

# 源-荷协整关系与电价时间序列协整模型

方绍凤<sup>1</sup>,周任军<sup>1</sup>,张武军<sup>2</sup>,李娟<sup>2</sup>,彭院院<sup>1</sup>,石亮缘<sup>3</sup>

(1. 长沙理工大学 湖南省清洁能源与智能电网协同创新中心,湖南 长沙 410004;

2. 中国能源建设集团湖南省电力设计院有限公司,湖南 长沙 410007;

3. 广州供电局有限公司,广东 广州 510620)

**摘要:**针对电源出力曲线与需求侧负荷曲线因功率实时平衡而完全一致的特点,证明二者存在数学意义上的协整关系。在新能源高渗透率系统的源-网-荷-储协调运行中,将源网、荷储功率曲线分别合计为源、荷曲线,提出源-网-荷-储协调调度的源-荷协整关系和理论依据。为了实现协整并消纳新能源,提出源-荷与电价时间序列协整的经济技术模型,该模型以常规机组出力波动率最小为目标,以不平衡电价为约束。算例结果表明:源-荷曲线时间序列与电价之间协整后得到的常规机组出力波动率较小,因此变量之间的协整关系可以充分发挥终端用户的资源配置潜力,激励需求侧资源负荷曲线的变化,最大化地消纳新能源。

**关键词:**协整检验;协整关系;协调调度;源-荷协整;新能源消纳

**中图分类号:**TM 761

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202001031

## 0 引言

当前源-网-荷-储协调调度及源-网-荷互动均是通过协调电源侧与负荷侧的可调度资源,来提高电力系统功率动态平衡能力以及系统运行的灵活性与可靠性,这是解决新能源消纳等问题的有效途径<sup>[1]</sup>。在源、网、荷、储各个环节上都可进行能源转移消费以及采取控制手段,如:在电源环节,构建综合能源系统调度模型<sup>[2]</sup>;在电网环节,调节电力电子装置及优化电网潮流分布,来提升电网运行的可控性和弹性<sup>[3]</sup>;在负荷环节,控制具有可调节特性的负荷<sup>[4]</sup>;在储能环节,将储能装置作为一组调度资源进行优化调度,建立基于源-荷-储协调互动的电力系统优化调度模型<sup>[5]</sup>,从而实现源-网-荷-储的共同协调运行。

除技术手段外,利用价格等经济手段也是实现源-网-荷协调控制的有效途径。电力市场环境,需求响应和电价日益成为相互关联的经济变量<sup>[6]</sup>,价格杠杆和经济激励是改变负荷曲线性状的主要手段<sup>[7-8]</sup>。由于新能源出力与电力负荷具有随机性,传统电源的调节能力不足,因此要实现系统功率平衡通常需舍弃部分新能源或切除部分负荷,由此造成大量的能源浪费并降低了供电可靠性<sup>[9]</sup>。针对该问题,目前主要的解决措施为:一是通过预测新能源出力的大小,提高预测的精度<sup>[10]</sup>;二是通过需求响应参与调峰来削弱风电出力随机性带来的不利影响<sup>[11]</sup>;三是建立相应的电价调整手段,改善和调整电力功

率曲线的性状,包括新能源出力曲线、常规机组出力曲线、储能出力曲线和需求侧负荷曲线。目前针对每类曲线性状及其相关关系的研究还不多见,现有研究主要关注传统电力负荷特性指标<sup>[12]</sup>和含气象特点负荷的描述,以及销售电价与需求侧电量的关系<sup>[13]</sup>。前者针对的是电源、负荷协调控制后总电力功率曲线或负荷功率的描述,是单一曲线;后者将售电电价设置为时间序列非平稳变量,使其与电力需求的非平稳变量之间线性组合成为平稳的序列,从而在电力需求与电价的时间序列之间建立协整关系,这是在不同曲线间建立关系模型的一种有效尝试。

当前针对新能源出力曲线、负荷曲线、常规机组出力曲线和电价等时间序列,主要是利用欧氏距离度量其相似性<sup>[14]</sup>,而对于其表现出的非平稳性,本文提出利用协整理论研究多曲线之间的关系。将源-网-荷-储曲线中的源、网曲线归纳为源曲线,荷、储曲线归纳为荷曲线,源曲线与荷曲线因电力系统固有的功率实时平衡的特点而呈现协整的关系,因此通过各种技术手段实现的源-网-荷-储协同调整与源-荷曲线时间序列的协整,在数学意义上是完全一致的。为此,本文建立与价格相关的源-荷协整关系模型,并提出以常规机组出力波动率最小为目标,以不平衡电价为约束的源-荷曲线与电价时间序列协整的经济技术模型,以刻画电价与各功率曲线的联动作用,充分发挥电源侧及需求侧的调节潜力,最大化地消纳新能源。

