

基于源荷互动的含风电场电力系统 多目标模糊优化调度方法

刘文颖¹, 文晶¹, 谢昶², 王维洲³, 刘福潮³

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;

2. 中国电力科学研究院, 北京 100192;

3. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 在深入研究负荷互动特性的基础上, 发挥互动负荷对系统消纳风电正负波动的效用, 将互动负荷视为可调度资源融入传统日前调度模型中。综合考虑互动负荷对系统运行成本和潮流分布的影响, 建立了以运行成本和网损最小为目标的含风电场电力系统多目标优化调度模型, 并引入模糊理论将多目标优化问题转化为单目标优化问题进行求解, 从而使发电侧和用电侧均能参与电网运行的资源优化配置。IEEE 30 节点系统的仿真结果, 验证了所提调度方法能够有效降低系统运行成本和网损, 提高风电消纳水平。

关键词: 风电; 电力系统; 互动负荷; 优化; 调度; 多目标; 模型; 模糊理论

中图分类号: TM 614; TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.10.009

0 引言

随着国际能源供应持续紧张, 全球生态环境日益恶化, 可再生能源受到越来越多的关注。风力发电作为一种重要的可再生能源形式, 是目前可再生能源中技术最成熟、最具规模化开发条件和商业化发展前景的发电方式之一^[1-3]。近年来, 我国风电装机容量快速增长, 呈现大规模发展态势^[3]。由于风电出力具有间歇性、波动性和随机性等特点, 且呈现出明显的反调峰特性^[4-5], 当大规模风电场接入电网后, 在向电网提供清洁能源的同时, 也给电网的调度运行带来一些负面影响^[6]: 一方面增加了风电就地消纳的难度, 使风能资源得不到充分的利用, 有些地方甚至出现严重“弃风”现象; 另一面提高了电力系统各环节的运行成本, 使经济性下降。因此, 研究适用于含风电场的电力系统优化调度问题的模型和方法势在必行。

针对含风电场电力系统的优化调度问题, 国内外学者已经开展了广泛的理论研究。文献[7-8]运用随机规划理论建立了含风电场的优化调度模型, 并采用智能算法对模型进行求解。文献[9]采用对风电场模糊建模的思想和粒子群算法来求解含风电场的经济调度问题。文献[10]为应对风电功率预测误差给系统调度带来的影响, 在模型中同时考虑了系统正、负旋转备用容量约束。文献[11]将风速作为服从威布尔分布的随机变量, 以此为基础构建了风火联合优化调度模型, 并在目标函数中加入了风电场计

划出力超过或低于可利用风能时相应的惩罚成本。文献[12]以节能、经济、环保三大原则为目标, 给出了含风电场的多目标优化调度模型和相应的求解方法。上述文献从不同的角度研究了提高大规模风电接入电网后风电消纳能力和运行经济性的理论模型和求解算法, 但只是从发电侧考虑优化调度策略, 未能将电网需求侧资源纳入风电调度体系中, 难以满足日益增长的风电并网需求。

在智能电网框架下, 需求响应作为一种重要的互动资源, 是降低风电波动性对电力系统调度运行不利影响的绝佳手段^[13]。现有的研究思路主要是通过电价响应和可中断负荷的方式, 建立含风电场电力系统的发用电一体化调度模型进行求解^[14-17]。然而, 目前我国电力市场交易机制尚未成熟, 实时电价缺失, 峰谷电价虽然在一定程度上引导用户在低谷时间用电, 但电网侧与用户侧之间缺乏直接充分的信息沟通, 不仅难以准确有效地调度用户侧负荷, 而且用户侧也只能被动地响应峰谷电价, 极易导致过度移峰或欠移峰的发生^[18]。因此, 如何使用户侧主动积极地参与电网调度, 充分发挥互动负荷对风电消纳的作用, 进一步挖掘互动用户与电网发电资源的最优配合关系, 是当今智能电网发展中亟待解决的重要课题。

本文在深入研究需求响应中负荷互动特性的基础上, 提出了将互动负荷融入电网调度运行中。通过申报用电意愿和互动成本, 使互动负荷与发电机组共同作为可调度资源参与电网统一协调调度。考虑到互动负荷对平抑风电随机波动的积极效应, 建立了以运行成本和网损最小为目标的含风电场电力系统多目标优化调度模型, 并引入模糊理论进行求解,

收稿日期: 2014-04-21; 修回日期: 2014-08-22

基金项目: 国家电网公司重大科技项目(522722140032)

Project supported by State Grid Corporation of China (522722140032)

从而使发电侧和用电侧均能参与电网资源优化配置,有效减少风电弃风,提高了电力系统运行经济性和风能利用效率。

1 风电输出功率模型

风电的随机性和间歇性使得风电预测存在一定的偏差,因此,风电实际输出功率可表示为风电预测出力及风电预测偏差量之和的形式^[19],即:

$$P_W^t = P_{WF}^t + \Delta P_W^t \quad (1)$$

其中, P_W^t 为风电在 t 时段的实际输出功率; P_{WF}^t 为风电在 t 时段的预测功率; ΔP_W^t 为风电预测值和实际值的误差,即风电预测偏差量,本质上是服从均值为 0、方差为 σ_W^2 的正态分布的随机变量,见式(2)、(3)。

