运行的经济性, 严重时还将影响电网运行的安全性。因此, 为了应对负荷和风电的瞬时波动, 需充分调动需求侧资源, 协调优化资源配置, 增加系统调度的灵活性。

2.1 目标函数

火电机组的运行成本主要包括发电成本和启动成本, 忽略风电的运行成本。同时火电机组利用化石能源发电时, 会排放污染物, 出于对环境保护的考虑, 在目标函数中加入环境成本。激励用户参与 DR 项目需支付一定的激励成本, 通常可以认为负荷转移量越多, 所需支付的激励费用越高, 本文根据文献[20]将需支付的成本定义如式(8)。目标函数可用下式表示。

$$\min\{F_1 + \eta F_2 + F_3\} \quad (5)$$

$$F_1 = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{i=1}^{N_G} [C_{Gi}(P_{i,t}) + y_{i,t} C_{STi}] \Delta T \quad (6)$$

$$F_2 = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{i=1}^{N_G} (\alpha_i U_{i,t} + \beta_i P_{i,t} + \gamma_i P_{i,t}^2) \Delta T \quad (7)$$

$$F_3 = \varphi_j \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{j=1}^J D_{j,t}^u \Delta T \quad (8)$$

式中: F_1 为火电机组运行成本; $C_{Gi}(P_{i,t})$ 为火电机组 i 的发电成本; C_{STi} 为机组 i 的启动费用; $y_{i,t}$ 为机组启动控制 0-1 变量; F_2 为系统碳排放量; α_i 、 β_i 、 γ_i 为火电机组 i 的排放系数; η 为碳交易下的碳排放价格; F_3 为激励用户参与 DR 项目的激励成本, 实施 DR 前的目标函数不包括此部分成本; φ_j 为激励用户 j 转移单位负荷的成本。

火电机组的发电成本通常为机组出力的二次函数。

$$C_{Gi}(P_{i,t}) = a_i U_{i,t} + b_i P_{i,t} + c_i P_{i,t}^2 \quad (9)$$

式中, a_i 、 b_i 、 c_i 为火电机组 i 的发电成本系数。

2.2 约束条件

除上述式(2)一式(4)的约束外, 还包括以下约束。

1) 功率平衡机会约束

$$\Pr \left\{ \sum_{i=1}^{N_G} P_{i,t} + W_t \leq D_t \right\} \leq \varepsilon \quad (10)$$

式中: W_t 表示 t 时段的风电出力, 为随机变量; D_t 为 t 时段总负荷需求; ε 为满足负荷需求平衡的置信水平。

实施 DR 前后 D_t 分别由式(11)和(12)表示。

$$D_t = D_t^{\text{base}} + D_t^{\text{dold}} \quad (11)$$

$$D_t = D_t^{\text{base}} + D_t^{\text{dnew}} \quad (12)$$

式中: D_t^{base} 为 t 时段系统基本负荷; D_t^{dold} 和 D_t^{dnew} 分别为 t 时段系统中所有可转移负荷用户转移负荷前后的负荷。

D_t^{dold} 和 D_t^{dnew} 的关系如式(13)。

$$D_t^{\text{dnew}} = D_t^{\text{dold}} + \sum_{j=1}^J (D_{j,t}^u - D_{j,t}^d) \quad (13)$$

2) 负旋转备用约束

$$\sum_{i=1}^{N_G} (U_{i,t} P_i^{\text{max}} - P_{i,t}) \geq R_t^u \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^{N_G} (P_{i,t} - U_{i,t} P_i^{\text{min}}) \geq R_t^d \quad (15)$$

式中: $U_{i,t}$ 为火电机组 i 在 t 时段的状态 0-1 变量; P_i^{max} 和 P_i^{min} 分别为火电机组 i 最大、最小出力; R_t^u 和 R_t^d 分别表示正旋转备用和负旋转备用。

3) 火电机组出力约束

$$U_{i,t} P_i^{\text{min}} \leq P_{i,t} \leq U_{i,t} P_i^{\text{max}} \quad (16)$$

