基于负荷控制的高风光渗透率地区电网调峰方案

程乐园[1]，李文启[1]，张 曦[2]，牛元立[1]，党 彬[1]，徐 箭[2]，王振华[1]

（1. 国网河南省电力公司安阳供电公司，河南 安阳 455000；2. 武汉大学电气与自动化学院，湖北 武汉 430072）

摘要：随着新能源并网容量不断增加，弃风弃光现象普遍出现。以消纳高风光渗透率地区大规模新能源为目的，将高耗能负荷作为可控对象，可以实现联合调峰。分析了典型高耗能负荷的控制特性，考虑了联络线的调节能力，提出了基于负荷控制的调峰方案；该方案建立的数学模型为混合整数非线性模型，选择Cplex求解器进行求解。结合工程实际算例进行仿真分析，验证了在不同联络线波动范围下负荷控制参与调峰的经济价值及对新能源的消纳作用。

关键词：高耗能负荷；负荷控制；联合调峰；新能源消纳

Peak shaving regulating scheme based on load control in high wind and photovoltaic power penetration regions

CHENG Leyuan[1], LI Wenqi[1], ZHANG Xi[2], NIU Yuanli[1], DANG Bin[1], XU Jian[2], WANG Zhenhua[1]

(1. Anyang Power Supply Company, State Grid Henan Electric Power Company, Anyang 455000, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The phenomenon of wind power curtailment and photovoltaic power curtailment is widespread under the continuous increase of grid-connected capacity of new energy generation. In order to accommodate large-scale new energy sources in high wind and photovoltaic power penetration regions, the high energy load can be included as a controllable object in power system dispatching, which can achieve joint regulation of peak shaving. After the analysis of control characteristics of typical high energy loads, a load control based peak shaving optimization scheme considering the adjustment ability of cross regional tie lines is proposed. The mathematical model established by this scheme is a mixed-integer nonlinear model, so that the Cplex solver is used to solve the model. An actual engineering example is used for simulation analysis. The simulation results verify the economic value and the new energy accommodation of load control participated peak shaving regulation under different tie lines fluctuation ranges.

Key words: high energy load; load control; joint regulation of peak shaving; new energy accommodation

0 引言

随着我国风电、光伏产业的大力发展，高风光渗透率地区电网普遍出现了较严重的弃风弃光现象[1]，消纳大规模新能源成为亟待解决的难题。造成弃风弃光的原因包括系统外送通道狭窄、调峰能力不足等[2]，因此有必要提高系统调峰水平。

国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900105)；国网河南省电力公司科技项目(52173017000Y)

传统的火电调峰受限于机组特性调节速度很慢，与新能源出力波动时间尺度不同，因而难以响应其出力的快速变化；而其他调峰方式如抽水蓄能调峰等对建设条件有严格要求，无法在全部地区推广。在此背景下，考虑利用需求侧负荷平抑风光出力波动，减小电力系统峰谷差[3]。

在众多需求侧负荷中，高耗能负荷因能耗密度大、可调节可中断及调控速度快等特点，在辅助新能源消纳方面取得了一定的研究成果[4-9]。文献[5]计及风电出力的概率特性，构建了度量系统运行风险的数学表达方式，建立了柔性负荷参与调峰的风电随机优化调度模型。文献[6]建立了电解铝、碳化硅和铁合金三种高耗能负荷的电网调峰能力评估模型、调峰缺口量化模型及效果评价模型。文献[7]研究了一种高耗能负荷参与的源荷协调优化调度模式，以风电消纳量最大和系统运行成本最小为目标，使用多目标差分算法进行求解。文献[8]建立了计及风电消纳效益的源荷协调二层优化模型，上层模型决策常规电源出力和风电调度出力，下层模型将负荷控制任务分配给具体机组。文献[1]提出了高耗能负荷与风电联合运行模式的四个环节，建立了含可平移负荷的机组组合模型并分析了其主要影响因素。文献[9]将储能装置与负荷侧资源和常规机组同时纳入优化调度，构建“源－荷－储”协调互动电力系统优化调度模型。

上述研究主要从高耗能负荷可调节可中断的角度，研究消纳已知出力新能源的策略，很少考虑到联络线的功率波动问题，而是将其交换功率设置为恒定值或将电网视为自给自足，这与电力系统实际情况不符。当地区电网新能源渗透率较高，难以实现就地全额消纳时，上述研究成果的实用性将有所降低。同时，部分研究仅将高耗能负荷作为可调对象，没有涉及其调节性能，没有考虑其主要服务于生产而不是电力调度的特征，因而缺乏必要的约束。