$$\Delta P_W^t \sim N(0, \sigma_W^2) \quad (2)$$

$$\sigma_W = \frac{1}{5} P_{WF}^t + \frac{1}{50} P_{WZ} \quad (3)$$

其中, P_{WZ} 为风电的总装机容量。

图 1 为风电预测功率与实际输出功率示意图。

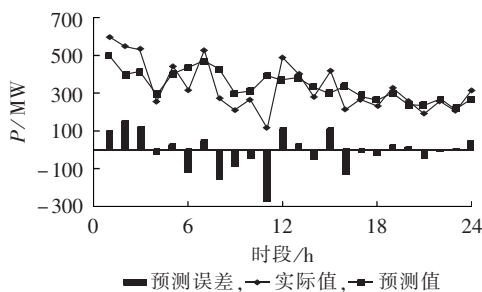


图 1 风电预测功率与实际输出功率示意图

Fig.1 Predicted and actual outputs of wind power

2 互动负荷特性及模型

互动是智能电网的重要特征之一^[20]。传统意义上的互动是用户被动地响应分时价格、实时电价或尖峰电价^[21],以调整自身用电计划。这使用户难以充分、有效地参与到全网的调度运行优化中,存在过度移峰或欠移峰的隐患。为此,本文从提高电网运行安全性和经济性的角度出发,引入了互动负荷的概念。互动负荷是指能够主动提供用电意愿,并根据电网调度计划指令自发调整其用电行为,从而实现与电网互动运行的用户负荷。具体包括储能、电动汽车等可控负荷,电力用户中的工业负荷、商业负荷以及居民生活负荷中的空调、冰箱等能够响应电网需求并参与电力供需平衡的负荷。参与互动的负荷用户综合考虑自身的生产需求和成本,每日向调度中心提交次日的用电意愿和互动成本,与发电机组共同作为可调度资源由调度中心统一优化调度。

2.1 互动负荷的特性

互动负荷分为可移峰负荷和可中断负荷 2 类。

可移峰负荷是指在电网负荷高峰时段,通过蓄能技术^[22]和错峰生产等措施将用电量转移到低谷时段的负荷。可移峰负荷参与互动后,对用电曲线的影响有 2 种情况:当采用蓄能技术对负荷移峰时,移峰前后的用电曲线形状不同,可以理解为先削峰再将削峰电量转移到其他时段;当采用错峰生产对负荷移峰时,移峰前后的用电曲线形状不变。可移峰负荷的负荷特性曲线如图 2 和图 3 所示。可中断负荷 IL(Interruptible Load)是指根据供用电双方预先签订的可中断负荷合同,在电网运行需要时,合同用户能够及时响应电网调度中心下达的负荷中断指令,在指定时间减少或中断指定量负荷的短时停电,并能够得到经济补偿的用电负荷^[23]。简言之,可中断负荷就是指那些以合约等方式允许有条件停电的负荷。

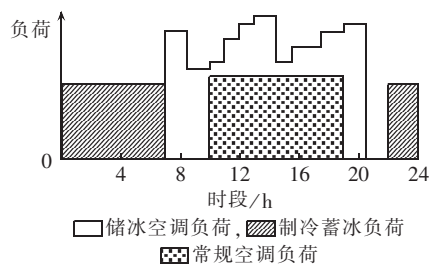


图 2 典型冰蓄冷空调负荷曲线

Fig.2 Typical load curve of ice-storage air conditioner

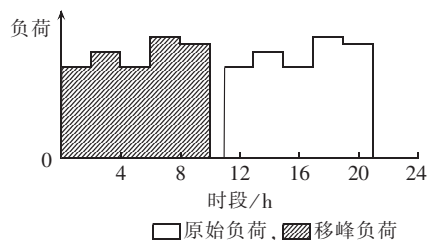


图 3 典型错峰生产负荷曲线

Fig.3 Typical productive load curve for peak shunning

2.2 互动负荷对风电消纳的影响

为了应对风电的随机波动性,降低风电预测误差给电网运行调度带来的不利影响,需要系统预留一定的正负备用^[24],以在风电输出功率大于预测值时消纳多余的风电资源,在风电输出功率小于预测值时维持功率平衡。通过合理引导和调度可移峰负荷,能够使其避开高峰时段,在低谷时段用电,等效于增加了系统备用容量。对于含风电电力系统而言,由于风电的“反调峰”特性,用户在低谷时段增加的用电需求能够消纳部分风电出力,有效减少弃风,提高风能的利用率。可中断负荷在风电波动较大或负荷高峰期时,可以减少负荷需求量,等效于增加了系统正备用容量。当因风电出力低于预期值而出现发电机正旋转备用不足时,可中断负荷可以降低负荷水平,从而满足功率平衡要求,降低了风电对系统稳定可靠运行的影响。

综上,互动负荷能够较好地适应风电的随机波动特性,有利于改善大规模风电集中接入电网造成的发电备用容量不足问题。因此,将互动负荷纳入含风电场电力系统优化调度中,在发电计划中考虑源荷互动模式,对减轻常规机组的备用负担、增强电网消纳风电的能力、实现电网的经济安全运行具有重大意义。

2.3 互动负荷的模型

a. 可移峰负荷。在源荷互动模式下,可移峰负荷用户通过向调度中心申报用电意愿曲线和移峰成本曲线来参与电网调度运行。

用电意愿曲线反映了移峰前后负荷启用时间、负荷持续时间、负荷用电曲线的变化情况,调度中心根据用电意愿曲线提供的信息进行最优发电调度方案的计算,从而确定参与移峰的负荷用户和可移峰负荷的最优调用时间。因此,对于可移峰负荷 j ,其决策变量为启动变量 I_{sj}^t ;若可移峰负荷 j 在 t_{sj} 时段启动,则 $I_{sj}^t=1$;若在其他时段启动,则 $I_{sj}^t=0$, t_{sj} 为可移峰负荷 j 的启动时段。该决策变量决定了互动负荷的开始被调用时间,可以表述为:

$$I_{sj}^t = \begin{cases} 1 & t=t_{sj} \\ 0 & t \neq t_{sj} \end{cases} \quad (4)$$

根据式(4),可移峰负荷 j 在 t 时段的有功负荷 L_{sj}^t 为:

$$L_{sj}^t = \sum_{t_2=1}^{T_{sj}} S_j^{t_2} I_{sj}^{t-t_2+1} + \left(1 - \sum_{t_1=1}^T I_{sj}^{t_1}\right) L_{sj}^0 \quad (5)$$

其中, L_{sj}^0 为可移峰负荷 j 移峰前原始用电曲线在 t 时段的负荷值; $S_j^{t_2}$ 为可移峰用户 j 移峰后用电意愿曲线在 t_2 时段的负荷值; T_{sj} 为可移峰负荷 j 的持续时段数; T 为系统调度期间的时段数。