4) 火电机组爬坡约束

$$\begin{aligned} P_{i,t} - P_{i,t-1} &\leq U_{i-1} P_i^{\text{up}} + y_{i,t} P_i^{\text{start}} \\ P_{i,t-1} - P_{i,t} &\leq U_{i,t} P_i^{\text{down}} + z_{i,t} P_i^{\text{shut}} \end{aligned} \quad (17)$$

式中: P_i^{up} 和 P_i^{down} 分别为第 i 台火电机组的最大向上爬坡率、最大向下爬坡率; P_i^{start} 和 P_i^{shut} 分别为第 i 台火电机组的启动功率速度限制、停机功率速度限制; $y_{i,t}$ 和 $z_{i,t}$ 分别为机组起停控制 0-1 变量。

5) 逻辑约束

$$U_{i,t} - U_{i,t-1} = y_{i,t} - z_{i,t} \quad (18)$$

6) 火电机组最小运行时间和最小停运时间约束^[21]

$$\begin{cases} \sum_{k=\max(t-T_i^{\text{on}}+1,1)}^t y_{i,k} \leq U_{i,t}, t \in [G_i+1, N_T] \\ \sum_{k=\max(t-T_i^{\text{off}}+1,1)}^t z_{i,k} \leq 1 - U_{i,t}, t \in [L_i+1, N_T] \end{cases} \quad (19)$$

式中: G_i 为机组 i 在初始时刻仍需连续运行的时段数, $G_i = \max\{0, \min[N_T, U_{i,0}(\underline{T}_i^{\text{on}} - T_{i,0})]\}$; L_i 为机组 i 在初始时刻仍需连续停机的时段数, 可表示为 $L_i = \max\{0, \min[N_T, (1 - U_{i,0})(\underline{T}_i^{\text{off}} + T_{i,0})]\}$; $U_{i,0}$ 为机组 i 的初始状态; $T_{i,0}$ 为机组 i 的初始连续运行时间(正值)或连续停机时间(负值); $\underline{T}_i^{\text{on}}$ 表示机组 i 的最小运行时间; $\underline{T}_i^{\text{off}}$ 表示机组 i 的最小停机时间。以

上约束为递推公式, 还需考虑初始时刻仍需继续运行和停运的时间, 表示为

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^{\max(G_i, 1)} U_{i,t} \geq G_i U_{i,0} \\ \sum_{t=1}^{\max(L_i, 1)} (1-U_{i,t}) \geq L_i (1-U_{i,0}) \end{cases} \quad (20)$$

7) 风电出力约束

$$0 \leq W_t^f \leq W_t^f \quad (21)$$

式中, W_t^f 为风电在 t 时段的预测出力。

2.3 模型求解

上述模型中的风电功率为随机变量, 模型属于带机会约束的随机优化模型, 将其转化为确定性模型是解决随机规划问题的常用方法。风电出力与风速直接相关, 研究表明^[22], 双参数威布尔分布是被广泛接受的能够较好拟合实际风速概率分布的模型。对于应用最广泛的变速恒频风机, 风电出力和风速存在某种函数关系。由风速-风电功率函数和风速概率分布可得风电功率的分布函数, 根据风电出力的分布函数式可将机会约束等效为确定性约束, 具体等效过程见参考文献^[23]。

处理后的模型为混合整数二次规划模型, 可用商业软件 CPLEX 对其进行求解。

3 算例分析

3.1 基础数据

本文对两个算例进行了详细计算和分析。算例 1 为含有一个并网风电场和 6 台火电机组的电力系统, 机组参数见附录; 算例 2 为含有一个并网发电场和 20 台火电机组的电力系统, 机组参数参考文献^[24]。由于篇幅有限, 算例 2 的部分计算结果见附录。研究周期为一天, $N_T = 24$, 各时段总旋转备用取各时段总负荷的 10%, 即 $R_t^u = 10\% D_t^{\text{dnew}}$, $R_t^d = 10\% D_t^{\text{dnew}}$, 风电场中风速符合双参数威布尔分布, 其两个参数分别取值如下: 形状参数 $k = 2$, 尺度参数 $c = 8$ 。机会约束的置信水平 ε 取 0.6。碳排放价格根据参考文献^[25]取值为 1 \$/lb。系统总负荷包括居民用户负荷、商业用户负荷和工业用户负荷, 本文假设只有工业用户参与 DR 项目, 工业用户的负荷大约占系统总负荷的 60%。本文对风电渗透率(风电装机容量占总装机容量的比例)分别为 10%和 20%时的情景进行研究, 并分析用户参与 DR 项目的水平(用户可转移负荷占用户总负荷的比例)分别为 5%、10%和 20%时的调度结果。

