

考虑风电消纳的源-荷协同优化调度策略

李卫东¹, 贺鸿鹏²

(1. 沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁省 沈阳市 110870;

2. 国网内蒙古东部电力有限公司, 内蒙古自治区 呼和浩特市 010020)

Source-load Cooperative Optimization Dispatch Strategy Considering Wind Power Accommodation

LI Weidong¹, HE Hongpeng²

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, Liaoning Province, China;

2. State Grid East Inner Mongolia Electric Power Supply Co., Ltd., Hohhot 010020, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

摘要: 为提升风电消纳比例, 提出一种基于遗传算法的源-荷协同调度策略。旨在通过负荷侧需求响应与源侧发电机组共同参与电网优化调度, 缓解由于风电反调峰特性导致的大规模弃风问题。在电力用户自愿参与电网调度的基础上, 分析激励型需求响应参与电网调度对风电消纳的影响机理, 以系统总成本最低为目标建立源-荷协同优化调度模型, 在保证系统安全、可靠的前提下, 采用遗传算法对模型进行求解。利用 Matlab 对算例进行仿真计算, 与仅考虑源侧优化的调度策略相比, 风电消纳比例提高了 27.56%, 总调度成本降低了 4 798 元, 验证了所提策略对于提升风电消纳的有效性。

关键词: 风电消纳; 源-荷协同调度; 需求响应; 调度模型; 遗传算法

ABSTRACT: In order to improve the proportion of wind power accommodation, a source-load cooperative dispatch strategy based on genetic algorithm was proposed. The purpose of this dispatch strategy is to alleviate the problem of large-scale wind power curtailment, which is caused by the anti-peak regulation characteristics of wind power. Based on the voluntary participation of users in grid dispatching, the influence mechanism of excitation-type demand response participating in power grid dispatching on wind power consumption was analyzed. The source-load coordination optimization model was established with the goal of minimizing the total cost of the system. On the premise of ensuring the safety and reliability of the system, genetic algorithm was adopted to solve the model, Matlab was used to carry out simulation calculation on the

calculation example in this paper. The results show that the proportion of wind power increase by 27.56%, and the total dispatch cost decrease by 4798 RMB, which verify the effectiveness of the proposed strategy.

KEY WORDS: wind power accommodation; source-load cooperative dispatch; demand response; dispatch model; genetic algorithm (GA)

0 引言

风电作为可再生能源因具有成本低、环保、可持续性等诸多优点, 近年来获得了快速发展。但由于其出力具有随机性、间歇性以及反调峰特性, 风电并网给电网调度带来一定挑战^[1-3]。据统计, 2018年1—9月, 全国风电发电量为2 676亿 kW h, 其中弃风电量为222亿 kW h^[4], 弃风问题依然严峻。

为提升风电消纳比例, 国内外学者对电网优化调度策略进行了深入研究。文献[5]针对电力系统因调节能力不足而造成弃风等问题, 构建了多源并存的电力系统风-火-水-储-气联合优化调度模型, 并给出了模型的求解方法, 其结果验证了所提模型对促进风电消纳的作用。文献[6]从解耦热电耦合约束、提升电力系统调节能力角度出发, 提出了基于含储热的热电联产机组与电锅炉的弃风消纳协调调度模型, 结果表明电锅炉供热在极限消纳弃风时具有最佳经济性。文献[7]为解耦传统的“以热定电”约束, 提高系统风电消纳能力, 针对风电-电储能-蓄热式电锅炉的联合系统, 充

基金项目: 辽宁省自然科学基金计划重点项目(20170520292)。

Project Supported by Key Project of Natural Science Foundation of Liaoning Province (20170520292).

分地考虑了电储能装置对功率和能量的时间迁移能力以及电、热系统互补的物理特性，并引入了弃风成本参数，建立了以实现最低运行成本为目标的综合调度模型。文献[8]在考虑风电出力不确定性的基础上提出了一种风电场与含储热的热电联产联合运行的调度模式。文献[9]通过在供热侧配置储热、在供电侧配置抽水蓄能，与常规机组共同参与电网优化调度，形成了电热联合系统多源协调运行的调度模式，并以风电消纳电量最大和系统运行成本最小为目标建立了电热联合系统多源协调优化模型。文献[10]在发电侧引入了储能系统，在电网侧采用鲁棒优化的方法来描述风电出力的不确定性，提出了一种考虑储能参与的含高比例风电互联电力系统分散式调度模型，并对风电采取了区域内消纳和跨区域外送2种消纳方式，通过算例验证了模型的有效性。