若可移峰负荷 j 被调用,通过式(5)等号右边的第1项,根据可移峰负荷启动变量 I_{sj} 优化结果中负荷启动时段 t_{sj} 的位置,将用电曲线序列 S_j 依次放置于有功负荷序列 L_{sj} 中从 t_{sj} 时段开始的相应时段。若可移峰负荷不被调用,则 L_{sj} 的取值由式(5)等号右边的第2项确定,与原始用电曲线一致。

移峰成本曲线表征了用户认为提供移峰服务后,应从电网公司获取的补偿价格,其数学描述如下:

$$C_{sj}^t = \begin{cases} K_{sj}(t_{sj0}-t) & 0 \leq t < t_{sj0} \\ 0 & t_{sj0} \leq t \leq t_{sj0} + T_{sj0} \\ K_{sj}(t-t_{sj0}-T_{sj0}) & t > t_{sj0} + T_{sj0} \end{cases} \quad (6)$$

其中, C_{sj}^t 为可移峰负荷 j 在 t 时段的移峰成本; K_{sj} 为可移峰负荷 j 的补偿系数,由用户与电力公司事先签订的负荷控制协议决定; t_{sj0} 和 T_{sj0} 分别为可移峰负荷 j 移峰前原始用电负荷启动时段和负荷持续时段数,用户在申报用电意愿曲线时根据原有的生产计划来确定,属于已知参数。

b. 可中断负荷。在源荷互动模式下,可中断负荷用户通过竞价方式申报可中断容量和补偿价格,调度中心通过计算最优发电调度方案来确定可中断参与用户及最优容量。调用第 k 个可中断负荷用户的补偿成本如式(7)所示^[25]:

$$C_{lk} = C_{lk0} Q_{lk}^t I_{lk}^t \quad (7)$$

其中, C_{lk0} 为合同中规定的可中断负荷 k 的单位削减负荷成本; Q_{lk}^t 为可中断负荷 k 在 t 时段的负荷削减量; I_{lk}^t 为可中断负荷的调用变量, $I_{lk}^t=1$ 表示可中断负荷被调用, $I_{lk}^t=0$ 表示未被调用。

3 基于源荷互动的含风电场电力系统多目标模糊优化调度模型

3.1 目标函数

传统的电力系统调度模型主要通过优化发电侧机组组合和负荷分配来实现经济调度。为了应对风电预测误差对发电调度的影响,满足日益增长的风电并网需求,本文在传统日前优化调度模型的基础上,综合考虑可移峰负荷和可中断负荷对风电消纳的作用,将互动负荷视为可调度资源融入发电调度,利用发电资源和用户资源的互动特性,建立了以运行成本和网损最小为目标,考虑电网安全约束的多目标优化调度模型。

a. 运行成本最小。运行成本包括电源侧发电成本、旋转备用成本和负荷侧互动负荷的调用互动成本。

$$\min F_1 = \sum_{i=1}^T \left\{ \sum_{i=1}^{N_G} U_{Gi}^t [C_{Gi}^t + (1 - U_{Gi}^{t-1}) C_{Gi}^0 + C_{Ri}^0] + \sum_{j=1}^{N_s} C_{sj}^t + \sum_{k=1}^{N_l} C_{lk}^t \right\} \quad (8)$$

其中, T 为系统调度期间的时段数; N_G 为发电机组台数; U_{Gi}^t 为发电机组 i 在 t 时段的状态变量, $U_{Gi}^t=0$ 表示发电机组处于停机状态, $U_{Gi}^t=1$ 表示发电机组处于开机状态; C_{Gi}^t 为发电机组 i 在 t 时段的发电成本, $C_{Gi}^t = a_i + b_i P_{Gi}^t + c_i (P_{Gi}^t)^2$, P_{Gi}^t 为发电机组 i 在 t 时段的有功出力; C_{li}^t 为发电机组 i 在 t 时段的启动成本,发电机组的启动成本与前后时段发电机运行状态有关,当 t 时段和 $t-1$ 时段的机组运行状态一致时启动成本为0,反之则不为0; C_{Ri}^0 为发电机组 i 的旋转备用成本; N_s 为可移峰负荷数量; C_{sj}^t 为可移峰负荷 j 在 t 时段的移峰成本; N_l 为可中断负荷数量; C_{lk}^t 为可中断负荷 k 在 t 时段的补偿成本。

b. 网损最小。互动负荷的调用必然会引起电网潮流分布的变化,从而对系统网损产生一定的影响。因此,本文将网损最小作为优化调度的另一个目标,这里采用 B 系数法对网损进行计算^[26]。

$$\min F_2 = \sum_{i=1}^T \left(\sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K P_i^t B_{ij} P_j^t + \sum_{i=1}^K B_{i,0} P_i^t + B_{0,0} \right) \quad (9)$$

其中, K 为系统节点数; B_{ij} 、 $B_{i,0}$ 、 $B_{0,0}$ 分别为 B 系数的二次项、一次项和常数项; P_i^t 、 P_j^t 分别为节点 i 和 j 的注入有功功率。

3.2 约束条件

约束条件包括系统功率平衡约束、正负旋转备用约束、机组出力约束、爬坡率约束和互动负荷调用约束等。

(1) 系统约束条件。

a. 功率平衡约束:

$$\sum_{i=1}^{N_G} U_{Gi}^t P_{Gi}^t + P_W^t + P_L^t = L_D^t + \sum_{j=1}^{N_S} L_{Sj}^t - \sum_{k=1}^{N_I} I_{Ik}^t Q_{Ik}^t \quad (10)$$