3.2 系统成本分析

表 1 和表 2 分别给出了算例 1 中风电渗透率为

10%和 20%时的系统成本数据。

表 1 算例 1 风电渗透率为 10%时的系统成本

Table 1 Cost of the system with 10% penetration of wind in case 1

用户参与水平	发电成本/\$	启动成本/\$	环境成本/\$	激励成本/\$	总成本/\$
实施 DR 前	89502503.60	340	7756740.23	0	97259583.83
5%	88040085.81	340	7723692.11	19372.71	95783490.63
10%	86871826.20	340	7697794.65	36363.43	94606324.29
20%	85251325.47	340	7693158.356	63440.38	93008264.20

表 2 算例 1 风电渗透率为 20%时的系统成本

Table 2 Cost of the system with 20% penetration of wind in case 1

用户参与水平	发电成本/\$	启动成本/\$	环境成本/\$	激励成本/\$	总成本/\$
实施 DR 前	78584096.21	340	6895162.56	0	85479598.78
5%	77127466.68	340	6865670.24	18825.00	84012301.92
10%	75912263.38	340	6847540.75	37436.07	82797580.20
20%	74101041.97	340	68254887.47	66976.69	80993847.41

由表 1 可以看出, 风电渗透率为 10%时, 实施 DR 前系统总成本为 97 259 583.83 \$, 而实施激励用户转移负荷的 DR 后, 随着用户参与 DR 项目水平的升高, 系统总成本将会减少。这是因为虽然实施 DR 后用电量不变, 但是由于负荷的转移, 可用谷时段能耗较低或污染气体排放较少的机组代替峰时段能耗较高或污染气体排放较多的机组承担发电任务, 所以可降低发电成本或环境成本。实施 DR 项目虽然需要增加激励成本, 但由于降低的发电成本和环境成本远大于增加的激励成本, 所以总成本减少。

由表 2 可以明显看出, 风电渗透率为 20%时的系统成本低于风电渗透率为 10%时的系统成本, 这是因为风机承担了更多的发电任务, 减少了火电机组的运行成本。

由附表 2 还可看出, 在 20 台火电机组的系统中, 负荷转移还可减少启动费用, 这是因为负荷转移的削峰填谷作用使负荷曲线趋于平滑, 减少了火电机组的启停次数。