## 1 源-荷协整关系

### 1.1 传统电源总功率曲线与负荷曲线之间固有的协整关系

在传统电力系统中,通常依据“发电跟踪负荷”

收稿日期:2019-05-29;修回日期:2019-12-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71331001,91746118);  
湖南省自然科学基金资助项目(2019JJ40302)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(71331001,91746118) and the Natural Science Foundation of Hunan Province(2019JJ40302)

的常规电网运行控制理论,即电源总功率曲线与负荷总量曲线因发电、用电必须满足实时功率平衡而完全相同,统称为电力负荷曲线。由于电力负荷曲线是按照时间顺序排列的负荷值,其属于数据流中的时间序列,并且其均值、方差和协方差等电力负荷特性指标均与时间有关,因此在数学上称电力负荷曲线时间序列具有明显的非平稳性。在协整理论中,如果非平稳变量的线性组合是平稳的,则变量间是协整的关系<sup>[15]</sup>。而在电力系统中,由于电源功率曲线与负荷曲线具有非平稳性,且二者的功率之和满足线性关系(其和为0),因此电源总功率曲线与负荷总量曲线之间存在固有的协整关系。

### 1.2 新能源曲线与负荷曲线的非平稳性及其非协整关系

在新能源高渗透率的电力系统中,以风电为例,将一天分为48个时段。风电和负荷的随机性增加了电力系统调度和运行的难度,风电出力曲线与负荷曲线之间在时间维度上存在相反的变化趋势,即风电出力曲线存在反调峰特性。从典型的日内功率波动角度来看,风电在夜间出力较多,白天出力较少,而电力负荷的高峰期位于第24时段和第40时段左右,低谷期位于第11时段左右,如图1所示。

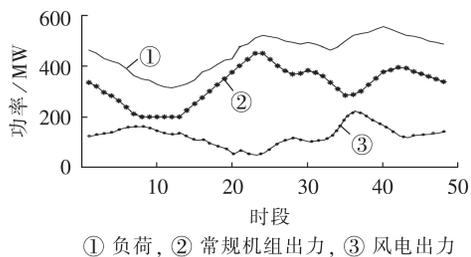


图1 系统传统运行方式

Fig.1 Traditional system running status

由图1可以看出,风电出力曲线与负荷曲线是跟随时间推移而发生变化的序列,均呈现出明显的非平稳性,且二者之间存在明显的逆向分布特点。因此负荷曲线不能跟随风电曲线的波动而发生实时变化,二者之间不能形成协整关系。随着风电发电并网容量的逐渐增加,系统往往不得不频繁调整常规机组出力,甚至频繁启停机组来实现风电发电的全额并网,保证电源侧的总功率曲线与需求侧的负荷总量曲线尽可能地完全一致,因此常规机组出力曲线也跟随时间发生波动,表现出明显的非平稳性,并且常规机组出力与风电出力时间序列之间也不能形成协整关系。

### 1.3 源-荷协整关系的技术和经济手段

协整理论认为如果多个非平稳变量是协整的,则它们之间一定存在某个线性组合是平稳的。当前电力系统中,新能源出力曲线、用户负荷曲线及储能

出力曲线往往呈现出典型的非平稳序列特征,而传统机组出力曲线被期望具有平稳性,因此,本文基于协整理论分析源-荷-储运行的协整特性。

在电力系统中多曲线功率平衡关系式为:

$$P_{Wt} + P_{Gt} - P_{Lt} - P_{St} = 0 \quad (1)$$

其中, $P_{Wt}$ 、 $P_{Gt}$ 、 $P_{Lt}$ 、 $P_{St}$ 分别为 $t$ 时段的新能源出力、常规机组出力、负荷和储能出力。本文中 $P_{Wt} + P_{Gt}$ 指“源”, $P_{Lt} + P_{St}$ 指“荷”,所有变量之间构成一个协整关系,而该协整关系并不能体现系统各功率曲线的协调运行特征,因此需要进一步研究基于常规机组出力平稳的源-荷协整关系,即通过曲线之间的相互协调调整,使新能源出力曲线、负荷曲线和储能出力曲线的组合曲线形成特定的协整关系,使常规机组出力稳定。协整表达式如下:

$$P_{Lt} = P_{L0} + P_{St} \quad (2)$$

$$P_{Lt} = \alpha_0 + \alpha_1 P_{Wt} + \mu_t \quad (3)$$

$$P_{Gt} = \alpha_0 + \hat{\mu}_t \quad (4)$$

$$\hat{\mu}_t = (\alpha_1 - 1) P_{Wt} + \mu_t \quad (5)$$

其中, $P_{Lt}$ 为 $t$ 时段用户负荷曲线和储能出力曲线的组合功率曲线; $\alpha_0$ 、 $\alpha_1$ 为常数; $\mu_t$ 为残差序列; $\hat{\mu}_t$ 为常规机组出力残差。