其中, P_W^t 为 t 时段风电场的预测功率; P_L^t 为 t 时段系统的有功损耗; L_D^t 为 t 时段非互动用户的有功负荷; Q_{Ik}^t 为可中断负荷 k 在 t 时段的负荷削减量; I_{Ik}^t 为可中断负荷的调用变量, 当可中断负荷被调用时 $I_{Ik}^t=1$, 此时 $I_{Ik}^t Q_{Ik}^t = Q_{Ik}^t$, 当可中断负荷未被调用时 $I_{Ik}^t=0$, 此时 $I_{Ik}^t Q_{Ik}^t=0$ 。与常规有功平衡约束相比, 式(10)中增加了互动负荷的调用情况。

b. 正旋转备用约束:

$$\sum_{i=1}^{N_G} U_{Gi}^t P_{Gi,up}^t + \sum_{k=1}^{N_I} I_{Ik}^t Q_{Ik}^t \geq R_{up}^t + R_{wind,up}^t \quad (11)$$

$$U_{Gi}^t P_{Gi,up}^t + U_{Gi}^t P_{Gi}^t < P_{Gi,max} \quad (12)$$

其中, R_{up}^t 为 t 时段为应对负荷预测误差和机组停运的正旋转备用需求; $R_{wind,up}^t$ 为 t 时段应对风电功率波动所需的正旋转备用; $P_{Gi,up}^t$ 为发电机组 i 在 t 时段的正旋转备用容量; $P_{Gi,max}$ 为发电机组 i 的输出功率上限。

c. 负旋转备用约束:

$$\sum_{i=1}^{N_G} U_{Gi}^t P_{Gi,down}^t + \sum_{j=1}^{N_S} L_{Sj}^t \geq R_{down}^t + R_{wind,down}^t \quad (13)$$

$$U_{Gi}^t P_{Gi}^t - U_{Gi}^t P_{Gi,down}^t < P_{Gi,min} \quad (14)$$

其中, R_{down}^t 为 t 时段系统负旋转备用需求; $R_{wind,down}^t$ 为 t 时段应对风电功率波动所需的负旋转备用; $P_{Gi,down}^t$ 为发电机组 i 在 t 时段的负旋转备用容量; $P_{Gi,min}$ 为发电机组 i 的输出功率下限。

(2) 机组约束条件。

a. 发电机输出功率上下限约束:

$$U_{Gi}^t P_{Gi,min} \leq P_{Gi}^t \leq U_{Gi}^t P_{Gi,max} \quad (15)$$

b. 最小启停时间约束:

$$\begin{cases} (U_{Gi}^{t-1} - U_{Gi}^t)(T_{Gi,on}^t - T_{Gi,on}^{min}) \geq 0 \\ (U_{Gi}^t - U_{Gi}^{t-1})(T_{Gi,off}^t - T_{Gi,off}^{min}) \geq 0 \end{cases} \quad (16)$$

其中, $T_{Gi,on}^t$ 和 $T_{Gi,off}^t$ 分别为发电机组 i 在 t 时段的开机持续时间和停机持续时间; $T_{Gi,on}^{min}$ 和 $T_{Gi,off}^{min}$ 分别为发电机组 i 的最小运行时间和最小停机时间。

c. 机组爬坡速度约束:

$$\begin{cases} P_{Gi}^t U_{Gi}^t - P_{Gi}^{t-1} U_{Gi}^{t-1} \leq P_{Gi,up} \\ P_{Gi}^{t-1} U_{Gi}^{t-1} - P_{Gi}^t U_{Gi}^t \leq P_{Gi,down} \end{cases} \quad (17)$$

其中, P_{Gi}^{t-1} 为发电机组 i 在 $t-1$ 时段的出力; $P_{Gi,up}$ 为发电机组 i 的上升出力限制; $P_{Gi,down}$ 为发电机组 i 的

下降出力限制。

(3) 互动负荷约束。

a. 互动负荷的调用次数约束:

$$\sum_t I_{Sj}^t \leq 1 \quad t \in [t_{Sj}, t_{Sj} + T_{Sj}] \quad (18)$$

$$\sum_{t=1}^T I_{Ik}^t \leq n_{Ik,max} \quad (19)$$

其中, $n_{Ik,max}$ 为可中断负荷 k 的中断次数限制。

b. 互动负荷的限值约束:

$$L_{Sj,min} \leq L_{Sj}^t \leq L_{Sj,max} \quad (20)$$

$$Q_{Ik,min} \leq Q_{Ik}^t \leq Q_{Ik,max} \quad (21)$$

其中, $L_{Sj,max}$ 、 $L_{Sj,min}$ 分别为可移峰负荷 j 的移峰容量上、下限; $Q_{Ik,max}$ 、 $Q_{Ik,min}$ 分别为可中断负荷 k 的中断容量上、下限。

c. 可移峰负荷用电意愿曲线调用的完整性约束:

$$\sum_t I_{Sj}^t = 0 \quad t \notin [t_{Sj}, t_{Sj} + T_{Sj}] \quad (22)$$

上式用于保证可移峰负荷用电意愿曲线在日内计划中被调用的完整性。

d. 可中断负荷中断持续时间约束:

$$\sum_{t=1}^T I_{Ik}^t \leq T_{Ik,max} \quad (23)$$

其中, $T_{Ik,max}$ 为可中断负荷 k 的中断总时间段数。

在上述模型中, 若不计互动负荷的调用, 则模型变为传统的大规模风电调度模型。

3.3 目标函数的模糊化

对于多目标优化问题, 可通过建立目标函数的隶属度函数来进行模糊化处理^[27-29]。由于本文模型的目标是在满足所有约束条件下, 尽可能降低系统的运行成本, 减少系统网损。因此, 当系统运行成本越小、网损越少时, 隶属度函数的隶属度应越大, 表明决策者对结果越满意。本文选用降半直线形作为各目标的隶属度函数:

$$\mu(F_i) = \begin{cases} 1 & F_i \leq F_i^* \\ (F_i^* + \delta_i - F_i) / \delta_i & F_i^* < F_i \leq F_i^* + \delta_i \\ 0 & F_i > F_i^* + \delta_i \end{cases} \quad (24)$$

其中, F_i 为第 i 个目标函数值; F_i^* 为第 i 个目标的理想值; δ_i 为决策者可接受的第 i 个目标的增加值, 是将目标进行一定的伸缩。隶属度函数如图 4 所示。