3.3 负荷峰谷差分析

图 1 和图 2 分别为算例 1 中风电渗透率为 10%和 20%时的负荷曲线。

显然, 根据图 1 和图 2 可知, 随着用户参与水平的提高, 负荷峰谷差将会降低, 负荷曲线越平滑, 表明用户参与水平的高低将会影响其对削峰填谷的作用。

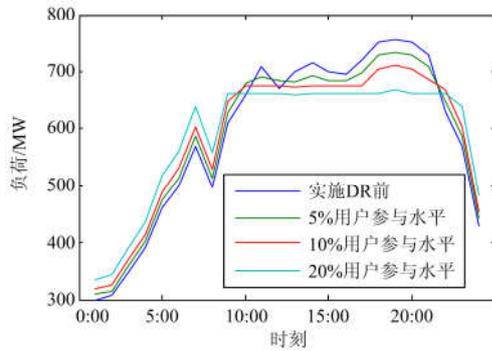


图1 算例1中10%风电渗透率时的负荷曲线

Fig. 1 Load forecasting curves with 10% penetration of wind in case 1

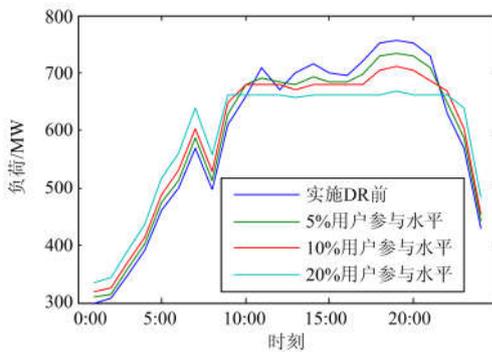


图2 算例1中20%风电渗透率时的负荷曲线

Fig. 2 Load forecasting curves with 20% penetration of wind in case 1

3.4 风电利用率分析

各种场景下的风电利用率(风电计划出力占预测出力的比例)如表3所示。

表3 算例1中不同场景下的风电利用率

Table 3 Utilization percentage of wind with different scenarios in case 1

用户参与水平	10%风电渗透率	20%风电渗透率
实施DR前	62.03%	59.126%
5%	63.361%	60.069%
10%	64.361%	61.002%
20%	64.573%	62.307%

由表3可以看出,负荷转移可提高风电利用率,且风电利用率随着用户参与水平的升高而增加。但风电渗透率越高,风电利用率却会越低。

3.5 污染气体排放量分析

以算例1为例分析污染气体排放量,风电渗透率为10%时各台机组一天污染气体总排放量如表4所示。限于篇幅,风电渗透率为20%时各台机组排

放量见附录。

表4 算例1风电渗透率为10%时机组污染气体排放量

Table 4 Emissions of thermal unit with 10% penetration of wind in case 1

用户参与水平	G1 排放量/lb	G2 排放量/lb	G3 排放量/lb	G4 排放量/lb	G5 排放量/lb	G6 排放量/lb
实施DR前	574752	435690	2031959	1627422	2337106	749811
5%	548551	415391	2076086	1580256	2390344	713064
10%	528572	399988	2117436	1528816	2437299	685684
20%	496278	373881	2197195	1449401	2535429	640974

由表4可以看出,实施DR后,随着用户参与水平的提高,虽然机组3和机组5的排放量增多,但机组1、2、4、6的排放量都减少,使系统总排放量大大减少,所以负荷的转移有利于降低火电机组污染气体的排放量。

4 结论

本文建立了考虑可转移负荷的含风电场日前调度模型,用CPLEX对所构算例求解,通过对优化结果的分析,得到如下结论:

1) 通过实施适当的DR项目激励用户转移负荷,增加系统调度的灵活性,不仅能够降低火电机组的运行成本,提高调度方案的经济性,还能减少火电机组污染气体的排放,增加系统运行的环保性。

2) 用户通过转移负荷,可减小负荷峰谷差,改善负荷曲线形状,且用户转移负荷的水平越高,其效果越明显。

3) 根据可转移负荷的特性,实施恰当的DR项目(如设计合理的分时电价费率),可提高风电利用率,减少弃风。

附录

附表1 算例1中火电机组参数

Table 1 Parameters of thermal unit in scenario 1

参数	G1	G2	G3	G4	G5	G6
$a/\$$	10	10	20	10	20	10
$b/(\$/MWh)$	200	150	180	100	180	150
$c/(\$/MW^2h)$	100	120	40	60	40	100
$\alpha/(lb/h)$	4.089	4.259	4.149	4.779	5.219	5.449
$\beta/((lb/MWh)$	-5.53	-5.09	-5.31	-4.62	-4.06	-3.91
$\gamma/(lb/MW^2h)$	4.6	4.62	4.91	5.37	5.69	6.5
P^{max}/MW	150	150	150	150	150	150
P^{min}/MW	50	50	50	50	50	50

