垃圾焚烧电厂参与调峰的源荷线性协整优化模型

张志遥,周任军,黄婧杰,陈 春,潘 轩,龚罗文
(长沙理工大学 智能电网运行与控制湖南省重点实验室,湖南 长沙 410114)

摘要:为了减少传统机组出力调节,使其具有数学意义上的平稳性,考虑到垃圾焚烧电厂发电和烟气处理可解耦,将电厂和新能源出力计为柔性总电源出力,将改进后的烟气处理系统能耗计入总负荷;应用时间序列协整关系调节总电源出力和总负荷时间序列,使两者之间满足特定的协整关系,从而使传统机组出力平稳,并提出垃圾焚烧电厂参与调峰的源荷协整关系;考虑到传统机组出力可调整和爬坡,在平稳出力的基础上叠加一线性函数,称为源荷线性协整关系,并将其作为等式约束,建立源荷线性协整优化模型。算例仿真表明:所提烟气处理系统能耗函数更能反映实际;所提模型能使传统机组具有线性平稳出力跟随日负荷波动,减少了需求侧响应成本,提高了垃圾焚烧电厂的收益。

关键词:协调调度;垃圾焚烧电厂;烟气处理能耗;线性协整关系;源荷线性协整约束
中图分类号:TM 732 **文献标志码:**A DOI:10.16081/j.epae.202102007

0 引言

目前,源荷协调互动和源网荷储协调调度是通过协调源侧和负荷侧的可调度资源,提高系统运行的灵活性和可靠性,减少弃风弃光[1]。相关研究已取得较为丰富的成果,主要包括电热联合系统参与的综合电热系统调度[2]、对需求侧响应的差异化分析[3]、提高风电集群精细化调度水平[4]的有功协调调度等。源荷协调互动是在源、荷各个环节上进行能量转移消费以及采用控制手段使系统功率达到动态平衡,或者使系统获得的总收益最大,提高新能源消纳率[1-4]。而新能源功率曲线和负荷功率曲线均为按时间顺序排列的功率值,属于数据流中的时间序列[5],但是目前针对各类功率曲线性状(即特性和形状)及其相关关系的研究还不多[1],协整关系可以应用于这种功率曲线时间序列间的协调效果处理[1]。对源、荷功率曲线进行必要的控制调节,从而改变各功率曲线性状,对该性状的研究也是源荷协调调度研究中的新颖方向。

在源荷协调调度中,灵活电源和可控负荷的选择是关键,随着垃圾发电装机容量和城市垃圾数量的增加,因垃圾焚烧电厂的发电和运行特点,将其作为灵活的调度电源和可控的负荷成为可能。垃圾焚烧电厂成为研究热点[6-8],主要集中在处理费定价[9]、污染处理[10]、垃圾燃烧效果评价[11]等技术方面,但对垃圾焚烧发电特性的分析及应用仍处于初步探索阶段。

垃圾焚烧电厂运行特性主要表现为其发电和烟气处理的相关关系[12]。垃圾焚烧电厂中烟气处理系统能耗高,且与其发电量有耦合关系,通过装设烟气储气装置,不仅可实现发电时间与烟气处理时间的解耦,也可通过控制烟气处理时段作为可控负荷参与调度[12]。此外,虽然有文献提出改进烟气处理的概念[13],但是目前对于烟气处理系统的能耗刻画不充分。为了精确地调用该柔性负荷,考虑烟气处理量与处理效率的关系更符合实际运行状况。

根据垃圾焚烧电厂发电特性及解耦特性,将其分为柔性的电源和负荷,分别计入电源出力调控和负荷调控。数学意义上将垃圾焚烧电厂发电和新能源计为柔性总电源,并且将细化改进后的烟气处理能耗计入总负荷,可以利用垃圾焚烧电厂调节柔性总电源出力和系统总负荷,使两者之间满足特定的协整关系,从而使传统火电机组出力时间序列平稳,即减少火电机组出力调节[1]。此外,通过将垃圾焚烧电厂纳入当前新能源渗透率增加的电力系统调峰优化中,可以使其获得额外的系统调峰电价收益,提高其参与调峰的意愿[6-7]。因此,本文应用该协整关系建立垃圾焚烧电厂参与调峰的源荷协整优化模型。

1 含烟气存储装置的垃圾焚烧电厂参与调峰

1.1 垃圾焚烧电厂参与调峰过程

垃圾焚烧电厂日焚烧量基本为一定值,故其日总发电量基本固定,发电功率可分时段调节。垃圾焚烧电厂烟气处理功率大,当设置烟气存储装置后,可将其视为可时移、可调节的负荷功率[12],故调整控制烟气处理时段相当于调节电力负荷。调度协调调节垃圾焚烧电厂出力、新能源上网出力、需求侧响应

收稿日期:2020-04-27;**修回日期:**2020-12-08
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52077009);湖南省自然科学基金资助项目(2019JJ40302);湖南省战略性新兴产业科技攻关与重大科技成果转化项目(2018GK4002)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52077009),the Natural Science Foundation of Hunan Province(2019JJ40302) and the Strategic Emerging Industries and Major Scientific and Technological Achievements Program of Hunan Province(2018GK4002)

负荷和传统火电机组出力。

垃圾焚烧电厂服从系统调度中心的调度，电厂发电和烟气处理由厂内进行调度，其参与调度的系统如图1所示。图中，带箭头虚线表示交互通信控制网络，聚集了垃圾焚烧电厂并网功率、新能源出力、含需求侧响应的系统负荷和传统火电机组出力。垃圾焚烧电厂并网功率是发电功率和烟气处理功率之差。为方便后文推导协整关系和优化计算，在图1中将垃圾焚烧电厂分为发电和烟气处理负荷两部分。