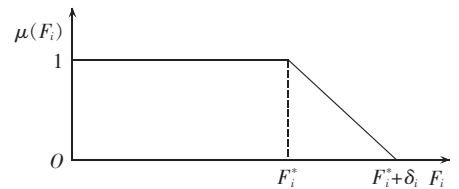


图 4 各目标相应隶属度函数

Fig.4 Membership function corresponding to different objectives

3.4 多目标模糊优化调度模型

设 μ 为所有目标隶属度函数中的最小值, 它可用

来表示决策的满意程度,其满意度指标为:

$$\mu = \min \{ \mu(F_1), \mu(F_2) \} \tag{25}$$

这样原问题转化为求解满足所有约束条件的满意度指标 μ 最大化的单目标非线性优化问题:

$$\begin{aligned} \max \quad & \mu \\ \text{s.t.} \quad & F_1 + \delta_1 \mu \leq F_1 + \delta_1 \\ & F_2 + \delta_2 \mu \leq F_2 + \delta_2 \\ & 0 \leq \mu \leq 1 \end{aligned} \tag{26}$$

其约束条件还包括式(10) — (23)。

4 多目标模糊优化模型的求解步骤

基于源荷互动的含风电场电力系统多目标优化调度模型求解步骤如下。

a. 输入原始数据,包括各时段非互动用户的负荷水平、风电场预测输出功率、系统正负旋转备用需求、发电机耗量成本系数、发电机有功输出上下限值、发电厂爬坡速率上下限值、可移峰负荷移峰成本曲线、可中断负荷补偿价格、互动负荷调用次数和容量上下限值。

b. 求解以运行成本最小为目标的优化调度模型(见式(8)),得到运行成本理想值 F_1^* 、网损 F_2^* 、发电机组启停状态、各机组出力情况及互动负荷调用情况。

c. 求解以网损最小为目标的优化调度模型(见式(9)),得到运行成本 F_1' 、网损理想值 F_2^* 、发电机组启停状态、各机组出力情况及互动负荷调用情况。

d. 将各单目标值进行伸缩,确定 δ_1, δ_2 ,由于为双目标模糊优化,优化后结果不能低于 F_1^* ,也不能超过 F_1' ,因此, δ_1, δ_2 的取值范围分别为 $0 \leq \delta_1 \leq F_1' - F_1^*$ 、 $0 \leq \delta_2 \leq F_2' - F_2^*$ 。根据决策者的要求,可进行不同程度的伸缩,充分体现其意愿和偏好。

e. 将 $\delta_1, F_1^*, \delta_2, F_2^*$ 分别代入式(24),可得各目标的隶属度函数表达式。

f. 将多目标优化问题转换为单目标非线性优化问题,并采用进化算法求解,得到最大化满意度时各时段机组的启停状态和出力情况,以及互动负荷的调用情况。

5 算例分析

以 IEEE 30 节点系统为例对本文模型进行仿真

验证,系统接线图和常规机组数据分别见图 5、表 1。该系统包含 1 个并网风电场,节点 27 为风电场并网节点。风电场共有 100 台风电机组,总装机容量为 200 MW。常规机组的正负旋转备用需求为最大机组容量的 20%。日前 24 时段风电功率的预测曲线和负荷预测曲线分别如图 6、7 所示。

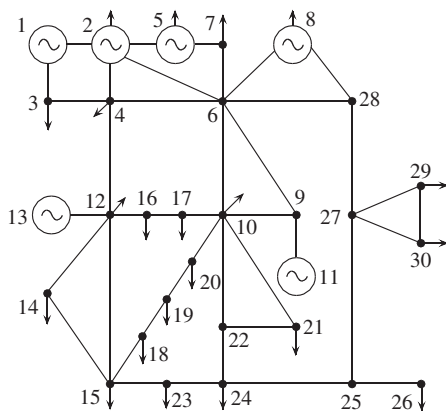


图 5 IEEE 30 节点系统接线图

Fig.5 Wiring diagram of IEEE 30-bus system

算例在节点 10、12、29 处构造 3 个可移峰负荷,在节点 7、19、21 和 30 处构造 4 个可中断负荷。可移峰负荷的用电意愿曲线和移峰成本分别见图 8、图 9。可中断负荷的中断容量、中断持续时间和补偿价格列于表 2。

表 3 为分别以运行成本最小和网损最小为目标的单目标优化结果。

将 F_1 的理想值取为 \$634 027, $F_1 + \delta_1$ 取为 \$655 075, F_2 的理想值取为 121.3 MW, $F_2 + \delta_2$ 取为 168.5 MW,则以运行成本和网损最小的多目标优化结果如表 4 所示。

由表 4 可以看出,当全局最优时满意度 $\mu=0.825$,此时系统的运行成本为 \$ 637668,网损为 129.6 MW。通过优化计算,可移峰负荷 1、2 和可中断负荷 1、2、3 被调用,其中,可中断负荷 1 在时段 14 被调用,可中断负荷 2 在时段 17 被调用,可中断负荷 3 在时段 12 被调用。虽然可移峰负荷 3 和可中断负荷 4 的调节容量较大,但由于其移峰成本和中断补偿价格较高,导致系统运行费用增加,难以满足电网经济运行

表 1 常规机组数据

Table 1 Data of conventional unit

机组编号 (所在节点)	发电成本系数			备用成本系数		出力极限		上升/下降出力限制	
	$a_i / (\$ \cdot h^{-1})$	$b_i / [\$ \cdot (MW \cdot h)^{-1}]$	$c_i / [\$ \cdot (MW^2 \cdot h)^{-1}]$	$d_i / [\$ \cdot (MW \cdot h)^{-1}]$	$e_i / [\$ \cdot (MW \cdot h)^{-1}]$	$P_{Gi,max} / MW$	$P_{Gi,min} / MW$	$P_{Gi,up} / (MW \cdot h^{-1})$	$P_{Gi,down} / (MW \cdot h^{-1})$
1(1)	786.79	38.53	0.1524	16	19	200	50	50	50
2(2)	945.63	46.15	0.1058	14	15	100	25	30	30
3(5)	1049.99	40.39	0.0280	13	12	60	15	15	15
4(8)	1243.53	38.30	0.0354	13	11	80	20	20	20
5(11)	1658.56	36.32	0.0211	10	13	40	10	15	15
6(13)	1356.65	38.27	0.0179	9	10	40	10	15	15