附表 2 算例 2 中的系统成本
Table 2 Cost of the system in case 2

	用户参与水平	发电成本/\$	启动成本/\$	环境成本/\$	激励成本/\$	总成本/\$
风电渗透率为 10%	实施 DR 前	1 716 635.16	8 600	1 602 228.54	0	3 327 463.70
	5%	1 611 801.72	8 600	1 593 390.25	55 499.98	3 269 291.95
	10%	1 596 939.45	8 500	1 531 764.04	94 694.64	3 231 898.13
	20%	1 404 703.76	8 400	1 529 808.45	167 913.45	3 110 825.66
风电渗透率为 20%	实施 DR 前	1 492 758.80	8 900	1 199 879.60	0	2 701 538.40
	5%	1 491 770.35	8 900	1 099 020.22	54 400.60	2 654 091.17
	10%	1 486 711.56	8 800	1 016 857.40	96 210.26	2 608 579.23
	20%	1 480 451.79	8 700	886 508.27	169 805.83	2 545 465.89

附表 3 算例 1 风电渗透率为 20% 时各台机组污染气体排放量
Table 3 Emissions of thermal unit with 20% penetration of wind in case 1

用户参与水平	G1 排放量/lb	G2 排放量/lb	G3 排放量/lb	G4 排放量/lb	G5 排放量/lb	G6 排放量/lb
实施 DR 前	490 319	380 730	1 885 270	1 356 784	2 164 172	617 887
5%	465 278	360 811	1 936 927	1 292 663	2 226 444	583 548
10%	443 068	343 554	1 987 206	1 237 815	2 282 821	553 077
20%	407 199	315 423	2 062 489	1 145 447	2 375 890	519 041

参考文献

- [1] 许汉平, 李姚旺, 苗世洪, 等. 考虑可再生能源消纳效益的电力系统“源—荷—储”协调互动优化调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 18-25.
XU Hanping, LI Yaowang, MIAO Shihong, et al. Optimization dispatch strategy considering renewable energy consumptive benefits based on “source-load-energy” coordination in power system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 18-25.
- [2] LI H, ESEYE A T, ZHANG J H, et al. Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewables[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 122-135. DOI: 10.1186/s41601-017-0040-6.
- [3] 张钦, 王锡凡, 王建学, 等. 电力市场下需求响应研究综述[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 97-103.
ZHANG Qin, WANG Xifan, WANG Jianxue, et al. Survey of demand response research in deregulated electricity markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 97-103.
- [4] 张晶, 皮学军, 张翠霞. 电力需求响应技术标准研究初探[C] // 中国国际供电会议, CIRED 中国国际委员会, 国家电网公司, 2012, 上海: 1-5.
ZHANG Jing, PI Xuejun, ZHANG Cuixia. Preliminary study on electricity demand response technology standards[C] // China International Conference on Electricity, Shanghai: China National Committee, the State Grid Corporation of China, 2012, Shanghai: 1-5.
- [5] 张晶, 孙万珺, 王婷. 自动需求响应系统的需求及架构研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4070-4076.
ZHANG Jing, SUN Wanjun, WANG Ting. Studies on requirements and architecture for automated demand response system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4070-4076.
- [6] 陈江华, 徐杰彦. 电网企业电力需求侧管理目标的实现途径和影响因素分析[J]. 电力需求侧管理, 2011, 13(2): 4-7.
CHEN Jianghua, XU Jieyan. Means to achieve the DSM goals and impact factors analysis of grid corporations[J]. Power Demand Side Management, 2011, 13(2): 4-7.
- [7] 曾博, 杨雍琦, 段金辉, 等. 新能源电力系统中需求侧响应关键问题及未来研究展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 10-18.
ZENG Bo, YANG Yongqi, DUAN Jinhui, et al. Key issues and research prospects for demand-side response in alternate electrical power system with renewable energy sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 10-18.
- [8] 于娜. 电力需求响应参与系统运行调控问题的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
YU Na. Research on problems of power system's operation and regulation with power demand response[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [9] SAEBI J, JAVIDI M H. Economic evaluation of demand response in power systems with high wind power penetration[J]. Renewable and Sustainable Energy, 2014,