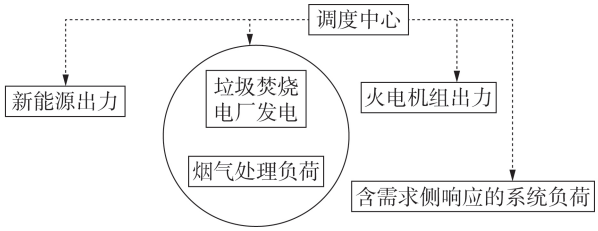

图1 垃圾焚烧电厂参与调度的系统图

Fig.1 System diagram of waste incineration power plant participating in dispatch

1.2 考虑气泵能耗和烟气处理效率的改进烟气处理系统能耗函数

当将烟气处理系统视为柔性负荷时，有必要在传统烟气处理系统能耗函数[12]的基础上，通过增加进出烟气的气泵能耗和烟气处理的单位能耗函数，详细刻画烟气处理系统能耗函数，从而更加精准地调用该柔性负荷。

烟气处理系统的运行过程为：燃烧垃圾产生的烟气分流进入储气装置和反应塔，通过调节烟气进入储气装置与反应塔的比例，实现烟气处理与发电之间的解耦，烟气在反应塔中经过处理除去其中的污染气体，然后通过除尘装置后排放至空气中。烟气处理系统的结构图见文献[12]。

烟气分流比λ_t为流入反应塔的烟气量与垃圾焚烧电厂发电产生烟气总量的比值，通过调节λ_t即可调节进入储气罐的烟气量[12]。

$$\begin{cases}\lambda_t=\alpha_{1,t}/\alpha_t\\ \alpha_t=P_{G,t}e_\alpha=\alpha_{1,t}+\alpha_{2,t}\end{cases}\quad t=1,2,\cdots,T \tag{1}$$

其中，α_t为t时段垃圾焚烧电厂发电产生的烟气总量；$\alpha_{1,t}$、$\alpha_{2,t}$分别为t时段焚烧产生的烟气分别进入反应塔与储气罐中的烟气量；$P_{G,t}$为t时段垃圾焚烧电厂的出力；e_α为垃圾焚烧电厂单位发电产生的烟气量；T为调度周期时段总数。

不同于文献[12]，本文增加考虑储气罐进出烟气时的气泵能耗$P_{S,t}$，定义如下：

$$P_{S,t}=w_1\left(\alpha_{2,t}+\alpha_{3,t}\right)\quad t=1,2,\cdots,T \tag{2}$$

其中，w_1为气泵的单位能耗系数；$\alpha_{3,t}$为t时段从储气罐进入反应塔的烟气量。

则烟气处理系统能耗$P_{\alpha,t}$表示为t时段用于进出烟气的气泵能耗和处理烟气消耗的电功率之和：

$$P_{\alpha,t}=w_{\alpha,t}\left(\alpha_{1,t}+\alpha_{3,t}\right)+P_{S,t} \tag{3}$$

$$w_{\alpha,t}=w_\alpha\left[1.5-\left(\alpha_{1,t}+\alpha_{3,t}\right)/\theta\right] \tag{4}$$

其中，$t=1,2,\cdots,T$；$w_{\alpha,t}$为烟气处理的单位能耗函数，其随烟气处理量增加而减少；w_α为烟气处理的固定单位能耗系数；θ为单位时段最大烟气处理量。

同时，进入储气罐的烟气量总和与离开储气罐的烟气量总和应当相等，储气罐的烟气量不能大于最大储气量，且进出烟气管道有最大流量限制。

$$\sum_{t=1}^{T}\alpha_{2,t}=\sum_{t=1}^{T}\alpha_{3,t} \tag{5}$$

$$\sum_{t=1}^{K}\left(\alpha_{2,t}-\alpha_{3,t}\right)\Delta t\leqslant\eta\quad K=1,2,\cdots,T \tag{6}$$

$$0\leqslant\alpha_{1,t},\alpha_{2,t},\alpha_{3,t}\leqslant\delta\quad t=1,2,\cdots,T \tag{7}$$

其中，η为储气罐容量；δ为烟气管道最大流量；Δt为调度时段间隔。

综上，改进的烟气处理系统能耗函数在传统烟气处理系统能耗函数的基础上增加了进出储气罐的气泵能耗和烟气处理的单位能耗函数，即式(2)—(4)，从而能更精确地调度该柔性负荷。

2 系统调峰中源荷线性协整关系及其检验

2.1 垃圾焚烧电厂参与的源荷线性协整关系

2.1.1 垃圾焚烧电厂参与调峰的协整关系

垃圾焚烧电厂参与调峰相当于在系统中加入柔性负荷和柔性电源。由于系统负荷和新能源出力呈明显峰谷特性，即其时间序列均为非平稳序列，通过功率平衡表现为传统机组出力非平稳，即机组出力调节频繁[1]。将烟气处理能耗计入系统负荷作为系统总负荷，垃圾焚烧电厂发电和新能源出力计为柔性总电源出力，通过调节柔性负荷和柔性电源的大小和时段，使系统总负荷和柔性总电源时间序列形成特定协整关系，从而使两者的线性组合即系统功率平衡式中的传统机组出力为平稳时间序列。

2.1.2 源荷协整关系的定义

(1)含波动偏差的功率平衡方程。

电力系统中传统功率平衡关系式如式(8)所示，其平衡中必然因负荷或新能源的波动而存在功率差额，因此可将其描述为式(9)。

$$P_{g,t}+P_{W,t}+P_{G,t}-P_{L,t}-P_{\alpha,t}=0 \tag{8}$$

$$P_{g,t}+P_{W,t}+P_{G,t}-P_{L,t}-P_{\alpha,t}=\mu_t \tag{9}$$

其中，$t=1,2,\cdots,T$；$P_{g,t}$为t时段传统火电机组出力；$P_{W,t}$为t时段新能源出力；$P_{L,t}$为t时段系统负荷；$P_{\alpha,t}$为t时段烟气处理能耗；μ_t为随机扰动项，又称为非均衡误差，$\left|\mu_t\right|\leqslant\zeta$，$\zeta$为与系统容量有关的设定值，系统容量越大，其值越大，反之亦然。