式(2)~(5)表明虽然新能源出力曲线、负荷曲线以及储能出力曲线均具有非平稳性,但是经过曲线之间的协调调整,最终可以实现新能源出力曲线与组合功率曲线形成一个协整关系(式(3)),进而使常规机组出力平稳。

#### 1.3.1 源-荷协整的技术手段

当前的弃风、负荷调整、充放电等技术手段均是为了实现源-荷协整,如图2所示。

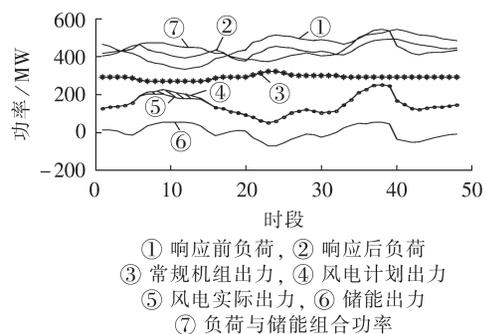


图2 技术手段实现源-荷协整的运行状态

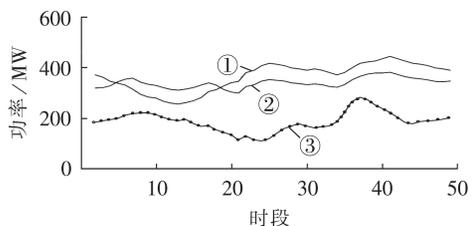
Fig.2 Source-load co-integration operation status through technical means

在新能源高渗透率的电力系统中,风电出力的波动性导致电网频繁调节,当常规机组调节能力不足时,需要通过弃风、负荷调整或者充放电保证电力系统供需平衡。由负荷调整前后的曲线变化可以看出:当风电出力过多而常规机组不能满足风电出力波动和负荷需求时,采用切除具有可调节特性的负

荷来保证电力系统供需平衡;而当风电出力超出常规机组调节能力时,若电网全额接纳风电,常规机组就会被迫减小出力甚至停机,为了保证电网运行的经济性与安全性,还可以采取弃风的措施,如图2中斜线部分所示为弃风电量;利用储能装置与负荷的组合提升系统的功率平衡能力,减少弃风电量,从而实现电力系统的稳定运行,此时储能曲线与负荷曲线的组合功率曲线与新能源出力曲线形成协整关系。综上可知:通过上述方式协调调整源-荷-储多条功率曲线出力,可使多曲线达到协整的状态。

### 1.3.2 源-荷协整的经济手段

除技术手段外,当前采用的分时电价、需求侧管理等经济手段也可以实现源-荷协整,即利用价格杠杆和经济激励改变负荷曲线性状,从而将电源侧功率曲线与负荷侧功率曲线进行有效关联。如利用分时电价引导用户参与发电调度,最终实现发电功率与负荷功率的平衡,如图3所示。



① 响应前负荷, ② 响应后负荷, ③ 风电出力

图3 经济手段实现源-荷协整的运行状态

Fig.3 Source-load co-integration operation status through economic means

因此,基于上述理论分析,电力曲线的调控目标已经由负荷曲线平稳转变为常规机组出力曲线、负荷曲线、风电出力曲线这三者的共同协调、相互跟随调整,并与时间序列方法中的协整理论相关联。本文利用市场经济手段进行调控,即通过价格机制将风电出力曲线与负荷曲线的变化波动相关联,从而利用电价与源-荷曲线之间的相关作用,使源-荷曲线时间序列满足协整关系。

## 2 源-荷曲线与电价的非平稳性及协整关系建模

### 2.1 非平稳性及协整关系的建立

协整是对非平稳性变量之间相关关系的描述。在计量经济学中,如果变量之间存在协整关系,则说明变量之间会存在单一或者相互影响的关系<sup>[4]</sup>。在电力系统中,无论是电源侧还是需求侧均存在相应的协调关系,这些关系会改变常规机组出力曲线、新能源出力曲线和负荷曲线。其中,常规机组出力曲线被期望具有时间序列平稳性,而新能源出力曲线以及负荷曲线往往呈现出典型的非平稳序列特征。电价的时间序列也具有非平稳现象。协整理论表明