基于上述背景，本文针对高耗能负荷参与调峰促进高风光渗透率地区新能源消纳的问题开展的研究内容如下。首先分析了典型高耗能负荷的调峰性能；随后建立了含负荷控制的优化调峰方案，并结合考虑了联络线的不同允许波动范围；最后利用实际工程算例进行仿真计算，验证了该模型的优化效果，论证了高耗能负荷在消纳大规模新能源中的作用。

1 高耗能负荷调峰性能分析

现阶段有条件参与调峰的高耗能负荷可分为电解槽类和电弧炉类两种。其中，电解铝、电积锌等属于电解槽类，冶钢、制磷等属于电弧炉类。现以电解铝和冶钢为例，分析两类高耗能工业负荷的调峰性能。

1.1 电解铝负荷调节能力分析

电解铝企业95%左右的负荷需连续生产[10]，且为直流供电，对电网侧电压频率波动不敏感，可视为恒功率负荷[11]，可调容量较稳定，是理想的负荷控制对象。

电解铝负荷输入功率直接影响电解槽温度。随着温度降低，其工作状态可分为生产、保温和凝槽三个阶段[12]。将负荷向下调节控制在电解槽具备生产条件范围内，此时调节不影响设备寿命和产品质量，仅影响产量。

通过改造，励磁电压控制器[13]和饱和电抗器[14]可以成为控制对象。将两种调节手段结合[15]，电解铝负荷功率的向下调节范围可达25%[16]。同时，电解铝负荷的额定工况通常为最大负荷的95%[17]，因此也有5%的向上调节空间。

1.2 冶钢负荷调节能力分析

冶钢负荷的可控部分主要为电弧炉负荷。电弧炉生产的基本原理是炉体电极与炉料放电产生电弧，利用产生的热量融化炉料。电极高度可以调整，当升高电极时，电弧拉长，电弧电阻增加，电流减小，因而电弧炉负荷降低；反之，降低电极可以提高负荷。因而可通过升降电极实现负荷调节。

在钢厂的全生产流程中，可控负荷占比相较于电解铝较小，因而负荷调节范围也较小。同时，就现有工艺而言，冶钢负荷上调比较困难。

1.3 负荷控制调峰模型

高耗能负荷参与调峰的基本原理是其有功功率可围绕额定值在一定范围内波动。因此，对参与调峰的高耗能负荷，其功率可以等效为一个负荷和一台发电机的叠加，即

$$P_{li.act} = P_{li.set} - P_{li}(t) \tag{1}$$

式中，$P_{li.act}$为第i处可控高耗能负荷的实际值；$P_{li.set}$为额定值；$P_{li}(t)$为该负荷等效发电机在t时刻的调节量；由于当发电机出力为负数时，等效负荷向上调节；发电机出力为正数时，等效负荷向下调节，因此两部分用负号连接。

当调度高耗能负荷参与调峰时，需要对负荷偏离额定工况的最大运行时长进行限制。同时，两次调度之间也应留有一定的不受控时段。当调度周期较长时，根据负荷企业的意愿，可能还需就全周期内的最大受控次数进行约定。同时，高耗能负荷调节范围小、调节速度快，因此在较长时间尺度的问题中可以忽略爬坡约束。

综上所述，负荷调节具有调节范围小、调节速度快和连续调节时间短的特点。因此，负荷调节适用于平抑新能源的短时波动，特别是短时出力下降，以弥补火电机组调峰速度较慢的不足。

2 含负荷控制优化调峰模型

本文以火电机组出力调整、负荷控制、弃风、弃光和联络线功率交换作为五种调节手段建立含负荷控制的优化调峰模型，以经济成本最优为目标。

2.1 目标函数

（1）火力发电燃料成本

火电调峰包含起停调峰和调荷调峰两种形式，其中，前者主要适用于100 MW及以下机组，后者主要适用于更大容量机组。考虑到地区电网装机规模和实际运行情况，所提出的调峰方案不涉及起停调峰，火电机组成本以燃料成本$C_{gi}(t)$表征