可将式(9)整理为式(10)，用于协整关系的分析和应用。

$$P_{W,t}+P_{G,t}=-P_{g,t}+\left(P_{L,t}+P_{\alpha,t}\right)+\mu_t\quad t=1,2,\cdots,T \tag{10}$$

（2）源荷协整关系的定义和推导。

根据协整关系的定义[14]，当非平稳同阶单整时间序列 X_{1t} 与 X_{2t} 间存在如式（11）所示关系时，如果 μ_t 为平稳序列，则称 X_{1t} 与 X_{2t} 协整。

$$X_{1t}=\alpha_0+\alpha_1 X_{2t}+\mu_t \quad t=1,2,\cdots,T \tag{11}$$

其中，$(1,-\alpha_0,-\alpha_1)$ 为协整向量。为了检验 2 个非平稳单整时间序列是否协整，Engle 和 Granger 于 1987 年提出两步检验法，即 EG 检验[14]，在此不再赘述。

因 $P_{G,t}$ 为可调电源，故可设柔性总电源出力为：

$$P_{N,t}=P_{W,t}+P_{G,t} \tag{12}$$

$P_{L,t}$ 和 $P_{\alpha,t}$ 组合为可部分响应的系统总负荷：

$$P_{Load,t}=P_{L,t}+P_{\alpha,t} \tag{13}$$

分别将 $P_{N,t}$、$P_{Load,t}$ 简称为源、荷，其分别对应于式（11）中的 X_{1t} 和 X_{2t}。

将式（12）和式（13）代入式（10），由于希望传统机组出力 $P_{g,t}$ 为一平稳序列，即不频繁调节，如在第 k 个连续时段内为一常数，$P_{g,t}=-\alpha_{0,k}$。μ_{t_k} 为平稳序列时，可得到源荷协整关系表达式为：

$$P_{N,t_k}=\alpha_{0,k}+P_{Load,t_k}+\mu_{t_k} \quad t_k=1,2,\cdots,T_k \tag{14}$$

其中，T_k 为将调度周期按峰谷平运行阶段分为 K 个子周期后的时段数，k 为整数且 $k\in[1,K]$；$\alpha_{0,k}$ 为常数。式中协整向量为 $\left(1,-\alpha_{0,k},-1\right)$。

将式（14）称为垃圾焚烧电厂参与系统调峰的源荷协整关系，其实质为当功率波动偏差平稳和传统机组出力为常数时的功率平衡方程。若波动偏差 μ_{t_k} 表示为传统机组出力的一部分，则：

$$P_{g,t_k}=P_{Load,t_k}-P_{N,t_k}=-\alpha_{0,k}-\mu_{t_k} \quad t_k=1,2,\cdots,T_k \tag{15}$$

即当源荷之间满足协整关系时，$P_{N,t}$ 和 $P_{Load,t}$ 两者的线性组合为含波动偏差系统功率平衡下的传统机组出力序列，其为一平稳时间序列。

2.1.3　考虑传统机组爬坡运行的源荷线性协整关系

考虑到传统机组出力允许有一定爬坡或较为平缓的调整，本文在源荷协整关系的基础上叠加一线性函数，提出考虑传统机组爬坡运行的源荷线性协整关系，由此扩展时间序列协整理论的内涵。

源荷线性协整关系是在式（14）所示源荷协整关系的基础上叠加随时间线性变化的分段负荷函数，即在 $P_{g,t}=-\alpha_{0,k}$ 的基础上增加分段线性出力，以表达传统机组在子周期时段 T_k 内随时间线性变化的出力。

$$P_{g,t_k}=-\alpha_{0,k}-\beta_{t_k}t_k \tag{16}$$

$$P_{N,t_k}=\alpha_{0,k}+P_{Load,t_k}+\mu_{t_k}+\beta_{t_k}t_k \tag{17}$$

其中，$t_k=1,2,\cdots,T_k$；β_{t_k} 为分段负荷斜率。

将式（17）称为考虑传统机组爬坡运行的源荷线性协整关系。若将波动偏差计入传统机组出力，则传统机组平稳出力计为：

$$P_{g,t_k}=P_{Load,t_k}-P_{N,t_k}=-\alpha_{0,k}-\beta_{t_k}t_k-\mu_{t_k} \quad t_k=1,2,\cdots,T_k \tag{18}$$

即 $P_{N,t}$ 和 $P_{Load,t}$ 两者的线性组合为含波动偏差系统功率平衡下的考虑传统机组爬坡运行的传统机组出力时间序列 P_{g,t_k}，其为一平稳时间序列。

2.1.4　源荷线性协整关系的物理意义

综上，源荷协整关系为系统功率平衡下的一种固有协整关系[1]。通过弃风弃光和垃圾焚烧电厂发电调整柔性总电源出力 $P_{N,t}$，通过需求侧响应和烟气处理负荷调整系统总负荷 $P_{Load,t}$，从而使得 $P_{N,t}$ 和 $P_{Load,t}$ 均为同阶单整时间序列，且波动偏差时间序列 μ_t 平稳，则最终 $P_{N,t}$ 和 $P_{Load,t}$ 满足协整关系，得到平稳的传统机组出力时间序列。若 $P_{N,t}$ 和 $P_{Load,t}$ 不满足同阶单整，即不满足 2 个时间序列协整的前提条件，则传统机组出力不平稳。协整关系检验流程见 2.2 节。

考虑到传统机组良好的爬坡性能，在模型中求取分段系统负荷的斜率，使传统机组出力跟随负荷线性趋势，使其不仅具有平稳性还具有线性特性，拓展传统协整关系为叠加线性函数的线性协整关系。最后在满足该协整关系的前提下，通过优化目标即可确定系统中最优功率分配。