非平稳变量之间的线性组合如果满足平稳性,则变量之间具有协整关系,因此,本文基于协整理论分析源-荷曲线与电价时间序列之间的协整关系,以揭示变量之间存在的一种变化趋势。其建模步骤具体如下。

#### (1) 形成时间序列。

对原始数据进行分析,若原始数据的时间序列非平稳性较强,则需要进行线性化处理,本文采用差分运算生成满足协整关系模型要求的时间序列。

非平稳序列的差分运算过程可表示为:对于非平稳序列 $x_t$ ,有 $x_t = x_{t-1} + \mu_t$ ,经差分运算后等价变形为 $\Delta x_t = \mu_t$ ,由于 $\mu_t$ 为白噪声,因此差分后的序列 $\{\Delta x_t\}$ 是平稳的。

#### (2) 进行单位根检验,即 ADF 检验 (Augment Dickey-Fuller test)。

在计量分析过程中,为了得到真实回归结果,首先需检验数据的平稳性,由此本文采用 Dickey & Fuller 所提出的 ADF 单位根检验方法来检验序列是否平稳。因此,在建立协整关系时,采用电价手段改变新能源并网功率和负荷功率,从而使得新能源出力序列或负荷序列满足单整性条件。

#### (3) 协整检验。

协整检验的方法有基于模型系数本身的似然比检验和共同趋势检验以及基于静态残差的 E-G (Engle-Granger) 两步检验法等。本文采用 E-G 两步检验法来检验序列的协整关系。

第一步:建立变量 $Z_t$ 与变量 $X_t$ 、 $Y_t$ 之间的均衡关系。

$$Z_t = \delta_0 + \delta_1 X_t + \delta_2 Y_t \quad (6)$$

非均衡误差项 $\mu_t$ 为:

$$\mu_t = Z_t - \delta_0 - \delta_1 X_t - \delta_2 Y_t \quad (7)$$

$Z_t$ 与 $X_t$ 、 $Y_t$ 间分别存在均衡关系:

$$Z_t = \beta_0 + \beta_1 X_t + \nu_{1t} \quad (8)$$

$$X_t = \gamma_0 + \gamma_1 Y_t + \nu_{2t} \quad (9)$$

其中, $\delta_0$ 、 $\delta_1$ 、 $\delta_2$ 、 $\beta_0$ 、 $\beta_1$ 、 $\gamma_0$ 、 $\gamma_1$ 为常数; $\nu_{1t}$ 、 $\nu_{2t}$ 分别为 $Z_t$ 与 $X_t$ 、 $X_t$ 与 $Y_t$ 之间的残差序列。

第二步:检验 $\nu_{1t}$ 、 $\nu_{2t}$ 和 $\mu_t$ 的单整性。

如果非均衡误差项 $\nu_{1t}$ 和 $\nu_{2t}$ 是稳定序列 $I(0)$ ,则变量之间的任意线性组合也是稳定序列。

### 2.2 电价特性

为充分挖掘电源侧和负荷侧的调节潜力,利用灵活的电价激励发电商和用户根据电价信号调整自身的发、用电策略:随着新能源发电功率的上下波动,实时上网电价跟随性低高调整,随着需求侧用户功率的上下波动,实时销售电价则激励性高低调整,通过价格机制,将新能源发电功率曲线与需求侧用户功率曲线的变化波动相关联。为研究源-荷曲线

与电价时间序列之间的协整关系,本文定义一种新型电价 $C_t$ ,使新能源出力可以影响电价的变化,且电价的变化会导致负荷曲线发生联动作用,即该电价为参与电源侧购电电价 $C_t^{\text{by}}$ 与参与负荷侧售电电价 $C_t^{\text{sale}}$ 的加权平均电价。

$$C_t = \psi_1 C_t^{\text{by}} + \psi_2 C_t^{\text{sale}} \quad (10)$$

$$\psi_1 + \psi_2 = 1 \quad (11)$$

其中, $\psi_1$ 为购电电价权重系数, $\psi_2$ 为售电电价权重系数,本文将均设定为随新能源出力的实时波动而时刻变化的系数。

### 2.3 源-荷曲线与电价时间序列之间的协整关系

当前新能源出力并网会导致大量的弃风、弃光等损失,因此可以将弃风、弃光的新能源视为发电成本低的电力,但同时也必须考虑风电功率预测误差带来的不平衡功率损失和负荷需求给传统机组出力带来的影响,且电价的变化会影响风电上网功率的大小以及用户用电的行为习惯。在源-荷曲线与电价协整关系的建立过程中,考虑到新能源与负荷曲线之间存在的非协整关系,同时还需要分析各曲线的协调运行特征,因此本文利用电价机制调节源-荷曲线形成特定的协整关系,从而使得常规机组出力稳定,变量之间的协整表达式如下。