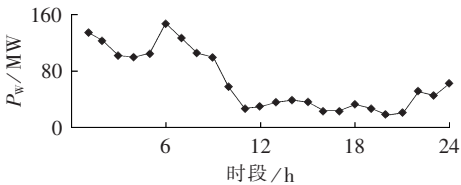


图 6 日前 24 时段风电功率预测曲线

Fig.6 Day-ahead wind power prediction curve

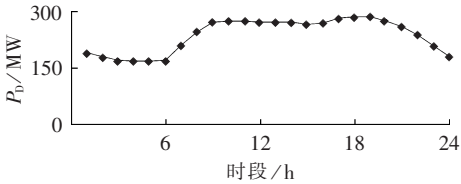


图 7 日前 24 时段负荷预测曲线

Fig.7 Day-ahead load prediction curve

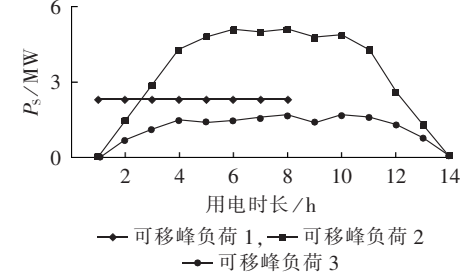


图 8 可移峰负荷的用电意愿曲线

Fig.8 Shiftable load curves

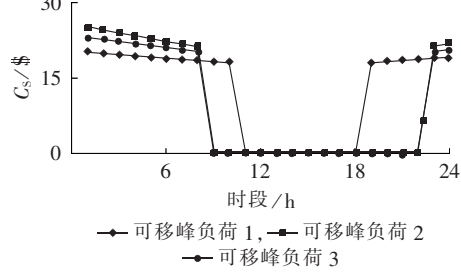


图 9 可移峰负荷的移峰成本曲线

Fig.9 Cost curve of shiftable loads

表 2 可中断负荷参数

Table 2 Parameters of interruptible loads

可中断负荷编号 (所在节点)	中断容量/ MW	补偿价格/ [\$·(MW·h) ⁻¹]	最大中断 次数	中断持续 时间/h
1(7)	4.2	10	2	2
2(19)	2.1	5	2	2
3(21)	3.5	8	2	4
4(30)	5.6	15	2	4

表 3 单目标优化结果

Table 3 Results of single-objective optimization

优化目标	$F_1/\$$	F_2/MW
运行成本最小	634 027	146.8
网损最小	653 166	121.3

的需要,因此不参与互动。由此可知,降低互动负荷的互动成本,让更多的互动负荷参与电网调度,不仅能够降低系统的运行成本,还能为电网提供更多的备用,

表 4 多目标优化结果

Table 4 Results of multi-objective optimization

μ	$\mu(F_1)$	$\mu(F_2)$	$F_1/\$$	F_2/MW
0.433	0.869	0.433	636 784	148.1
0.512	0.845	0.512	637 289	144.3
0.694	0.831	0.694	637 584	130.3
0.825	0.827	0.825	637 668	129.6

使电网有足够的调节能力来应对风电的随机波动性,进一步提高了风电的消纳能力。

图 10 和图 11 分别为采用传统优化调度模型和基于源荷互动的多目标优化调度模型得到的常规机组出力曲线。

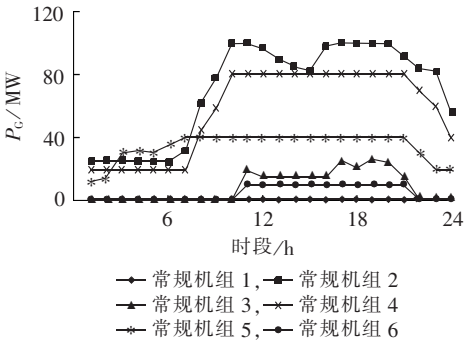


图 10 传统优化调度模型下的常规机组出力曲线

Fig.10 Output curve of conventional units by traditional optimal dispatch model

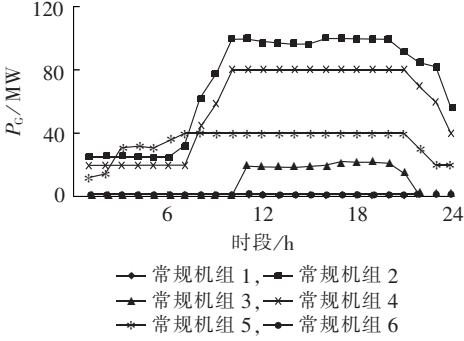


图 11 源荷互动优化调度模型下的常规机组出力曲线

Fig.11 Output curve of conventional units by optimal dispatch model based on source-load interaction

由图 10、图 11 可以看出,在传统优化调度模型中,为了消纳风电,需要常规机组在风电多发时降低出力,在风电少发时增加出力,导致常规机组的出力曲线不够平稳,而风电的反调峰特性加剧了系统的峰谷差,只有通过启停常规机组 3 和常规机组 6 才能满足系统的调峰需求。在基于源荷互动的多目标优化调度模型中,通过调用互动负荷,减小了系统的峰谷差,不用启停常规机组 6 便能满足调峰需求,常规电源的出力曲线也更加平稳。

下面对传统优化调度模型和基于源荷互动的多目标优化调度模型计算结果进行对比分析,并从运行成本效益、网损和风电穿透功率极限 3 个方面来

验证本文模型的有效性。

a. 运行成本效益。

计算采用传统模型和本文模型 2 种方式下,系统运行总成本如表 5 所示。

表 5 系统运行总成本

Table 5 Total operational cost of system				\$
计算方法	发电成本	备用成本	互动成本	总成本
传统模型	586294	69888	0	656182
本文模型	541826	21240	74602	637668