$$C_{gi}(t) = a_i P_{gi}^2(t) + b_i P_{gi}(t) + c_i \tag{2}$$

式中，$P_{gi}(t)$为t时刻第i台机组发出的有功功率；a_i、b_i和c_i为该机组燃料成本曲线系数。

（2）负荷控制调峰成本

负荷向下调节，功率降低产量也会降低；负荷向上调节，设备将承担更高的电压电流，可能受到影响。因此，对高耗能负荷的上下调节统一按其损失的利益进行补偿，调峰成本$C_{li}(t)$的表达式为

$$C_{li}(t) = n_i \left| P_{li}(t) \right| I_{li}(t) \tag{3}$$

式中，n_i为电网对该负荷的补偿系数；$I_{li}(t)$为表征负荷受控状态的0－1变量，即

$$I_{li}(t) = \begin{cases} 0，\text{负荷}i\text{在}t\text{时刻没有被调节} \\ 1，\text{负荷}i\text{在}t\text{时刻被调节} \end{cases}$$

（3）弃风弃光惩罚函数

风电场和光伏电站运行成本较小，因而忽略其发电成本。当地区电网风光渗透率较高时，如不能拓宽外送通道，在风光大发负荷较小时，必然需要弃风弃光以实现系统平衡。将弃风量和弃光量相应的惩罚函数加入目标函数，通过调整罚因子的大小可以灵活决策系统的消纳能力。

弃光罚函数$C_{pi}(t)$和弃风罚函数$C_{wi}(t)$如下，即

$$C_{pi}(t) = \alpha_i [P_{pi\cdot fore}(t) - P_{pi}(t)] \tag{4}$$

$$C_{wi}(t) = \beta_i [P_{wi\cdot fore}(t) - P_{wi}(t)] \tag{5}$$

式中，α_i、β_i分别为第i个光伏电站的弃光罚因子和第i个风场的弃风罚因子；$P_{pi.fore}(t)$、$P_{wi.fore}(t)$分别为该光伏电站或风电场t时刻的预测最大出力；$P_{pi}(t)$、$P_{wi}(t)$为实际调度出力。

综上所述，所建立的优化调峰模型目标函数F由四部分组成，分别为火电机组发电成本、负荷控制调峰成本、弃光参与调峰的惩罚函数以及弃风参与调峰的惩罚函数，其表达式为

$$\min F = \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N_g} C_{gi}(t) + \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N_l} C_{li}(t) + \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N_p} C_{pi}(t) + \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N_w} C_{wi}(t) \tag{6}$$

式中，T为全调度周期；N_g、N_l、N_p和N_w分别为系统中火力发电厂、可控负荷、光伏电站以及风电场的个数。

2.2 约束条件

（1）火电调峰约束

火电调峰约束包含的出力极限约束和爬坡

约束为

$$\text{s. t.}\begin{cases} P_{gi\cdot\min} \leqslant P_{gi}(t) \leqslant P_{gi\cdot\max} \\ -R_{gi}^{\text{down}}\Delta t \leqslant P_{gi}(t)-P_{gi}(t-1) \leqslant R_{gi}^{\text{up}}\Delta t \end{cases} \tag{7}$$

式中，$P_{gi.\min}$、$P_{gi.\max}$为第i号火电机组出力的上下限；R_{gi}^{up}、R_{gi}^{down}为该机组单位时间内的上下爬坡能力；Δt为调度时间尺度。

（2）负荷控制约束

参与调峰的高耗能负荷可控部分等效为一台发电机，也存在调节极限。

$$\text{s. t.}\ -\lambda_{i1}P_{li.\text{set}} \leqslant P_{li}(t) \leqslant \lambda_{i2}P_{li.\text{set}} \tag{8}$$

式中，λ_{i1}、λ_{i2}分别为该负荷向上调节和向下调节的最大比例。

负荷最大连续受控时间约束为

$$\text{s. t.}\begin{cases} \sum_{t=1}^{S_{li}-S_{li.0}+1} I_{li}(t) \leqslant S_{li}-S_{li.0} \\ \sum_{t=k}^{k+S_{li}} I_{li}(t) \leqslant S_{li} \quad k=1,2,\cdots,T-S_{li} \end{cases} \tag{9}$$