(1)形成时间序列。

对原始数据进行线性化处理,生成满足协整关系模型要求的时间序列 $\{C_t\}$ 、 $\{P_{w,t}\}$ 以及 $\{P_{L,t}\}$ 。

(2)ADF检验。

在进行协整检验之前必须保证3个变量时间序列的单整性,因此需要利用电价调整源-荷曲线,使其满足要求。

(3)协整检验。

通过调节源-荷曲线与电价时间序列,采用E-G两步法对建立的协整关系进行检验,其表达式为:

$$P_{L,t} = \alpha_0 + \alpha_1 P_{w,t} + \alpha_3 C_t + \mu_t \quad (12)$$

$$P_{C,t} = \alpha_0 + \hat{\mu}_t \quad (13)$$

其中, $\alpha_3$ 为常数。

## 3 源-荷曲线时间序列与电价之间的协整关系函数及约束条件

在新能源渗透的电力系统中,若负荷与新能源曲线跟随性波动,则常规机组出力将达到平稳状态,因此本文采用常规机组出力波动率 $V_p$ 的大小来反映源-荷曲线与电价时间序列之间的协整程度效果,并建立常规机组出力波动率最小化的关系函数。在数学上,方差可以反映随机变量偏离其均值的程度,因此将常规机组的出力波动率定义为常规机组出力的标准差与其几何均值的比值。

### 3.1 目标函数

$$\min V_p \quad (14)$$

$$V_p = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{G_i} - \bar{P}_G)^2}}{\sqrt{P_{G_1} P_{G_2} \cdots P_{G_n}}} \quad (15)$$

其中, $P_{G_i}$ 为常规机组出力序列的第*i*维; $\bar{P}_G$ 为常规机组出力序列的算术平均值; $n$ 为常规机组出力维数。

### 3.2 约束条件

(1)系统功率平衡约束。

$$\sum_{i=1}^{N_c} U_{ii} P_{C_i} + \sum_{j=1}^{N_w} (P_{w,j} + \Delta P_{w,j}) = P_{L,t} + \Delta P_{L,t} \quad (16)$$

其中, $\Delta P_{L,t}$ 为*t*时段系统中的负荷变化量; $P_{w,j}$ 为*t*时段系统中风电机组*j*出力; $\Delta P_{w,j}$ 为*t*时段系统中风电机组*j*出力的变化量; $U_{ii}$ 表示*t*时段常规机组*i*的启停状态,其值为1表示启动,为0表示停止; $N_c$ 、 $N_w$ 分别为常规机组和风电机组的台数。

(2)常规机组出力约束。

常规机组参与调度主要受到出力约束、爬坡约束和启停时间约束,具体见文献[16]。

(3)电价约束。

$$|\Delta C_t| \leq \Delta C_{\max} \quad (17)$$

其中, $\Delta C_t$ 为电价的调整量; $\Delta C_{\max}$ 为最大的电价调整量,其应使联动的新能源出力和负荷在机组允许范围内。

## 4 实例数据分析

### 4.1 数据处理及其单位根检验

本文选取含风电机组的发电系统作为分析对象,其中包含3台常规机组,总装机容量为600 MW,常规机组运行数据见文献[16]。风电装机容量为200 MW。采用一个调度周期为24 h,每一个调度时段为30 min,将一天内48个时段的负荷、新能源出力等数据作为原始数据,选用电价1与电价2进行常规机组出力波动程度比较,具体见附录A。为了验证不同电价对协整关系的影响效果不同,将电价1设定为随时间实时变化的电价,将电价2设定为阶段性变化的电价。首先进行单位根检验,具体见附录B。经过ADF检验可得: $\{C_{1,t}\}$ 、 $\{C_{2,t}\}$ 、 $\{P_{w,t}\}$ 以及 $\{P_{L,t}\}$ 均为一阶单整,可以建立协整模型。