2.2　源荷线性协整关系及其检验流程

将负荷分段线性回归得到斜率 β_{t_k}，根据式（17）对柔性总电源出力 P_{N,t_k} 和负荷 P_{Load,t_k} 进行协整检验，得到平稳的 μ_{t_k}，即得到具有爬坡趋势的传统机组出力平稳时间序列。源荷线性协整关系的检验流程如图 2 所示，均为在子周期时段 T_k 内分段检验。

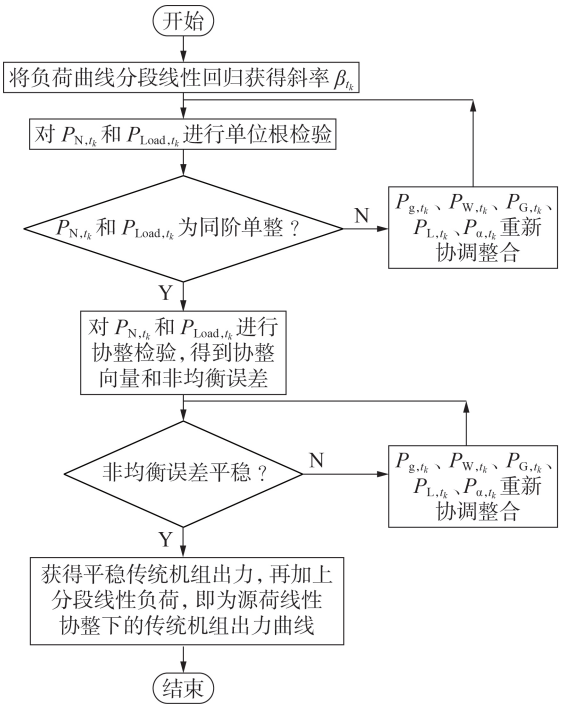

图 2　源荷线性协整关系的检验流程

Fig.2　Test flowchart of source-load linear cointegration relationship

3 垃圾焚烧电厂参与调峰的源荷线性协整优化模型

综上，本文建立含源荷线性协整约束的优化模型，即源荷线性协整优化模型，模型以预测新能源和负荷曲线为基础数据进行日前调度计划优化，以降低系统运行成本为目标。

3.1 优化目标函数

系统运行成本包括传统机组运行成本 $C_G\left(P_{gi,t}\right)$、需求侧响应成本 $C_D\left(\Delta P_t\right)$ 和弃风弃光成本 $C_W\left(\Delta P_{w,t}\right)$。

$$f=\min\left(C_G\left(P_{gi,t}\right)+C_D\left(\Delta P_t\right)+C_W\left(\Delta P_{w,t}\right)\right) \tag{19}$$

$$\begin{aligned}C_G\left(P_{gi,t}\right)=&\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N_g}\Big\{U_{i,t}\left(a_iP_{gi,t}^2+b_iP_{gi,t}+c_i\right)+\\&\left(1-U_{i,t-1}\right)U_{i,t}\left[\sigma_i+\omega_i\left(1-\mathrm{e}^{\tau/\tau_i}\right)\right]+\\&\left(1-U_{i,t}\right)U_{i,t-1}\left[\sigma_i+\omega_i\left(1-\mathrm{e}^{\tau/\tau_i}\right)\right]\Big\}+\\&\sum_{t=2}^{T}\sum_{i=1}^{N_g}d_i\left(P_{gi,t}-P_{gi,t-1}\right)\end{aligned} \tag{20}$$

$$C_D\left(\Delta P_t\right)=\sum_{t=1}^{T}\rho\left|\Delta P_t\right| \tag{21}$$

$$C_W\left(\Delta P_{w,t}\right)=\omega\sum_{t=1}^{T}\Delta P_{w,t} \tag{22}$$

其中，N_g 为常规机组台数；$U_{i,t}$、$U_{i,t-1}$ 分别表示机组 i 在 t、$t-1$ 时段的启停状态；a_i、b_i、c_i 为机组 i 的燃料成本参数；σ_i、ω_i、τ_i 为机组 i 的启停成本参数；τ 为常规机组的连续开机或停机时间；d_i 为机组 i 出力调节成本；$P_{gi,t}$ 为机组 i 在 t 时段的出力；ρ 为需求侧响应负荷的单位补偿成本；ΔP_t 为 t 时段系统中的需求侧响应量，即优化得到的 $P_{L,t}$ 与预测负荷的差值；ω 为弃风弃光惩罚参数；$\Delta P_{w,t}$ 为 t 时段的弃风弃光功率，即优化得到的 $P_{W,t}$ 与预测新能源出力的差值。

由于垃圾焚烧电厂发电燃料为城市垃圾，且发电量基本为定值，一般不计入系统运行成本，而其碳排放成本一般仅与发电量有关，故在此不考虑该成本。

3.2 含源荷线性协整关系的系统运行约束

约束条件包括系统功率平衡约束的协整表达即源荷线性协整约束、传统机组出力约束、需求侧响应负荷约束、垃圾焚烧电厂和新能源出力相关约束。

(1)功率平衡约束和源荷线性协整约束。

电力系统中功率平衡关系式(8)及其考虑负荷或新能源波动功率差额的功率平衡式(9)，经源荷线性协整关系推导和验证得到式(17)，进一步描述为垃圾焚烧电厂参与系统调峰的源荷线性协整约束：

$$\begin{cases}P_{N,t_k}=P_{W,t_k}+P_{G,t_k}\\P_{Load,t_k}=P_{L,t_k}+P_{\alpha,t_k}\\P_{N,t_k}=\alpha_{0,k}+P_{Load,t_k}+\mu_{t_k}+\beta_{t_k}t_k\quad t_k=1,2,\cdots,T_k\\\sum_{i=1}^{N_g}P_{gi,t_k}=-\alpha_{0,k}-\beta_{t_k}t_k-\mu_{t_k}\end{cases} \tag{23}$$