式中，S_{li}为该负荷最大连续受控时间；$S_{li.0}$为该负荷在本调度周期起始时已积累的连续受控时间。

式（9）分别对可控负荷的初始时刻和后续其他时刻进行了约束。

负荷最小受控间隔约束为

$$\text{s. t.}\begin{cases} \sum_{t=1}^{G_{li}-G_{li.0}+1} I_{li}(t)=0 \\ \sum_{t=k}^{G_{li}+k-1} [1-I_{li}(t)] \geqslant G_{li}[I_{li}(t-1)-I_{li}(t)] \quad k=2,\cdots,T-G_{li} \\ \sum_{t=k}^{T}[1-I_{li}(t)-I_{li}(k-1)+I_{li}(k)] \geqslant 0 \quad k=T-G_{li}+2,\cdots,T \end{cases} \tag{10}$$

式中，G_{li}为第i处受控负荷的最小受控间隔；$G_{li.0}$为起始时刻已累积间隔时间。

式（10）分别对起始时刻、中间时刻和调度周期末尾时刻进行了约束。

全调度周期最大受控次数约束为

$$\text{s. t.}\sum_{t=2}^{T}|I_{li}(t)-I_{li}(t-1)| \leqslant 2N_{li} \tag{11}$$

式中，N_{li}为第i处可控负荷在全周期内的最大受控次数。

（3）风光出力约束

风电和光伏发电的出力均应为正值，且不应大于最大预测出力，即

$$\text{s. t.}\begin{cases} 0 \leqslant P_{pi}(t) \leqslant P_{pi.\text{fore}}(t) \\ 0 \leqslant P_{wi}(t) \leqslant P_{wi.\text{fore}}(t) \end{cases} \tag{12}$$

（4）联络线功率波动约束

随着新能源渗透率的提高，其出力不确定性大大增加了系统源荷平衡的难度，就地平抑难以完成。特别是对于新能源大规模接入地区，由于本地的传统电源规模难以与新能源装机相匹配，考虑适当的跨区调峰具有必要性和实用价值。但考虑到联络线两端电网的承受能力和备用情况，以及电力系统安全稳定分析计算结果，联络线允许的最大波动量具有一定范围，其表达式为

$$\text{s. t.}\ P_{\text{out.min}} \leqslant P_{\text{out}}(t) \leqslant P_{\text{out.max}} \tag{13}$$

式中，$P_{\text{out}}(t)$为联络线交换功率；$P_{\text{out.min}}$、$P_{\text{out.max}}$分别为联络线允许传输的最小和最大功率。

（5）系统约束

系统还应满足功率平衡约束和系统备用容量约束，即

$$\text{s. t.}\ \sum_{i=1}^{N_g}P_{gi}(t)+\sum_{i=1}^{N_p}P_{pi}(t)+\sum_{i=1}^{N_w}P_{wi}(t)+\sum_{i=1}^{N_l}P_{li}(t)I_{li}(t)=P_d(t)+P_{\text{out}}(t) \tag{14}$$

式中，$P_d(t)$为t时刻系统总负荷。

$$\text{s. t.}\begin{cases} \sum_{i=1}^{N_g}[P_{gi.\max}-P_{gi}(t)]+[P_{\text{out}}(t)-P_{\text{out.min}}] \geqslant \\ rP_{d.\max}+\delta\sum_{i=1}^{N_p}P_{pi}(t)+\mu\sum_{i=1}^{N_w}P_{wi}(t) \\ \sum_{i=1}^{N_g}[P_{gi.\max}-P_{gi.\min}]+[P_{\text{out.max}}-P_{\text{out}}(t)] \geqslant \\ rP_{d.\max}+\delta\sum_{i=1}^{N_p}P_{pi}(t)+\mu\sum_{i=1}^{N_w}P_{wi}(t) \end{cases} \tag{15}$$

式中，$P_{d.\max}$为系统最大负荷；r、δ和μ分别为对应负荷、光伏和风电的备用率。

式（15）分别表示系统的向上旋转备用和向下旋转备用。由于风电和光伏发电的出力具有较强的不确定性，因此除了负荷旋转备用外，还考虑了由于风光预测误差增设的备用容量。

2.3 模型求解方法

本文建立的含负荷控制优化调峰模型为

典型的混合整数非线性模型，选择直接利用Matlab+Yalmip+Cplex进行求解。Cplex求解器采用的求解算法为分支定界法。

3 算例分析

截至2020年，安阳地区预计光伏总装机容量为1 278 MW，风电总装机容量为1 660 MW。同时，安阳拥有安阳钢厂、林丰铝电等一批可控高耗能产业，电解铝和冶钢负荷总和在1 500 MW以上。将所提出的调峰方案应用到安阳电网中，分析新能源消纳能力。