由表 5 可知,采用本文模型时系统的运行总成本比采用传统模型时的低。结果表明,将互动负荷纳入系统调度体系,可以提高电力系统的运行效率,其原因是互动负荷具有良好的削峰填谷特性,能够使发电机组运行于更经济高效的负载水平,减少发电机组频繁启停,从而降低系统的发电成本。对于含风电场的电力系统而言,互动负荷还能够降低系统因风电随机波动性而增加的备用费用。因此,基于源荷互动的优化调度模型能够有效降低风电场接入后电力系统的运行成本。

b. 系统网损。

计算采用传统模型和本文模型 2 种方式下,系统网损如表 6 所示。

表 6 系统网损
Table 6 Grid loss of system

计算方法	网损/MW
传统模型	139.2
本文模型	129.6

通过合理调度和引导互动负荷,能够对系统进行削峰填谷,使电力负荷运行状态更加平稳,从而降低系统的负荷率,减少网损。对于含风电场的系统而言,调用距离风电场近的互动负荷,能够就地消纳风电,从而减少因大规模风电远距离传输而增加的网损。

c. 风电穿透功率。

计算采用传统模型和本文模型 2 种方式下,系统风电穿透功率如表 7 所示。

表 7 风电穿透功率
Table 7 Penetration power of wind power

计算方法	风电穿透功率/MW
传统模型	447
本文模型	496

通过发挥互动负荷对风电消纳的效用,可以降低风电随机波动性和反调峰特性对系统消纳风电能力的限制,有效提高系统对风电的消纳能力,减少了系统的“弃风”风险。

6 结论

本文从风电接入电网对调度运行带来的影响出

发,研究了智能电网环境下用户侧负荷的可调峰和可中断的互动特性,探讨了以申报用电意愿和互动成本为基础使用户负荷与发电资源共同参与电网调度运行的可能性。在此基础上,将互动负荷纳入含风电场电力系统优化调度问题,建立了以运行成本和网损最小的多目标优化调度模型。该模型通过合理引导和调度互动负荷,能够在低谷时段增加用电需求,减少风电弃风量;在高峰时段削减用电需求,降低了风电随机波动和发电备用不足对系统安全运行的影响。最后的算例仿真结果表明,本文模型能够发挥互动负荷对风电消纳的积极作用,协调优化常规水电、风电与互动负荷的资源配置,提高系统运行经济性和风电上网功率,对安排计及风电的日前发电计划具有一定的理论参考价值。

参考文献:

[1] 张成相. 含风电场的电力系统优化调度研究[D]. 北京:华北电力大学,2012.
ZHANG Chengxiang. Research on scheduling optimization of wind power integrated system[D]. Beijing:North China Electric Power University,2012.

[2] 张军,李小春. 国际能源与新能源技术进展[M]. 北京:科学出版社,2007:2-3.

[3] 姜文,程叶霞,严正,等. 考虑可靠性约束的含风电场电力系统动态经济调度[J]. 电力自动化设备,2013,33(7):27-33.
JIANG Wen,CHENG Yexia,YAN Zheng,et al. Reliability-constrained dynamic economic dispatch of power system with wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(7):27-33.

[4] 肖创英,汪宁渤,眭晶,等. 甘肃酒泉风电出力特性分析[J]. 电力系统自动化,2010,34(17):64-67.
XIAO Chuangying,WANG Ningbo,ZHI Jing,et al. Power characteristics of Jiuquan wind power base[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(17):64-67.

[5] 赵晋泉,唐洁,罗卫华,等. 一种含风电电力系统的日前发电计划和旋转备用决策模型[J]. 电力自动化设备,2014,34(5):21-27.
ZHAO Jinquan,TANG Jie,LUO Weihua,et al. Day-ahead generation scheduling and spinning reserve decision-making model for power grid containing wind power[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(5):21-27.

[6] 杨楠,王波,刘涤尘,等. 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(26):63-69.
YANG Nan,WANG Bo,LIU Dichen,et al. An integrated supply-demand stochastic optimization method considering large-scale wind power and flexible load[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(26):63-69.

[7] 孙慧娟,彭春华,易洪京. 大规模风电接入电网多目标随机优化调度[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):123-128.
SUN Huijuan,PENG Chunhua,YI Hongjing. Multi-objective stochastic optimal dispatch of power system with wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):123-128.