上述研究成果突出了协同调度方式在风电消纳中起到的重要作用。本文提出一种源-荷协同调度策略，首先分析了需求响应对风电消纳的影响机理，并依据电力辅助服务市场相关政策建立了需求响应调度模型，即参与电网调度的用户会收到一定的补偿。然后基于源-荷系统模型建立了以总成本为最低的目标函数，并充分考虑电网功率平衡等约束条件。最后利用 Matlab 进行仿真计算，验证所提策略的有效性。

1 激励型需求响应

需求响应是指电力用户根据市场的不同激励机制改变原有的用电习惯，按照用户参与调度的响应形式对需求响应进行划分，可分为基于价格的需求响应和基于激励的需求响应^[11]。本文只考虑基于激励的需求响应。

随着电力用户种类的增长，日间负荷需求与夜间风力大发形成明显冲突，其中具有快速投切、高自动化且仅在日间工作的高耗能工业负荷加剧了该冲突的影响。因此，国家发改委提出电力辅助服务市场相关政策，鼓励用户参与电网调峰并给与一定补偿。在日间负荷高峰期，参与需求侧响应的电力工厂用户减少投产机组或停止生产，以降低电网调峰压力，为保证用户生产利益，工

厂用户可在夜间风电大发期间进行生产。此做法既能保证用户生产利益，又有利于提升风电消纳比例，图1为需求响应参与电网调度提升风电消纳比例的示意图。由图1可知，若用户自愿参与电网调度，可将11:00—15:00的负荷转移至风电功率较大的00:00—04:00，为风电提供消纳空间。由此可见，若用户参与需求响应可增加负荷调节灵活性，是避免系统发生大规模弃风的重要手段。

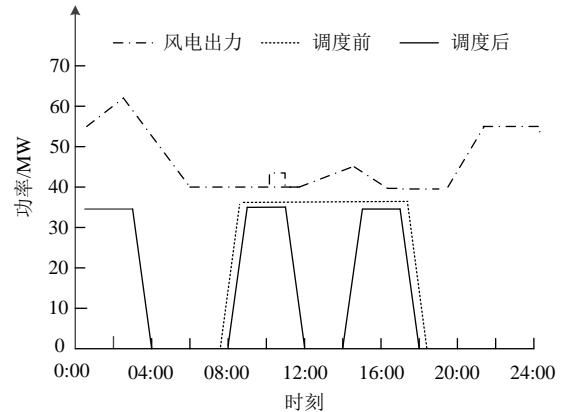


图1 需求响应参与风电消纳示意图

Fig. 1 Sketch diagram of demand response participating in wind power accommodation

激励型需求响应调度模型建立如下：

$$C = \sum_{t=1}^T (\rho P_{\Delta L,t} \Delta t) \quad (1)$$

式中： C 表示需求响应补偿成本； T 表示调度周期内总时段数； ρ 表示激励型需求响应补偿系数； $P_{\Delta L,t}$ 表示 t 时刻调度量； Δt 表示调度时间间隔。

为保证工厂的生产效益，对激励型需求响应约束如下：

$$\zeta_{L\min} \leq \frac{P_{\text{Load},t} \pm P_{\Delta L,t}}{P_{\text{Load},t}} \leq \zeta_{L\max} \quad (2)$$

$$\sum_{t=1}^T P_{\Delta L,t} = 0 \quad (3)$$

式中： $P_{\text{Load},t}$ 表示在 t 时刻的负荷需求功率； $\zeta_{L\max}$ 和 $\zeta_{L\min}$ 分别表示负荷功率调节率上下限。

2 源-荷调度模型及约束条件

2.1 源-荷调度模型

2.1.1 火电机组

火电机组作为可控电源，可以通过合理的调

度跟踪电网负荷的变化。此时，发电成本主要为燃料成本：

$$F_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T (a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i) \quad (4)$$

式中： F_1 表示火电机组燃煤成本； n 表示火电机组总数； a_i 、 b_i 和 c_i 表示燃料成本系数； $P_{i,t}$ 表示火电机组 i 在 t 时刻的功率。