3.1 新能源消纳问题分析

以安阳电网2017年某典型日的实际运行数据为例进行仿真计算。该日的负荷曲线和新能源预测出力分别如图1、图2所示。

安阳电网网供负荷约为4 000 MW，该典型日最大负荷为3 158 MW。该日风光均为大发，考虑到该市拥有1 900 MW的火力发电装机容量，必须将富余电力向外送出，否则将造成大量弃风弃光。

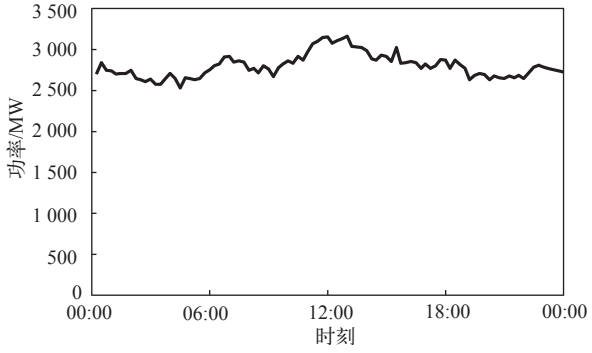

图1 安阳电网典型日负荷曲线

Fig. 1 Typical day load curve of Anyang power grid

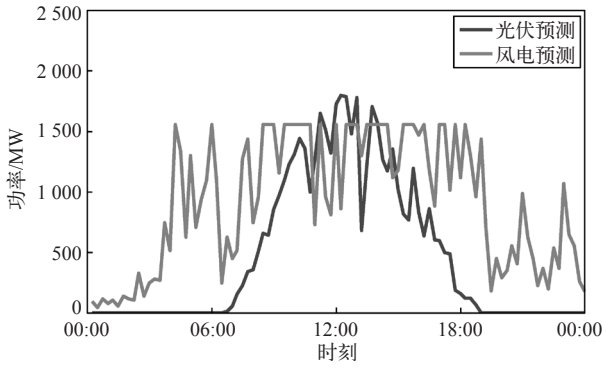

图2 安阳电网典型日风电光伏预测曲线

Fig. 2 Typical day wind power and photovoltaic forecast curve of Anyang power grid

安阳电网负荷总体较平稳，日峰谷差为500 MW左右。但是风光出力15 min出力波动可达800 MW。安阳电网的电源结构除风电和光伏发电外仅有火力发电厂，调节容量小、调节速度慢，存在新能源消纳问题。

3.2 联络线交换功率计算

安阳电网与鹤壁电网、濮阳电网组成联系紧密的安鹤濮电网，安鹤濮电网与河南省网经三回500 kV线路相连。随着安阳地区新能源渗透率提高，安鹤濮电网必须送出一定功率。因此，调峰模型中的$P_{out}(t)$应包含两部分，即安阳与濮阳、鹤壁两市的交换功率之和以及安鹤濮电网经500 kV联络线外送功率。

基于PSASP7.2，取新能源注入功率为当日非零值的均值，以安阳送出为正，计算典型日安阳与鹤壁、濮阳的交换功率及500 kV联络线送出功率，结果如表1所示。

表1 联络线传输功率计算结果

Tab. 1 Transmission power flow calculation result for tie-lines

潮流方向	安阳－濮阳	安阳－鹤壁	安鹤濮－省网
送出功率/MW	940	－1 960	1 700

安阳与濮阳和鹤壁交换功率不是本文的研究对象，固定为定值。500 kV联络线现阶段最大传输容量为±2 400 MW，在外送通道得不到拓宽的前提下，最大可实现功率±40%的波动。经仿真计算，考虑到$N-1$原则和$N-2$原则，该波动比例将进一步降低至20%左右。

3.3 含负荷控制的调峰模型仿真分析

在13:15时刻，光伏出力发生骤跌，此时风电功率也出现小幅下降，这种持续时间较短但增减速度很快的波动符合负荷控制的调节特点。因此，选取当日12:00～16:00，调度周期为15 min，验证所提出调峰模型的有效性。

设置多个联络线波动极限档位，并在每个档位下分别进行不含负荷控制调峰和含负荷控制调峰的仿真计算。高耗能负荷调节特性和算例给定参数分别如表2、表3所示。

求解本算例，在全调度周期内光伏全额消纳，新能源出力受阻体现在弃风上。联络线波动极限分

别为0、±10%及±20%时的弃风量如图3所示。

由图3可知，当考虑了联络线波动后，系统的弃风量明显降低，随着联络线可调比例继续增加，弃风量得到了进一步削减。因此，联络线调节是一种有效的新能源消纳手段，本文建立的调峰模型相较于传统不考虑联络线功率波动的模型具有更好的调节效果且更符合工程实际。同时，在任一联络线调节比例下，负荷控制参与都可以进一步提高新能源消纳能力，因而所提出的含负荷控制的优化调峰模型具有有效性。