- 6(3): 1-18.
- [10] FERA M, MACCHIAROLI R, LANNONE R, et al. Economic evaluation model for the energy demand response[J]. *Energy*, 2016, 112: 457-468.
- [11] DIETRICH K, LATORRE J M, OLMOS L, et al. Demand response in an isolated system with high wind integration[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, 27(1): 20-29.
- [12] YOUSEFI A, IU H H-C, FERNANDO T, et al. An approach for wind power integration using demand side resources[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2013, 4(4): 917-924.
- [13] WARSONO D J, OZVEREN K C S, BRADLEY D A. Economic load dispatch optimization of renewable energy in power system using genetic algorithm[C] // *Proceedings of Power Technology*, July 1-5, 2007, Lausanne, Switzerland: 2174-2179.
- [14] SIOSHANSI R. Evaluating the impacts of real-time pricing on the cost and value of wind generation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2010, 25(2): 741-748.
- [15] SIOSHANSI R, SHORT W. Evaluating the impacts of real-time pricing on the usage of wind generation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2009, 24(2): 516-524.
- [16] 唐学军, 韩佶, 苗世洪, 等. 基于需求侧响应的多类型负荷协调控制模型[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(16): 116-123.
TANG Xuejun, HAN Ji, MIAO Shihong, et al. Coordinated control model of multi-type load based on demand response[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(16): 116-123.
- [17] 宋魏, 王佳伟, 赵海波, 等. 考虑需求响应交易市场的虚拟电厂多阶段竞价策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(19): 35-45.
SONG Wei, WANG Jiawei, ZHAO Haibo, et al. Research on multi-stage bidding strategy of virtual power plant considering demand response market[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(19): 35-45.
- [18] 陈睿欣. 基于博弈论的需求响应研究及其在促进风电消纳中的应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
CHEN Ruixin. The research on demand response based on game theory and its application in promoting wind power consumption[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [19] 刘晓琳, 王兆杰, 高峰, 等. 分时电价下的高耗能企业发用电响应[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(8): 41-49.
LIU Xiaolin, WANG Zhaojie, GAO Feng, et al. Response behaviors of power generation and consumption in energy intensive enterprise under time-of-use price[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(8): 41-49.
- [20] 邵靖珂, 汪泓, 谭阳红, 等. 计及需求侧响应的微网经济优化调度[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2016, 28(10): 31-36.
SHAO Jingke, WANG Feng, TAN Yanghong, et al. Optimal economic dispatch for microgrid considering demand side response[J]. *Proceedings of the CSU-EPSCA*, 2016, 28(10): 31-36.
- [21] 邓俊, 韦华, 黎静华, 等. 一种含四类 0-1 变量的机组组合混合整数线性规划模型[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(11): 2770-2778.
DENG Jun, WEI Hua, LI Jinghua, et al. A mixed-integer linear programming model using four sets of binary variables for the unit commitment problem[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(11): 2770-2778.
- [22] CARTA J A, RAMIREZ P. A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis: case studies in the Canary Islands[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(5): 933-955.
- [23] LIU X, XV W. Economic load dispatch constrained by wind power availability: a here-and-now approach[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2010, 1(1): 2-9.
- [24] 杨朋朋. 机组组合理论与算法研究[D]. 济南: 山东大学, 2008.
YANG Pengpeng. Research on theory and algorithm of unit commitment[D]. Jinan: Shandong University, 2008.
- [25] 刘晓, 艾欣, 彭谦. 计及需求响应的含风电场电力系统发电与碳排放权联合优化调度[J]. *电网技术*, 2012, 36(1): 213-218.
LIU Xiao, AI Xin, PENG Qian. Optimal dispatch coordinating power generation with carbon emission permit for wind farms integrated power grid considering demand response[J]. *Power System Technology*, 2012, 36(1): 213-218.

收稿日期: 2017-08-15; 修回日期: 2017-12-12

作者简介:

于娜(1977—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: yuna0616@163.com

李伟蒙(1991—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力需求响应参与系统日前调度的综合效益评估; E-mail: mengshaxingtong@163.com

黄大为(1976—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统运行与控制、电力系统经济与发电企业决策。E-mail: hdw76@163.com

(编辑 姜新丽)