(2)传统机组约束。

传统机组参与调度主要受到出力约束、爬坡约束、启停时间约束和出力波动性控制约束：

$$P_{gmin}\leqslant P_{gi,t}\leqslant P_{gmax} \tag{24}$$

$$-P_{gc}\leqslant P_{gi,t}-P_{gi,t-1}\leqslant P_{gc} \tag{25}$$

$$\left(U_{i,t}-U_{i,t-1}\right)\left(t_{off,i,t-1}-t_{off,i}\right)\geqslant 0 \tag{26}$$

$$\left(U_{i,t-1}-U_{i,t}\right)\left(t_{on,i,t-1}-t_{on,i}\right)\geqslant 0 \tag{27}$$

$$\frac{\left(P_{gi,t-1}-P_{g,t}\right)\left(P_{gi,t}-P_{gi,t+1}\right)}{\left|\left(P_{gi,t-1}-P_{gi,t}\right)\left(P_{gi,t}-P_{gi,t+1}\right)\right|}=1\quad t=2,4,\cdots,T-2 \tag{28}$$

其中，P_{gmax}、P_{gmin} 分别为传统火电机组出力上、下限值；P_{gc} 为最大爬坡功率限制值；$t_{off,i,t-1}$ 为已停运的机组 i 到 $t-1$ 时段连续停运时间；$t_{off,i}$ 为机组 i 最小停运时间；$t_{on,i,t-1}$ 为机组 i 到 $t-1$ 时段连续运行时间；$t_{on,i}$ 为机组 i 一次开机最小运行时间。

(3)需求侧响应负荷约束。

各个时段可供调用的需求侧负荷是有限的：

$$P_{Dmin}\leqslant\Delta P_t\leqslant P_{Dmax} \tag{29}$$

$$S_{pmin}\leqslant\sum_{t=1}^{T}\Delta P_t\leqslant S_{pmax} \tag{30}$$

其中，P_{Dmax}、P_{Dmin} 分别为需求侧响应负荷的上、下限；S_{pmax}、S_{pmin} 分别为需求侧响应负荷在调度周期内的总容量上、下限。

(4)垃圾焚烧电厂和新能源出力相关约束。

a. 垃圾焚烧电厂总出力约束。

$$W=\sum_{t=1}^{T}P_{G,t}\Delta t \tag{31}$$

垃圾焚烧电厂具有恒定的总出力，可以安排其每个时间间隔的出力大小[12]。

b. 改进的烟气处理系统的约束见式(1)—(7)。

c. 其余相关约束见文献[12]。

3.3 源荷线性协整优化模型

垃圾焚烧电厂参与系统调峰的含源荷线性协整约束的优化模型，即源荷线性协整优化模型为：

$$\min f\left(P_{gi,t},\Delta P_t,\Delta P_{w,t}\right) \tag{32}$$

$$\begin{cases}\text{s.t.}\quad g\left(P_{gi,t},P_{W,t},P_{G,t},P_{L,t},P_{\alpha,t}\right)=0\\\qquad h\left(P_{gi,t},P_{W,t},P_{G,t},P_{L,t},P_{\alpha,t}\right)\leqslant 0\end{cases}\quad t=1,2,\cdots,T \tag{33}$$

其中，g 表示等式约束；h 表示不等式约束。

该模型为混合整数非线性凸优化模型，其中决策变量为新能源出力、需求侧响应负荷、传统机组出力、垃圾焚烧电厂出力和烟气处理系统能耗。

4 算例分析

4.1 算例及参数

混合整数非线性问题的求解已有稳定的求解器可直接使用，本文使用OPTI toolbox工具箱中opti函数，该函数利用分支定界算法求解混合整数非线性凸优化模型。选取某风电-光伏-火电-垃圾焚烧电

厂联合发电系统作为分析对象，系统图见图1，其包含3台500 MW火电机组，总装机容量为1 500 MW，传统机组运行数据见文献[1]，风电装机容量为150 MW，光伏装机容量为50 MW。垃圾焚烧电厂参数如下：装机容量为200 MW，日总发电量为4 000 MW，最大出力为200 MW，烟气排放强度$e_\alpha=0.96$，固定烟气处理能耗系数$w_\alpha=0.6$；气泵的单位能耗系数$w_1=0.8$；一个时段的最大烟气处理量$\theta=180\ \mathrm{m^3}$；储气罐最大容量$\eta=600\ \mathrm{m^3}$；储气罐初始储气量为$200\ \mathrm{m^3}$；烟气管道最大流量$\delta=100\ \mathrm{m^3/h}$。设一个调度周期为24 h，各调度时段为30 min。系统负荷预测曲线和风光联合出力预测曲线图见附录中图A1。需求侧响应的出力限制、3台火电机组运行成本和启停参数见附录中表A1—A3。需求侧响应负荷的单位调节成本和弃风弃光惩罚参数取值为180元/(MW·h)，最小停运和启动时间$t_{\mathrm{off},i}=t_{\mathrm{on},i}=4\ \mathrm{h}$。

4.2　烟气处理系统能耗函数对比分析

将本文提出的改进烟气处理系统能耗函数与文献[12]中函数进行对比分析，结果如图3所示。

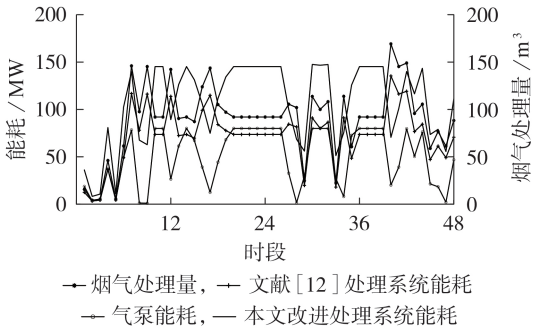

图3　烟气处理系统能耗对比

Fig.3　Comparison of energy consumption between flue gas treatment systems

由图3可以看出，文献[12]中的处理系统能耗和烟气处理量成正比，但是由于实际中处理效率并非常数，因此文献[12]中的烟气处理函数无法精确描述处理系统能耗，低估了烟气处理系统的整体能耗。而本文提出的改进烟气处理系统能耗函数则更能反映出实际处理系统能耗趋势：当烟气处理量较低时，改进烟气处理系统能耗比未改进系统的能耗高，当烟气处理量较高时，改进烟气处理系统能耗反而比较低，并且本文计及烟气处理系统气泵能耗，其最大值为80 MW，这使得烟气处理系统在作为柔性负荷时能被更精确地调用。