### 4.2 2种结果对比分析

(1)与2种电价协整后的结果分析。

通过上述分析可以得出源-荷曲线与电价协整后的示意图如图4所示。

源-荷曲线的时间序列易受天气、收入、电价政策等多种因素影响。由图4可见,源-荷曲线与电价1进行协整后,负荷曲线与风电出力曲线之间跟随

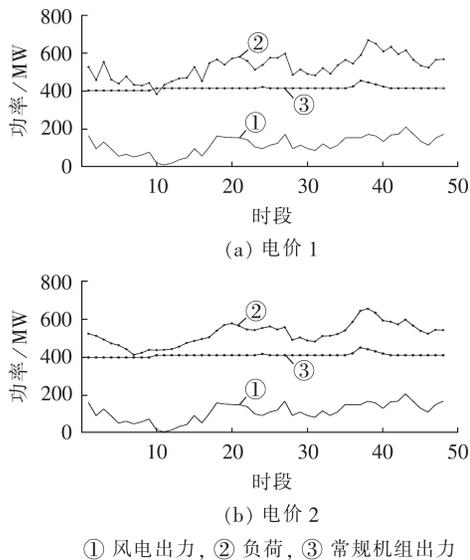


图 4 源-荷曲线与 2 种电价协整后的示意图

Fig.4 Schematic diagram of co-integration relationship between source-load curve and two electricity prices

性波动较明显,此时常规机组出力平稳,而源-荷曲线与电价 2 进行协整后,负荷曲线与新能源出力曲线之间并不能实时跟随性波动。

(2)常规机组出力波动率对比分析。

分别比较 2 种协整状态下的常规机组出力波动率情况,如表 1 所示。

表 1 常规机组出力波动率比较

Table 1 Comparison of output volatility for conventional unit

运行状态	曲线	电价	$V_p$
传统运行状态	常规机组出力曲线	—	0.223
源-荷曲线与电价的协整运行状态	常规机组出力曲线	1	0.036
		2	0.048

由表 1 可以看出,相较于传统运行状态,源-荷曲线与电价的协整运行状态中常规机组出力曲线波动率均有明显的下降,且与不同电价进行协整的效果也不同:源-荷曲线时间序列与电价 1 的协整效果比与电价 2 的协整效果好。由此可通过电价的调整,实现负荷曲线与风电出力曲线之间达到追峰随谷的效果,从而使得常规机组出力波动率较小,进而实现源-荷曲线与电价之间的协整程度最大化。

## 5 结论

本文利用时间序列分析理论,研究源-荷曲线时间序列及电价之间的协整关系,建立源-荷曲线时间序列与电价之间的协整关系模型,进而对比源-荷曲线时间序列与不同电价之间的协整程度。得出如下结论。

(1)因源-网-荷-储协调调度、协同运行是通过

技术、经济手段实现系列功率曲线的协整,与时间序列协整理论的协整是关联和一致的,因此称其为源-网-荷-储协整运行。

(2)针对新能源高渗透率系统中源-网-荷-储协整运行,提出源-荷曲线的非平稳性以及协整关系。若将源-网-荷-储 4 条曲线任意组合为 2 组时间序列数据,则协整关系同样成立,且可利用模型解决新能源消纳问题,实现源-网-荷-储之间的协整。

(3)构建适应市场调控和新能源消纳的源-荷曲线时间序列与电价协整关系模型,从而更好地实现实时减少传统机组调频以及新能源损失等。

(4)提出采用常规机组出力波动率的大小衡量源-荷曲线时间序列与电价之间的协整程度。

笔者后续将进一步研究考虑源-荷曲线与电价之间协整关系的定价模型,以实现变量之间协整程度的最大化。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 郭鹏,文晶,朱丹丹,等. 基于源-荷互动的大规模风电消纳协调控制策略[J]. 电工技术学报,2017,32(3):1-9.  
GUO Peng, WEN Jing, ZHU Dandan, et al. The coordination control strategy for large-scale wind power consumption based on source-load interactive[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3): 1-9.
- [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] 孙东磊,韩学山,张波. 电力系统源网间协同的经济调度模型及矩量半定规划法[J]. 电力自动化设备,2016,36(5):74-80,86.  
SUN Donglei, HAN Xueshan, ZHANG Bo. Power system economic dispatch model with source-network synergy and moment-based semi-definite programming[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5): 74-80, 86.
- [4] 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 Wenyong, 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.
- [5] 李鹏,华浩瑞,陈安伟,等. 基于二层规划模型的交直流混合微网源荷协调分区优化经济调度[J]. 中国电机工程学报,2016,36(24):6769-6779,6931.  
LI Peng, HUA Haorui, CHEN Anwei, et al. Source-load-storage coordination partition optimal economic operation of AC/DC hybrid microgrid based on bilevel programming model[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(24): 6769-6779, 6931.
- [6] SONG M L, CUI L B. Economic evaluation of Chinese electricity price marketization based on dynamic computational general equilibrium model[J]. Computers & Industrial Engineering, 2016, 101: 614-628.