表2 安阳市部分高耗能负荷调节特性表

Tab. 2 Part of high energy consumption load regulation characteristics of Anyang

负荷类型	电解铝负荷	冶钢负荷
额定容量/MW	400	1 080
向上调节比例(%)	5	0
向下调节比例(%)	25	10
最大连续受控时间/h	3	4
初始积累受控时间/h	0	0
最小受控间隔/h	0.5	0.5
初始积累受控间隔/h	0.5	0.5
最大受控次数/次	5	5

表3 算例参数表

Tab. 3 Case parameter list

参数名称	参数取值
电解铝负荷调节成本/($/MW·h)	16
冶钢负荷调节成本/($/MW·h)	20
弃光罚因子/($/MW·h)	65
弃风罚因子/($/MW·h)	55
负荷备用率/(%)	5
光伏备用率/(%)	5
风电备用率/(%)	5

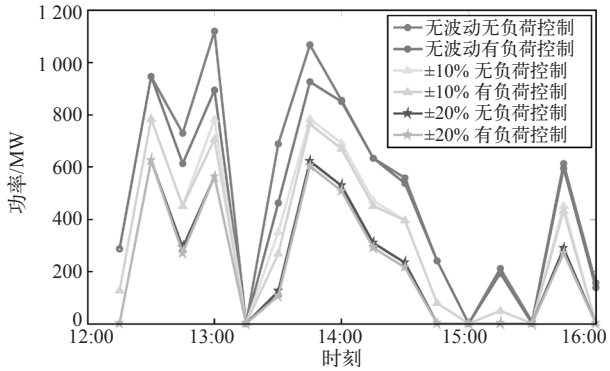

图3 优化后弃风量

Fig. 3 Wind power curtailment after optimization

联络线波动极限分别为±10%和±20%时安鹤濮电网向河南省网的送出功率如图4所示。

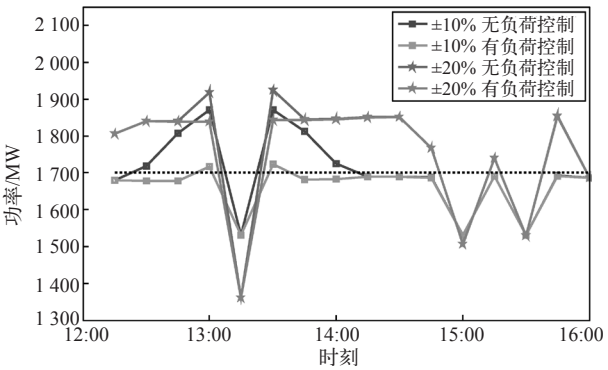

图4 优化后联络线传输功率

Fig. 4 Tie-lines transmission power after optimization

在13:15这一新能源出力骤跌时刻，四条联络线曲线均出现明显下降，通过减少送出功率，保证地区内供需平衡。对比四条曲线，当存在负荷控制时，负荷控制将承担部分新能源向上波动，因而联络线送出功率较平稳，减少了对受端电网冲击的可能性。

联络线波动范围为0、±10%和±20%时负荷等效发电机出力分别如图5、图6所示。

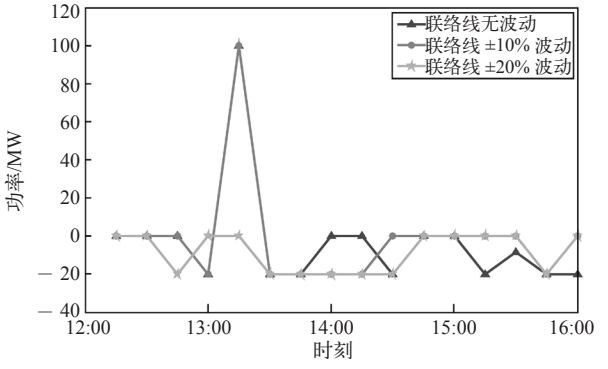

图5 电解铝负荷等效发电机出力

Fig. 5 Electrolytic aluminum load equivalent generator output

新能源出力骤跌时刻，钢负荷和铝负荷出力都快速降低，以响应新能源波动，充分发挥了负荷控制调节速度快、向下调节范围大的优势，与调节速度较慢的火电机组形成优势互补，保证了高风光渗透率地区电网的稳定运行。在其他时刻，铝负荷多次向上调节，以消纳富余风电。