2.1.2 热电联产机组

热电联产机组的出力包括热出力和电出力，运行过程中要同时满足热力平衡与电力平衡，因此在运行过程中不允许停机。本文只考虑热电联产机组的电出力，但在计算其燃煤成本过程中，需将热出力转换为电出力进行计算^[12]，计算公式如下：

$$P_{ZS,j,t} = P_{CHP,j,t} + C_{v,j} H_{CHP,j,t} \quad (5)$$

式中： $P_{ZS,j,t}$ 表示折算后的电功率； $P_{CHP,j,t}$ 和 $H_{CHP,j,t}$ 分别表示热电机组 j 在 t 时刻的电功率和热功率； $C_{v,j}$ 为抽汽式热电机组 j 的热电比。此时的发电成本主要为燃料成本，计算公式如下：

$$F_2 = \sum_{j=1}^N \sum_{t=1}^T a_m P_{ZS,j,t}^2 + b_m P_{ZS,j,t} + c_m \quad (6)$$

式中： F_2 表示热电联产机组燃煤成本； N 表示热电联产机组总数； a_m 、 b_m 、 c_m 表示热电联产机组燃料成本系数。

2.1.3 弃风成本

为促进风电消纳，需对弃风功率进行惩罚，惩罚成本计算公式为

$$F_3 = \sum_{l=1}^m \sum_{t=1}^T k P_{l,t}^{wq} \Delta t \quad (7)$$

式中： F_3 表示弃风成本； m 表示风机总数； k 表示弃风成本系数； $P_{l,t}^{wq}$ 表示风电机组 l 在 t 时刻的弃风量。

2.1.4 激励型需求响应

激励型需求响应主要为依据电力辅助服务市场政策的补偿成本，计算公式如下：

$$F_4 = C \quad (8)$$

式中 F_4 为参与需求响应给予用户的补偿成本。

综上，建立以总成本最低为目标的目标函数

$$\min F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \quad (9)$$

2.2 系统约束

2.2.1 功率平衡约束

在忽略网络传输损耗的基础上，各发电机组的输出电功率之和与经过需求响应之后的负荷相等，即

$$\sum_{l=1}^m P_{l,t}^w + \sum_{i=1}^n P_{i,t} + \sum_{j=1}^N P_{CHP,j,t} = P_{Load,t} \pm P_{\Delta L,t} \quad (10)$$

式中 $P_{l,t}^w$ 表示风电机组 l 在 t 时刻的发电功率。

2.2.2 常规机组约束

1) 源侧机组约束。

由于火电机组存在最小运行方式，其出力应被限制在机组出力上下限之间：

$$P_{\min,i} \leq P_{i,t} \leq P_{\max,i} \quad (11)$$

式中 $P_{\max,i}$ 和 $P_{\min,i}$ 分别表示火电机组 i 出力的上下限。

热电联产机组电出力的上下限：

$$P_{\min,CHPj} \leq P_{CHPj,t} \leq P_{\max,CHPj} \quad (12)$$

式中 $P_{\max,CHPj}$ 和 $P_{\min,CHPj}$ 分别表示热电联产机组 j 电出力的上下限。

2) 荷侧约束。

需求响应约束条件如公式(2)和(3)所示，在此不再重复说明。

3 模型求解

本文采用遗传算法(genetic algorithm, GA)求解所提出的调度模型。遗传算法是模拟达尔文生物进化论的自然选择和遗传学机理的生物进化过程的计算模型，是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法。其主要特点是直接对结构对象进行操作，没有求导和函数连续性的限定；采用概率化的寻优方法，不需要确定的规则就能自动获取和指导优化的搜索空间，自适应地调整搜索方向^[13]。具体求解流程见图2。

4 算例分析

为验证源-荷协同调度对提高风电消纳比例的有效性，本算例建立2种调度模型，第1种为本文提出的源-荷协同调度策略，第2种为仅对源侧机组进行优化的调度策略，并利用Matalab

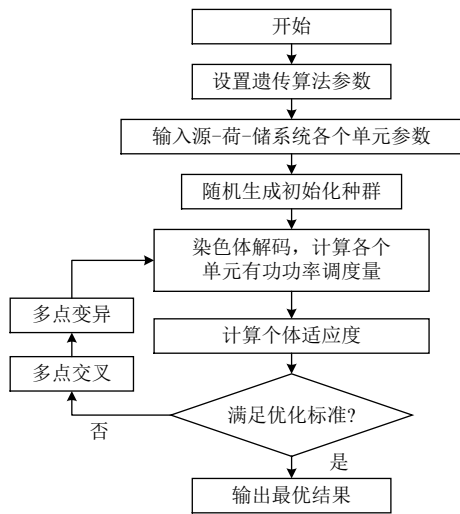


图 2 模型求解流程图

Fig. 2 Solution flow chart of this dispatch model

遗传算法工具箱进行仿真计算。调度模型中只考虑单台火电机组和热电联产机组，其技术参数如表 1 所示，弃风成本系数 k 为 100 元/(MW h)，激励型需求响应调度成本系数 ρ 为 1 500 元/(MW h)，负荷功率调节率上下限 $\zeta_{L,max}$ 和 $\zeta_{L,min}$ 取总负荷的 15%，本文分别取为 $\pm 15\%$ [14-15]。