4.3　4种运行方式仿真及分析

本文选取如下4种运行方式：方式1，系统调度资源仅考虑传统火电机组和需求侧响应的传统运行方式；方式2，系统调度资源包括传统火电机组、需求侧响应负荷和垃圾焚烧电厂的源荷协调运行方式；方式3，系统调度资源包括传统火电机组、需求侧响应负荷和垃圾焚烧电厂的源荷协整运行方式；方式4，系统调度资源包括传统火电机组、需求侧响应负荷和垃圾焚烧电厂的源荷线性协整运行方式。

4种运行方式的仿真结果如图4所示。由图中可见，各机组的出力波动情况与总出力曲线是一致的，为了便于观察，图中给出的为3台火电机组的总出力曲线。风光新能源弃用曲线见附录中图A2。机组启停时段见附录中表A4。

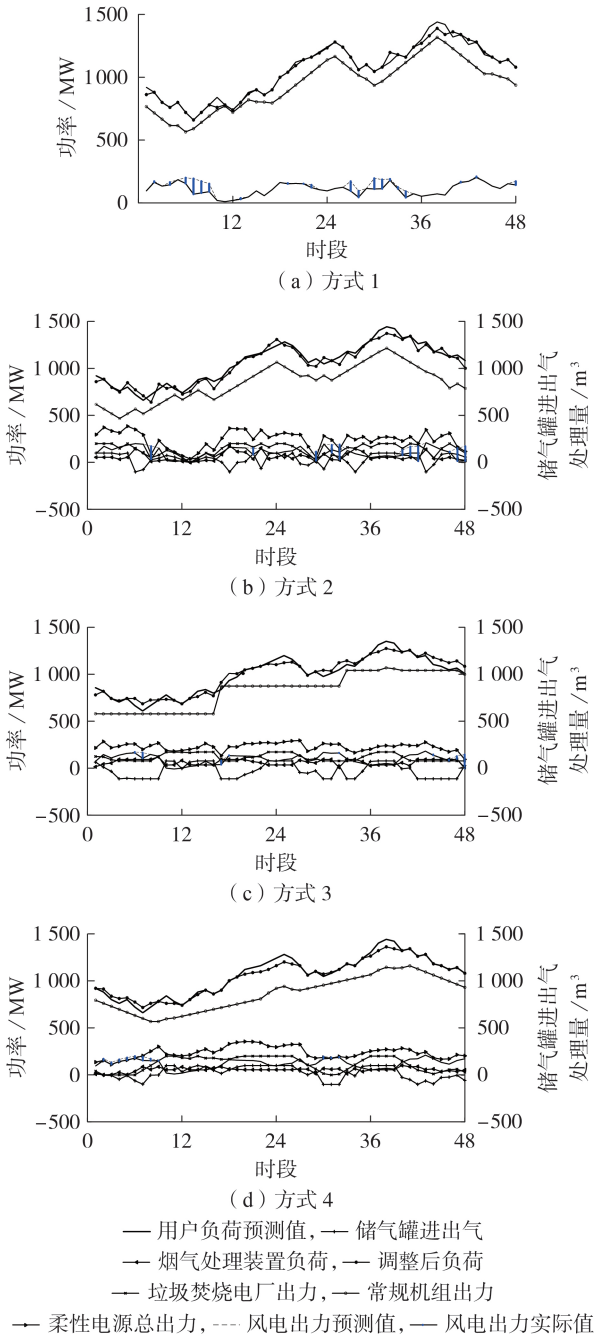

图4　4种运行方式仿真结果

Fig.4　Simulative results of four operation modes

图4(a)方式1中，仅通过传统火电机组出力调整和需求侧响应来适应新能源的波动，传统火电机组爬坡约束使其出力无法完全适应新能源的波动，

并且在负荷低谷时新能源出力大，导致弃风弃光较多（见附录中图A2）。

图4(b)方式2中，引入垃圾焚烧电厂可调度资源与传统机组共同适应新能源和负荷的波动，调节垃圾焚烧电厂即可调节负荷和柔性电源出力，其调节能力大幅增加，因此火电机组出力在时段0—16的波动及新能源弃用情况均有所改善。由于安排垃圾焚烧电厂调峰，电厂可增加调峰收益。

图4(c)方式3中，考虑系统调峰的源荷协整关系，通过协调调整源荷等多条功率曲线出力，使源荷曲线达到协整状态，减少火电机组的调节。由附录中图A2可见弃风弃光减少。但图4(c)中传统机组出力虽然满足平稳性，但出力曲线在子周期内几乎为一常数，导致发电成本和需求侧响应增加，且没有利用传统机组出力的爬坡特性契合负荷增减趋势。

图4(d)方式4中，考虑实际中传统机组出力在较小范围内爬坡，使得传统机组出力不仅满足平稳性而且还具有线性爬坡特性，减少了机组调节，需求侧响应呈现出明显的削峰填谷规律，提高了新能源利用率（见附录中图A2），由此弃风弃光成本进一步下降。

分别比较4种不同系统运行方式下各项运行费用及新能源消纳情况，如表1、2所示。

表1 4种运行方式下的运行费用

Table 1 Operation costs under four operation modes

方式	机组燃料成本/万元	机组调节成本/万元	需求侧响应成本/万元	启停成本/万元	弃风弃光成本/万元	运行总成本/万元
1	1797.1	26.2	5.1	8.6	14.1	1851.1
2	1556.1	18.6	10.3	8.4	10.8	1604.2
3	1571.4	5.3	19.2	7.9	8.5	1612.6
4	1585.2	8.7	10.1	0	7.7	1611.1