不断提高联络线波动极限，直至允许波动

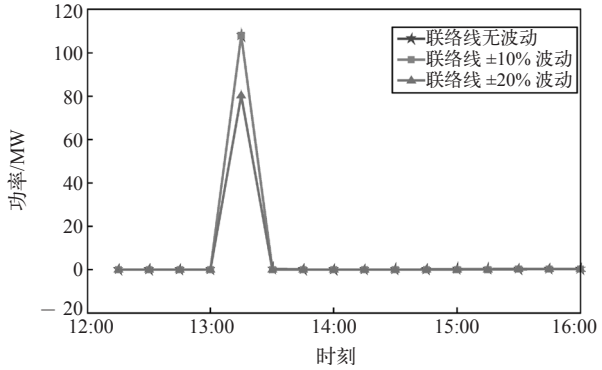

图6 冶钢负荷等效发电机出力

Fig. 6 Steel load equivalent generator output

±60%时实现风电全额消纳。各联络线波动档位下负荷控制参与调峰前后的总成本及负荷控制削减成本如表4所示。

表4 优化后调峰总成本

Tab. 4 Peak-shaving cost after optimization

联络线调节范围(%)	不含负荷控制成本/$	含负荷控制成本/$	负荷控制削减成本/$	削减比例(%)
0	200 990	186 700	14 290	7.11
±5	173 730	162 800	10 930	6.29
±10	151 510	145 860	5 650	3.73
±20	120 890	118 970	1 920	1.59
±30	98 321	96 675	1 646	1.67
±40	81 370	80 959	411	0.51
±50	71 656	71 039	617	0.86
±60	65 707	65 707	0	0

当联络线允许波动极限达±60%时方能实现新能源全额消纳。但是，这一波动比例过高，且现有传输通道不能满足，因此安阳电网目前存在一定的新能源消纳困境。由表4可知，随着联络线调节范围的不断增加，系统调峰成本逐渐削减，因而，在调峰问题中考虑联络线波动具有实际意义。同时，直至新能源全额消纳前，负荷控制参与调峰均可进一步优化调峰方案，降低系统总支付成本；当联络线允许波动越小时，负荷控制的成本削减作用越明显。由图4可知，负荷控制的参与还可以减少联络线交换功率的波动情况，从而降低受端电网的调度难度。综上所述，针对安阳电网现阶段外送通道不足，联络线允许波动极限较小的情况，所提出的含负荷控制的优化调峰模型具有较好的应用价值。

4 结束语

针对高风光渗透率地区新能源消纳能力不足的问题，提出了一种负荷控制参与消纳受阻新能源的调峰方案，利用Cplex求解器对该模型进行求解，并以大规模风光接入的含电解铝及冶钢负荷的安阳市电网为例进行了仿真分析，得到了以下结论。

1）考虑联络线波动可以有效降低系统弃风量，提升电网对新能源的消纳能力，因而相较于不考虑负荷波动的传统模型，所提出的模型具有更好的调节效果且符合实际情况。

2）直至新能源全额消纳前，在任意联络线波动范围下，加入负荷控制都能进一步降低系统总调峰成本。同时，负荷控制承担部分新能源向上波动，使联络线交换功率更平稳。

3）联络线允许波动越小，负荷控制的优化效果越明显。因此，针对目前新能源高渗透率地区电网建设滞后电源建设，外送通道狭窄的情况，所建立的模型具有更佳的应用价值。

所提出的调峰方案对我国各风光资源丰富的工业地区均有一定的适用性，可以进一步拓展研究。

参考文献

[1] 王健，鲁宗相，乔颖，等．高载能负荷提高风电就地消纳的需求响应模式研究[J]．电网技术，2017，41(7)：2115-2124．
WNAG Jian，LU Zongxiang，QIAO Ying，et al．Research on demand response mechanism of wind power local accommodation utilizing energy-intensive loads[J]．Power System Technology，2017，41(7)：2115-2124．

[2] 韩红卫，涂孟夫，张慧玲，等．考虑跨区直流调峰的日前发电计划优化方法及分析[J]．电力系统自动化，2015，39(16)：138-143．
HAN Hongwei，TU Mengfu，ZHANG Huiling，et al．Day-ahead generation scheduling method considering adjusting HVDC plan and its analysis[J]．Automation

of Electric Power Systems，2015，39(16)：138-143.