在本算例中假设风电预测值以及负荷预测值为精准值，二者预测值如图 3 所示。

表 1 火电机组与热电联产机组的技术参数

Tab. 1 Parameters of thermal power unit and cogeneration unit

火电机组		热电联产机组	
参数	取值	参数	取值
$P_{min,i}/MW$	55	$P_{min,CHP}/MW$	100
$P_{max,i}/MW$	150	$P_{max,CHP}/MW$	200
$a_i/(\text{元}/MW^2)$	0.03	$a_m/(\text{元}/MW^2)$	0.004 4
$b_i/(\text{元}/MW)$	23.66	$b_m/(\text{元}/MW)$	13.29
$c_i/\text{元}$	16.22	$c_m/\text{元}$	39

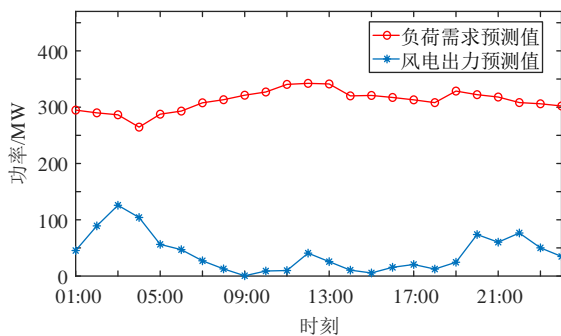


图 3 风电及负荷预测值

Fig. 3 Prediction of wind power and load demand

由图 3 可知，处于时段 01:00—12:00 的负荷以及风电表现出低功耗、高风电的特点，为验证本文所提的源-荷协同调度策略的有效性，选取调度时间为 01:00—12:00，调度时长 Δt 取 1 h。

将上述参数输入调度模型中，将热电联产机组功率、火电机组功率、弃风功率以及需求响应功率作为优化对象，在保证系统安全、可靠的前提下，经遗传算法优化后得到各项费用如表 2 所示，风电消纳对比如图 4 所示。

表 2 不同调度策略的系统运行费用

Tab. 2 Costs in different dispatch model 元

调度策略	燃料成本	弃风成本	需求响应成本	总成本
源-荷协同调度	58 103	10 315	37 483	105 901
仅源侧调度	69 093	41 606	—	110 699

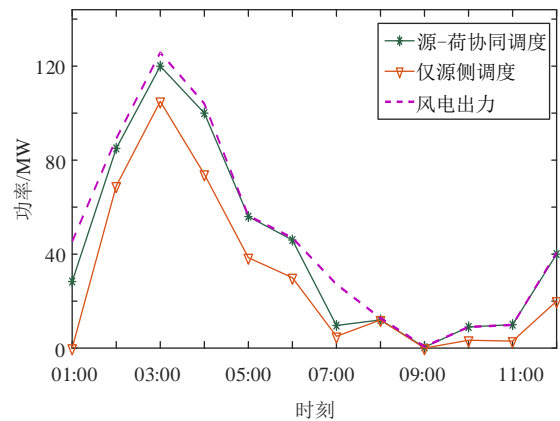


图 4 风电消纳对比

Fig. 4 Comparison of wind power accommodation

由表 2 和图 4 可知，负荷侧需求响应能够有效降低弃风成本并促进风电消纳。仅对源侧机组进行优化的调度策略的风电消纳比例为 63.37%，而本文所提调度策略的风电消纳比例为 90.93%，消纳比例提高了 27.56%。

图 5 为 2 种调度策略负荷需求对比，可以看出，将负荷功率进行优化后，在夜间 00:00—04:00 风电大发期间，其负荷需求有所提高，有利于为消纳风电提供空间；而在风电较少期间，负荷需求有所降低，减小电网调峰压力。图 6 为 2 种调度策略热电联产机组和火电机组出力对比图，可见在夜间 00:00—04:00 风电大发期间，本文所提的源-荷协同调度策略中火电机组和热电联产机组的有功出力较低，进一步为风电消纳提供空间。