[8] 杨洪明,王爽,易德鑫,等. 考虑多风电场出力相关性的电力系统

- 随机优化调度[J]. 电力自动化设备,2013,33(1):114-120.
- YANG Hongming, WANG Shuang, YI Dexin, et al. Stochastic optimal dispatch of power system considering multi-wind power correlation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 114-120.
- [9] 陈海焱, 陈金富, 段献忠. 含风电场电力系统经济调度的模糊建模及优化算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 22-26.
- CHEN Haiyan, CHEN Jinfu, DUAN Xianzhong. Fuzzy modeling and optimization algorithm on dynamic economic dispatch in wind power integrated system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 22-26.
- [10] 周玮, 彭昱, 孙辉, 等. 含风电场的电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(25): 13-18.
- ZHOU Wei, PENG Yu, SUN Hui, et al. Dynamic economic dispatch in wind power integrated system[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(25): 13-18.
- [11] HETZER J, YU D C, BHATTARAI K. An economic dispatch model incorporating wind power[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(2): 603-611.
- [12] 郑晓, 张静, 马韬韬, 等. 基于改进决策方法的电力系统多目标优化调度[J]. 电工技术学报, 2010, 25(9): 151-156.
- ZHENG Xiao, ZHANG Jing, MA Taotao, et al. Power system multi-objective optimization dispatch based on an improved decision-making method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(9): 151-156.
- [13] 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.
- [14] 王卿然, 谢国辉, 张粒子. 含风电系统的发用电一体化调度模型[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(5): 15-18.
- WANG Qingran, XIE Guohui, ZHANG Lizi. An integrated generation-consumption dispatch model with wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(5): 15-18.
- [15] 刘小聪, 王蓓蓓, 李扬, 等. 智能电网下计及用户侧互动的发电日前调度计划模型[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 30-39.
- LIU Xiaocong, WANG Beibei, LI Yang, et al. Day-ahead generation scheduling model considering demand side interaction under smart grid paradigm[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 30-39.
- [16] 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.
- AI Xin, LIU Xiao. Chance constrained model for wind power usage based on demand response[J]. Journal of North China Electric Power University: Natural Science Edition, 2011, 38(3): 17-22.
- [17] 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.
- [18] 夏叶, 康重庆, 宁波. 用户侧互动模式下发用电一体化调度计划[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(1): 17-23.
- XIA Ye, KANG Chongqing, NING Bo. A generation and load integrated scheduling on interaction mode on customer side[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(1): 17-23.
- [19] 苏鹏, 刘天琪, 李兴源. 含风电的系统最优旋转备用确定[J]. 电网技术, 2010, 34(12): 158-162.
- SU Peng, LIU Tianqi, LI Xingyuan. Determination of optimal spinning reserve of power grid containing wind[J]. Power System Technology, 2010, 34(12): 158-162.
- [20] 李俊雄, 黎灿兵, 曹一家, 等. 面向智能电网的互动式节能调度初探[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(8): 20-25.
- LI Junxiong, LI Canbing, CAO Yijia, et al. Preliminary investigation on interactive energy-saving dispatch oriented to smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(8): 20-25.
- [21] 张钦, 王锡凡, 王建党, 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): 97-106.
- 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): 97-106.
- [22] 宋全清. 冰储冷空调系统在电网调峰中的应用[J]. 湖北电力, 1999, 23(2): 26-28.
- SONG Quanqing. Application of air conditioning system with ice cold storage for peak valley load regulation[J]. Hubei Electric Power, 1999, 23(2): 26-28.
- [23] 孔祥清. 可中断负荷参与系统备用的研究[D]. 成都: 西华大学, 2012.
- KONG Xiangqing. A study of interruptible load participating in system reserve[D]. Chengdu: Xihua University, 2012.
- [24] 王蓓蓓, 刘小聪, 李扬. 面向大容量风电接入考虑用户侧互动的系统日前调度和运行模拟研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 35-44.
- WANG Beibei, LIU Xiaocong, LI Yang. Day-ahead generation scheduling and operation simulation considering demand response in large-capacity wind power integrated systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 35-44.
- [25] 王蓓蓓, 李扬. 面向智能电网的电力需求侧管理规划及实施机制[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(12): 19-24.
- WANG Beibei, LI Yang. Demand side management planning and implementation mechanism for smart grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(12): 19-24.
- [26] 郭壮志, 吴杰康, 孔繁锦. 基于仿电磁学算法和数据包络分析的水火电力系统多目标优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 53-61.
- GUO Zhuangzhi, WU Jiekang, KONG Fannie. Multi-objective optimization scheduling for hydrothermal power systems based on electromagnetism-like mechanism and data envelopment analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 53-61.
- [27] 张晓花, 赵晋泉, 陈星莺. 节能减排多目标机组组合问题的模糊建模及优化[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 71-76.
- ZHANG Xiaohua, ZHAO Jinquan, CHEN Xingying. Multi-objective unit commitment fuzzy modeling and optimization for energy-saving and emission reduction[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 71-76.
- [28] 吴杰康, 唐力. 含不确定性负荷的水火电力系统随机优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 36-43.
- WU Jiekang, TANG Li. Stochastic optimization scheduling method for hydrothermal power systems with stochastic loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 36-43.
- [29] 周明, 姜雅融. 兼顾购电费用和煤耗的双目标加权模糊发电调

Strategy of MPPT control without current sensors for photovoltaic system

WANG Panbao,WANG Wei,WU Yan

(School of Electrical Engineering and Automation,Harbin Institute of Technology,Harbin 150001,China)

Abstract: As the control of two-stage photovoltaic grid-connected inverter is decoupled between two stages, a strategy of MPPT(Maximum Power Point Tracking) control without current sensors is proposed. According to the power balance principle,the grid-connecting current acquired in the second stage can be used as the MPPT criterion of the first stage(DC-DC section). The perturbation and observation method is then applied to realize the MPPT. The proposed MPPT control strategy is analyzed in principle. An 800 W prototype of two-stage photovoltaic grid-connected inverter is designed,and the experimental waveforms and MPPT data are recorded,which show that,when the operating power of system is bigger than 300 W,the MPPT efficiency is higher than 99.2% and the tracking response is perfect,verifying the feasibility and effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: MPPT; current sensor; grid-connection; electric inverters; photovoltaic; electric power generation; control

(上接第 63 页 continued from page 63)

度模型[J]. 电网技术,2010,34(11):140-145.

ZHOU Ming,LOU Yarong. A bi-objective weighted fuzzy generation dispatching model considering both power purchase cost and coal consumption[J]. Power System Technology,2010,34(11):140-145.

作者简介:

刘文颖(1955—),女,北京人,教授,博士研究生导师,从



刘文颖

事电力系统分析与控制、电力系统智能调度及大电网安全防御方面的研究;

文 晶(1987—),女,陕西汉中,人,博士研究生,从事电力系统运行、分析与控制方面的研究(E-mail:wenjing0916@163.com);

谢 昶(1983—),男,河南南阳人,博士,从事电力系统在线安全分析方面的研究。

Multi-objective fuzzy optimal dispatch based on source-load interaction for power system with wind farm

LIU Wenyang¹,WEN Jing¹,XIE Chang²,WANG Weizhou³,LIU Fuchao³

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources,North China Electric Power University,Beijing 102206,China;2. China Electric Power Research Institute,Beijing 100192,China;3. State Grid Gansu Provincial Electric Power Research Institute,Lanzhou 730050,China)

Abstract: The characteristics of interactive load are studied and the interactive load is introduced as a dispatchable resource into traditional day-ahead dispatch model to mitigate the influence of wind power fluctuation. A multi-objective optimal dispatch model with the minimum operating cost and power loss as its objectives is built for the power system with wind farm,which considers the influence of interactive load on the cost of system operation and the distribution of power flow. The fuzzy theory is applied to convert multi-objective optimization problem into single-objective optimization problem,which allows the generation side and demand side both to participate in the optimal resource allocation of power grid operation. The simulative results of IEEE 30-bus system verify that,the proposed method can effectively reduce the operating cost and grid loss of system and enhance the consumption of wind power.

Key words: wind power; electric power systems; interactive load; optimization; dispatch; multi-objective; models; fuzzy theory