表2 4种运行方式下的新能源消纳情况

Table 2 Consumption condition of renewable energy under four operation modes

方式	新能源消纳量/%	方式	新能源消纳量/%
1	86.5	3	93.3
2	89.8	4	93.4

由表1、2知：方式1下除需求侧响应成本外，其余成本均最大，新能源消纳量最小；方式2加入垃圾焚烧电厂，调节能力增强，且能为传统机组分担调节成本，减少弃风弃光，总成本最低；方式3增加传统机组出力平稳约束，虽然增加了一定的需求侧响应成本，但机组调节成本下降，同时由于2号火电机组启停成本较3号火电机组低，因此减少了机组启停成本，且减少了弃风弃光；方式4下传统机组出力跟随日负荷变化规律，减少了需求侧响应成本，且传统机组爬坡出力范围较小，无需机组启停，从而系统总运行成本较方式3有所降低，同时新能源消纳率最大。

4.4 垃圾焚烧电厂装机容量的影响

垃圾焚烧电厂装机容量不同会对源荷线性协整优化产生影响。图5为垃圾焚烧电厂装机容量为400 MW下的源荷线性协整优化。由图可见，当垃圾焚烧电厂容量增加时，因系统柔性电源和柔性负荷增加，且垃圾焚烧电厂无需燃料成本，因此可以进一步降低系统的运行成本。

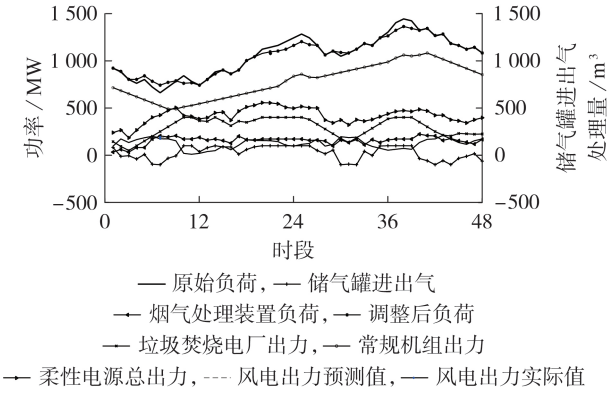

图5 垃圾焚烧电厂装机容量为400 MW下的源荷线性协整优化

Fig.5 Source-load linear cointegration optimization with waste incineration power plant of 400 MW installed capacity

5 结论

（1）本文提出垃圾焚烧电厂发电-烟气处理解耦后模型中改进的烟气处理系统能耗函数，能更准确地反映烟气处理系统能耗，使垃圾焚烧电厂作为柔性负荷时被精确地调用。

（2）本文提出垃圾焚烧电厂参与调峰的源荷协整关系，进一步通过协整关系叠加传统机组爬坡性能的线性特点，提出源荷线性协整关系，扩展了协整的内涵。基于此，提出垃圾焚烧电厂参与调峰的源荷线性协整优化模型，扩展了时间序列协整关系在电力系统中的应用。

（3）垃圾焚烧电厂随着装机容量的增加，可参加电力辅助服务，通过参与调峰获得更高效益。垃圾焚烧电厂的灵活运行、系统调峰和对烟气处理负荷的调控，也是增加需求侧响应能力和消纳新能源的可行措施。

附录见本刊网络版（http://www.epae.cn）。

参考文献：

[1] 方绍凤，周任军，张武军，等. 源-荷协整关系与电价时间序列协整模型[J]. 电力自动化设备，2020，40(2)：169-176.
FANG Shaofeng，ZHOU Renjun，ZHANG Wujun，et al. Cointegration model between source-load co-integration relationship and electricity price time series[J]. Electric Power Automation Equipment，2020，40(2)：169-176.

[2] 崔雪，邹晨露，王恒，等. 考虑风电消纳的电热联合系统源荷协

调优化调度[J]. 电力自动化设备,2018,38(7):74-81.
CUI Xue,ZOU Chenlu,WANG Heng,et al. Source and load coordinative optimal dispatching of combined heat and power system considering wind power accommodation[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(7):74-81.
[3] 彭春华,张金克,陈露,等. 计及差异化需求响应的微电网源荷储协调优化调度[J]. 电力自动化设备,2020,40(3):1-7.
PENG Chunhua,ZHANG Jinke,CHEN Lu,et al. Source-load-storage coordinated optimal scheduling of microgrid considering differential demand response[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(3):1-7.
[4] 路朋,叶林,汤涌,等. 基于模型预测控制的风电集群多时间尺度有功功率优化调度策略研究[J]. 中国电机工程学报,2019,39(22):6572-6583.
LU Peng,YE Lin,TANG Yong,et al. Multi-time scale active power optimal dispatch in wind power cluster based on model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(22):6572-6583.
[5] LEE W J,HONG J. A hybrid dynamic and fuzzy time series model for mid-term power load forecasting[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2015,64:1057-1062.
[6] 司纪朋. 垃圾发电相关问题探析[J]. 中国电业,2020(3):84-85.
[7] CHU Z J,WANG W N,ZHOU A,et al. Charging for municipal solid waste disposal in Beijing[J]. Waste Management,2019,94:85-94.
[8] FEYZI S,KHANMOHAMMADI M,ABEDINZADEH N,et al. Multi-criteria decision analysis FANP based on GIS for siting municipal solid waste incineration power plant in the north of Iran[J]. Sustainable Cities and Society,2019,47:101513.
[9] 姚张峰. 公私合营垃圾焚烧发电项目垃圾处理费定价研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2017.
YAO Zhangfeng. The pricing model for PPP waste-to-energy incineration projects in China[D]. Hangzhou:Zhejiang Sci-Tech University,2017.
[10] REN X,XU X M,XIAO Y,et al. Effective removal by coagulation of contaminants in concentrated leachate from municipal solid waste incineration power plants[J]. Science of the Total Environment,2019,685:392-400.
[11] HE J X,LIN B Q. Assessment of waste incineration power with considerations of subsidies and emissions in China[J]. Energy Policy,2019,126:190-199.
[12] 周任军,陈溢,阳卫伟,等. 含烟气储存装置的风电-垃圾焚烧虚拟电厂双阶段优化调度[J]. 中国电力,2019,52(2):78-84.
ZHOU Renjun,CHEN Yi,YANG Weiwei,et al. Two-stage optimal dispatching of wind power-waste incineration virtual power plant with flue gas storage device[J]. Electric Power,2019,52(2):78-84.
[13] YU Y H,GUO S P,HAO Y,et al. Advanced concept of coupling solar-aided flue gas treatment and solar-aided power generation in power plants[J]. Energy Conversion and Management,2020,203:112026.
[14] 李子奈,潘文卿. 计量经济学[M]. 3版. 北京:高等教育出版社,2010:167-187.