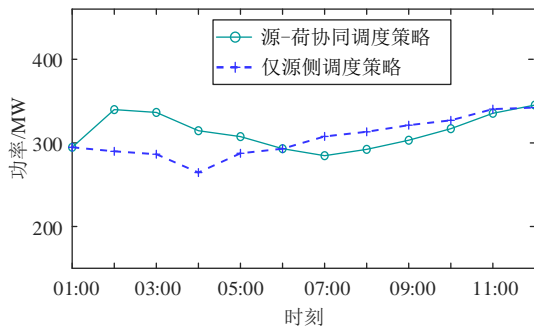


图5 负荷需求对比

Fig. 5 Comparison of demand response

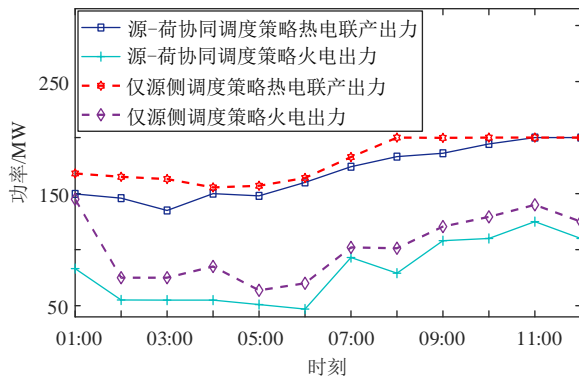


图6 热电联产及火电出力对比

Fig. 6 Comparison of CHP and thermal power unit

5 结论

针对提升风电消纳,提出了一种基于遗传算法的源-荷协同调度策略,建立了以总成本最低为目标的函数,对源-荷系统的功率进行优化。结果表明:与只对源侧机组进行优化的调度策略相比,所提调度策略风电消纳比例提高了27.56%,总调度成本降低了4798元。由此可得出如下结论:

1) 源-荷协同调度策略对促进风电消纳、降低系统调度成本有积极作用。

2) 需求侧响应能缓解由于风电的反调峰特性而导致的弃风问题,是提升风电消纳的有效手段。

参考文献

- [1] 薛静玮, 吴晓升, 叶荣, 等. 大规模风电接入输电电网的源网联合规划[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(3): 68-74.
- [2] 傅旭, 赵娟, 张更贺, 等. 风电场接入对送端电网暂态特性的影响研究[J]. 分布式能源, 2019, 4(1): 17-21.
- [3] 金尚婷, 吴杰康, 覃炜梅, 等. 考虑风电消纳的配

电网多目标无功协同优化[J]. 广东电力, 2019, 32(1): 52-59.

- [4] 国家能源局. 2018年前三季度风电并网运行情况[EB/OL]. (2018-10-30)[2018-12-15]. http://www.nea.gov.cn/2018-10/30/c_137569222.htm.
- [5] 甘伟, 艾小猛, 方家琨. 风-火-水-储-气联合优化调度策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(S1): 11-20.
- [6] 崔杨, 陈志, 严干贵. 基于含储热热电联产机组与电锅炉的弃风消纳协调调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4072-4081.
- [7] 王振浩, 杨璐, 田春光. 考虑风电消纳的风电-电储能-蓄热式电锅炉联合系统能量优化[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(S1): 137-143.
- [8] 戴远航, 陈磊, 闵勇. 风电场与含储热的热电联产联合运行的优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3470-3479.
- [9] 李守东, 董海鹰, 张蕊萍. 考虑风电消纳的电热联合系统多源协调优化运行[J]. 太阳能学报, 2018, 39(8): 2217-2225.
- [10] 任建文, 许英强, 董圣孝. 考虑储能参与的含高比例风电互联电力系统分散式调度模型[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1079-1086.
- [11] 肖斐, 艾芊. 基于模型预测控制的微电网多时间尺度需求响应资源优化调度[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 184-190.
- [12] 崔杨, 陈志, 严干贵. 基于含储热热电联产机组与电锅炉的弃风消纳协调调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4072-4081.
- [13] 许玮, 袁弘, 车长明. 含电动汽车柔性负荷响应的优化调度策略研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(14): 8-12.
- [14] 崔杨, 杨志文, 仲悟之, 等. 降低硫磺排放的含储热热电联产机组与风电联合调度策略[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1063-1070.
- [15] 丁明, 刘新宇, 解蛟龙. 面向提高风电接纳能力的多区域热-电联合调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4079-4088.

收稿日期: 2019-09-02.

作者简介:



李卫东

李卫东(1995),男,硕士研究生,研究方向为综合能源系统优化, liweidong13579@163.com.

(责任编辑 辛培裕)