- [7] 包宇庆,王蓓蓓,李扬,等. 考虑大规模风电接入并计及多时间尺度需求响应资源协调优化的滚动调度模型[J]. 中国电机工程学报,2016,36(17):4589-4599.  
BAO Yuqing, WANG Beibei, LI Yang, et al. Rolling dispatch model considering wind penetration and multi-scale demand response resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4589-4599.
- [8] 陈宏,冷华,唐海国,等. 含可再生能源的微电网经济运行双层优化方法[J]. 电力科学与技术学报,2018,33(3):93-98.  
CHEN Hong, LENG Hua, TANG Haiguo, et al. Two-stage optimization method on micro-grid economic operation with renewable energy resources[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(3): 93-98.
- [9] BIZUAYEHU A W, DE LA NIETA A A S, CONTRERAS J, et al. Impacts of stochastic wind power and storage participation on economic dispatch in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(3): 1336-1345.
- [10] HAQUE A U, NEHRIR M H, MANDAL P. A hybrid intelligent model for deterministic and quantile regression approach for probabilistic wind power forecasting [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1663-1672.
- [11] NOJAVAN S, AALAMI H A. Stochastic energy procurement of large electricity consumer considering photovoltaic, wind-turbine, micro-turbines, energy storage system in the presence of demand response program[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 103: 1008-1018.
- [12] 刘思, 李林芝, 吴浩, 等. 基于特性指标降维的日负荷曲线聚类分析[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 797-803.  
LIU Si, LI Linzhi, WU Hao, et al. Cluster analysis of daily load curves using load pattern indexes to reduce dimensions [J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 797-803.
- [13] 程瑜, 张粒子. 销售电价与用电需求的协整建模分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7): 118-122.  
CHENG Yu, ZHANG Lizi. The co-integration analysis of power tariff and demand [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(7): 118-122.
- [14] ŁUCZAK M. Hierarchical clustering of time series data with parametric derivative dynamic time warping [J]. Expert Systems with Applications, 2016, 62: 116-130.
- [15] CHO J S, KIM T H, SHIN Y. Quantile cointegration in the autoregressive distributed-lag modeling framework [J]. Journal of Econometrics, 2015, 188(1): 281-300.
- [16] 周任军, 陈瑞先, 童小娇, 等. 考虑线路阻塞的风险限制调度多步整合模型[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(19): 4930-4936.  
ZHOU Renjun, CHEN Ruixian, TONG Xiaojiao, et al. Multi-step integration models for risk-limiting dispatch of line congestion [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 4930-4936.

#### 作者简介:



方绍凤

方绍凤(1992—),女,河南新乡人,硕士研究生,主要从事电力系统源网荷储协调调度、电力系统优化运行、电力需求侧管理方面的研究工作(E-mail: 2351132839@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);

张武军(1980—),男,湖南安乡人,教授级高级工程师,博士,主要研究方向为能源决策、电力系统规划等(E-mail: 41307518@qq.com)。

(编辑 王锦秀)

## Co-integration model between source-load co-integration relationship and electricity price time series

FANG Shaofeng<sup>1</sup>, ZHOU Renjun<sup>1</sup>, ZHANG Wujun<sup>2</sup>, LI Juan<sup>2</sup>, PENG Yuanyuan<sup>1</sup>, SHI Liangyuan<sup>3</sup>

(1. Hunan Province Collaborative Innovation Center of Clean Energy and Smart Grid,

Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China;

2. China Energy Engineering Group Hunan Electric Power Design Institute Co., Ltd., Changsha 410007, China;

3. Guangzhou Power Supply Bureau Co., Ltd., Guangzhou 510620, China)

**Abstract:** Aiming at the characteristic that the power source output curve and the load curve at demand side are completely consistent due to real-time power balance, their mathematical co-integration relationship is verified. In the coordinated operation of source-grid-load-storage in power system integrated with renewable energy of high permeability, the power curves of source-grid and load-storage are respectively combined into source and load curves, and the source-load co-integration relationship and theoretical basis of source-grid-load-storage coordinated dispatch are proposed. In order to realize co-integration and absorb renewable energy, an economic and technical model of co-integration between source-load and electricity price time series is proposed, which takes the minimum fluctuation rate of conventional unit output as its objective, and the unbalanced electricity price as its constraint. The case results show that small fluctuation rate of conventional unit output is obtained after co-integration between source-load and electricity price. Therefore, the co-integration relationship between variables can fully exploit the resource allocation potential of terminal users, stimulate the change of load curve of demand side, and maximize the consumption of renewable energy.