[3] 鞠立伟，秦超，吴鸿亮，等．计及多类型需求响应的风电消纳随机优化调度模型[J]．电网技术，2015，39(7)：1839-1846.
JU Liwei，QIN Chao，WU Hongliang，et al．Wind power accommodation stochastic optimization model with multi-type demand response[J]．Power System Technology，2015，39(7)：1839-1846.

[4] HU Z，DUAN B，XU Y，et al．Demand response optimization of power generation and consumption in energy intensive enterprise[C]．Innovative Smart Grid Technologies - Asia，IEEE，2016：1-6.

[5] 杨楠，王波，刘涤尘，等．考虑柔性负荷调峰的大规模风电随机优化调度方法[J]．电工技术学报，2013，28(11)：231-238.
YANG Nan，WANG Bo，LIU Dichen，et al．Large-scale wind power stochastic optimization scheduling method considering flexible load peaking[J]．Transactions of China Electrotechnical Society，2013，28(11)：231-238.

[6] 何桂雄，曹年林，蒋利民，等．风电富裕区域高载能负荷参与电网调峰研究[J]．可再生能源，2015，33(4)：491-496.
HE Guixiong，CAO Nianlin，JIANG Limin，et al．Research on peak-load regulating with participation of high-use industrial consumers in wind power rich area[J]．Renewable Energy Resources，2015，33(4)：491-496.

[7] 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.
LIU Wenying，WEN Jing，XIE Chang，et al．Multi-objective optimal method considering wind power accommodation based on source-load coordination[J]．Proceedings of the CSEE，2015，35(5)：1079-1088.

[8] 文晶，刘文颖，谢昶，等．计及风电消纳效益的电力系统源荷协调二层优化模型[J]．电工技术学报，2015，30(8)：247-256.
WEN Jing，LIU Wenying，XIE Chang，et al．Source-load coordination optimal model considering wind power consumptive benefits based on bi-level programming[J]．Transactions of China Electrotechnical Society，2015，30(8)：247-256.

[9] 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 storage” coordination in power system[J]．Power System Protection and Control，2017，45(17)：18-25.

[10] 黄佩英．大型铝电解整流机组方案确定[J]．电气开关，2003(6)：16-19.
HUANG Peiying．Scheme determination of large aluminuim rectifier set[J]．Electric Switchgear，2003(6)：16-19.

[11] BABU C，ASHOK S．Peak load management in electrolytic process industries[J]．IEEE Transactions on Power System，2008，23(2)：399-405.

[12] 王玉，许和平，王怀明，等．电解铝重载孤网紧急控制优化方法[J]．电力系统自动化，2014，38(21)：121-126，135.
WANG Yu，XU Heping，WANG Huaiming，et al．Emergency control optimization measures for isolated power grid with heavy load of electrolytic aluminum[J]．Automation of Electric Power Systems，2014，38(21)：121-126，135.

[13] LIAO S，XU J，SUN Y，et al．Load-damping characteristic control method in an isolated power system with industrial voltage-sensitive load[J]．IEEE Transactions on Power Systems，2016，31(2)：1118-1128.

[14] JIANG H，LIN J，SONG Y，et al．MPC-based frequency control with demand-side participation：a case study in an isolated wind-aluminum power

system [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 3327-3337.

[15] JIANG H, LIN J, SONG Y, et al. Frequency control by aluminum smelter load response in an isolated wind power system: a study for an industrial case[C]. 2013 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2013.

[16] PAULUS M, BORGGREFE F. The potential of demand-side management in energy-intensive industries for electricity markets in Germany[J]. Applied Energy, 2011, 88(2): 432-441.

[17] TODD D, HELMS B, CAUFIELD M, et al. Providing reliability services through demand response: a preliminary evaluation of the demand response capabilities of alcoa inc[R]. Oak Ridge: U.S. Department of Energy, 2009.

作者简介

程乐园

程乐园（1971－），男，硕士研究生，高级政工师，主要研究方向为电力系统及其自动化。

李文启（1963－），男，本科，高级工程师，主要研究方向为电网运行分析控制、电网安全风险防控和新能源消纳等。

(收稿日期：2018－12－12)EA