作者简介:

张志遥

张志遥(1996—),男,湖南湘潭人,硕士研究生,主要从事电力系统源网荷储协调调度和电力系统优化运行方面的研究工作(**E-mail**:827319699@qq.com);
周任军(1964—),女,山西太原人,教授,博士,主要研究方向为电力系统优化、新能源接入系统、电力需求侧管理、分布式电源规划(**E-mail**:zrj0731@163.com)。

(编辑　王锦秀)

Source-load linear cointegration optimization model of waste incineration power plant participating in peak load regulation

ZHANG Zhiyao,ZHOU Renjun,HUANG Jingjie,CHEN Chun,PAN Xuan,GONG Luowen
(Smart Grids Operation and Control Key Laboratory of Hunan Province,
Changsha University of Science and Technology,Changsha 410114,China)

Abstract:In order to reduce the output adjustment of traditional unit and make the output stable in mathematics,considering that the power generation and flue gas treatment of waste incineration power plant can be decoupled,the output of power plant and renewable energy is taken as the total flexible power source output,and the energy consumption of the improved flue gas treatment system is included in the total load. The time series cointegration relationship is applied to adjust the time series of total power source output and total load,which makes the two meet specialized cointegration relationship,so as to make the output of traditional unit stable,and the source-load cointegration relationship of waste incineration power plant participating in peak load regulation is proposed. Considering that the output of traditional units can be adjusted and climbed,a linear function is superimposed on the basis of stable output,named source-load linear cointegration relationship,which is taken as an equality constraint to build a source-load linear cointegration optimization model. Case simulation show that the proposed energy consumption function of flue gas treatment system can better reflect the reality,and the proposed model can make the traditional unit have a linear and stable output to follow the daily load fluctuation,which reduces the demand response cost and increases the profit of waste incineration power plant.

Key words:coordinated dispatch;waste incineration power plant;energy consumption of flue gas treatment;linear cointegration relationship;source-load linear cointegration constraint

附录：

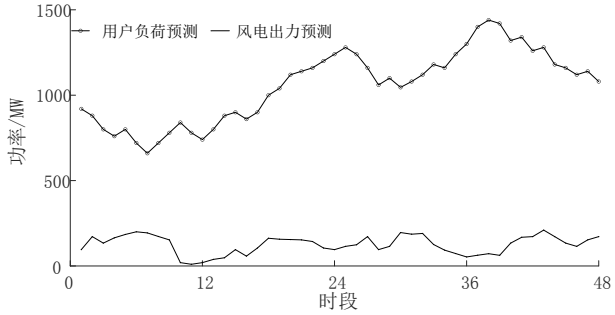

图 A1 用户负荷、风光出力预测曲线

Fig.A1 Forecasting curves of user load and wind power and photovoltaic output

表 A1 需求响应出力限制

Table A1 Limit of demand response output

单位：MW

参数	响应负荷	参数	响应负荷
P_{Hmin}	-80	S_{pmin}	-600
P_{Hmax}	80	S_{pmax}	600

表 A2 传统机组运行成本参数

Table A2 Traditional unit operation cost parameters

参数	取值	参数	取值
a_1	0.1	c_2	10^4
b_1	0.2	d_2	10^2
c_1	10^4	a_3	0.2
d_1	10^2	b_3	0.2
a_2	0.2	c_3	10^4
b_2	0.1	d_3	10^2

表 A3 传统机组启停成本参数

Table A3 Start-stop cost parameters of traditional unit

参数	取值	参数	取值
σ_1	10^5	τ_2	24
ω_1	3×10^4	σ_3	10^5
τ_1	24	ω_3	10^4
σ_2	10^5	τ_3	24
ω_2	2×10^4		

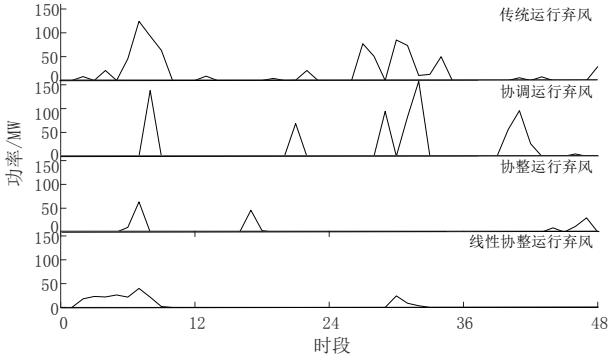

图 A2 4 种不同运行方式的弃风弃光功率

Fig.A2 Wind power and photovoltaic curtailment under four different operation modes

表 A4 机组启停时段

Table A4 Unit start-stop periods

方式	启停时段		
	机组 1	机组 2	机组 3
1	无	无	+20，-45
2	无	无	+22，-43
3	无	+16	+34
4	无	无	无

注：数字表示时段，正、负号分别表示启、停，“无”表示周期内无启停。