**Key words:** co-integration test; co-integration relationship; coordinated dispatch; source-load co-integration; renewable energy consumption

附录 A:

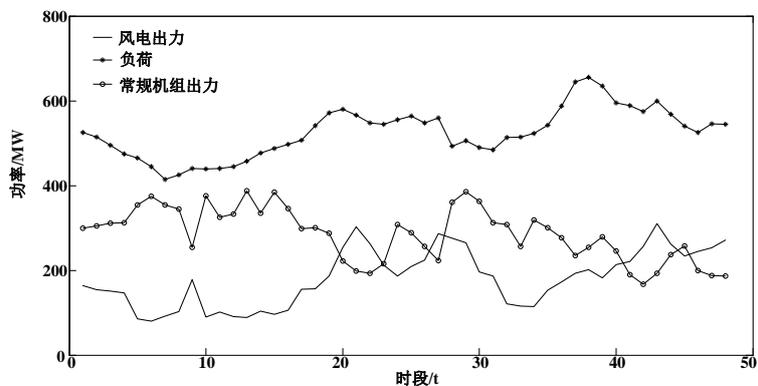


图 A1 协整前源-荷变量的时间序列

Fig.A1 Time series of source-load variables before co-integration

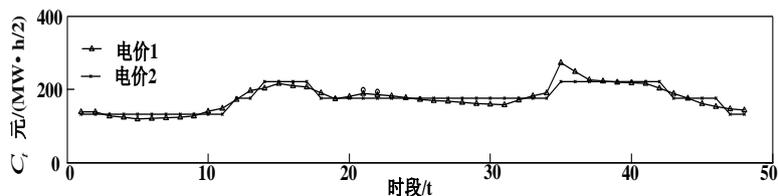


图 A2 协整前电价变量的时间序列

Fig.A2 Time series of electricity price variables before co-integration

由图 A1 可以看出，电力负荷曲线通常表现为非平稳性，即电力负荷曲线的统计特征不是一个不随时间的推移而发生变化的序列。风电出力曲线因受气候变化的影响也呈现典型的非平稳时间序列的特征。电价 1 与电价 2 数据构成的时间序列曲线如图 A2 中所示，也存在非平稳性现象。

附录 B:

经过单位根检验后得知, 4 个变量都属于一阶单整序列, 然后对各变量时间序列进行协整检验, 从而建立负荷、新能源出力、常规机组出力以及电价之间的协整关系模型。检验结果如表 B1 所示。

表 B1 变量序列的单位根检验  
Table B1 Unit root test of variables series

变量	ADF 检验	临界值 (5%)
$C_{1t}$	-1.169 107	-3.508 508
$C_{2t}$	-1.180 045	-3.508 508
$P_{Wt}$	-2.800 636	-3.510 740
$P_{Lt}$	-2.673 044	-3.510 740
$\Delta C_{1t}$	-5.731 269	-3.510 740
$\Delta C_{2t}$	-6.854 493	-3.510 740
$\Delta P_{Wt}$	-6.060 204	-3.510 740
$\Delta P_{Lt}$	-4.894 529	-3.510 740

2 组电价与其他变量之间的协整回归结果如下:

$$P_{Lt} = 0.479P_{Wt} + 0.886C_t + 282.732 \quad (18)$$

$$P_{Lt} = 0.478P_{Wt} + 0.874C_t + 284.886 \quad (19)$$

对残差项进行单位根检验, 结果得出残差序列不存在单位根, 即为平稳序列, 因此该协整关系成立。则变量之间的协整关系为:

$$P_{Lt} = 0.44P_{Wt} + 0.92C_t + 282.86 + 0.62ecm(-1) \quad (20)$$

$$P_{Lt} = 0.44P_{Wt} + 0.86C_t + 294.31 + 0.65ecm(-1) \quad (21)$$

通过上述协整检验分析可以得到源-荷曲线与电价的协整关系式 (20)、(21), 并且可以看出在均衡波动的条件下,  $t$  时段电价 1 与电价 2 的波动均会对源-荷曲线与电价之间的协整关系产生正向影响, 但 2 种关系的协整程度不同。