

# 风电入网合同机制研究<sup>①</sup>

李娟<sup>1</sup>, 李龙<sup>1</sup>, 瞿慧<sup>1</sup>, 薛巍立<sup>2</sup>

(1. 南京大学工程管理学院, 南京 210093; 2. 东南大学经济管理学院, 南京 210096)

**摘要:** 基于存在电量现货交易市场的假设, 针对风电场和电网公司所组成的系统, 研究了风电入网合同机制. 为有效管理风电场所供给电能的供应波动性, 分别提出两种风电入网合同机制: 固定供给合同和预测承诺供给合同. 相对于前者, 预测承诺供给合同将部分供应波动风险从风电场转移给电网公司, 并且降低了电网公司对电量现货交易市场的依赖程度. 研究了风电场和电网公司的最优决策, 以及系统参数对系统均衡的影响. 最后, 分析了政府的补贴策略对成员决策的影响, 得出从社会总福利最大化的视角, 政府补贴全部提供给风电场为占优策略, 且该补贴策略使得社会总福利得到帕累托改进; 但从系统运作指标的角度分析, 补贴给风电场虽然减少了弃风率, 却增加了系统对电量现货交易市场的依赖性.

**关键词:** 风电; 固定供给合同; 预测承诺供给合同; 不确定性供应; 政府补贴

**中图分类号:** F423.2   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1007-9807(2016)08-0043-11

## 0 引言

在中国, 新能源产业处于高速发展阶段, 尤以风能发展最为迅速. 风能作为一种清洁的可再生能源, 也越来越受到世界各国的重视. 风能利用的条件是风力机轮毂中心高处的平均风速不小于 5 m/s, 因而风电场的布局具有明显区域特点.

然而, 风电产能急速扩张, 超过了电网公司配套设施的建设速度, 使得风电无法得到充分利用. 根据国家能源局统计, 2013年, 全国弃风高达 162 亿度, 占同年风力发电总量的 11%. 个中缘由为: 第 1, 风电场的供电预测精度偏低, 预测误差高达 20%, 电网公司抵制接纳波动幅度大的风电; 第 2, 风电并网需要配套建设用于灵活调节的调峰电源, 然而, 在风电集中的三北地区, 电源结构单一, 抽水蓄能、燃气电站等调峰电源资源较少. 第 3, 风电多需要跨区输送, 电网的远程输送能力不足.

我国政府采取了多种措施进行应对, 其一, 补

贴基础设施建设费用, 涵盖了从风电场投资到电网公司运输线建设等; 其二, 向并网风电场提供风电补贴; 其三, 颁布《中华人民共和国可再生能源法》, 为风电并网提供政策支持; 其四, 发布《风电发展“十二五”规划》, 引导相关企业参与风电现货市场交易.

综上, 风电场和电网组成的运作系统中, 一方面, 风电场的实时供电量依赖于随机波动的风速, 其供电输出有极大不确定性, 这给电网公司的运作平稳性提出很大挑战; 另一方面, 为提高风电的利用率, 政府可以选择向系统中的不同成员提供财政补贴, 降低风电场或电网公司的运作成本. 因此, 本文的研究问题是: 如何激励风电场准确预报供电量? 如何降低电网公司对风电的弃风率? 如何使得政府对风电行业的补贴达到社会福利最大化? 所涉及文献有如下几个领域.

关于电力市场供应决策的研究中, Green 和 Newbery<sup>[1]</sup>对英国电力市场进行了建模分析, 将电

① 收稿日期: 2013-10-08; 修订日期: 2014-12-04.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71471086; 71271111; 70802041).

作者简介: 李娟(1979—), 女, 河南焦作人, 博士, 副教授. Email: juanli@nju.edu.cn

力供需平衡分为3种:低需求期、高需求期和波动需求期,并对不同情况下的边际成本进行了分析和数值模拟,得出了不同供需水平下电力市场提供电量的最优决策. Green<sup>[2]</sup>运用线性模型分析了政府政策对电力市场竞争的影响,得出在市场机制的作用下,加剧了英国电力市场的竞争,减少了企业的利润,但是电价不会变化得太剧烈.

关于不确定性如何影响采购和供应决策的研究中, Tsay 和 Lovejoy<sup>[3]</sup>在需求不确定性的供应链系统,提出了数量弹性契约,要求客户提前预测,并承诺最小采购量. 针对此类系统, Durango-Cohen 和 Yano<sup>[4]</sup>提出了预测承诺合同:在预测阶段,引入对零售商过高预测的惩罚(customer-commitment-penalty),在采购阶段,引入对零售商过低采购量的惩罚(delivery-penalty),帮助供应商有效地管理零售商的需求预测行为. 随后, Durango-Cohen 和 Yano<sup>[5]</sup>进一步分析了面对诚实的零售商和追逐利益的零售商时,供应商的最优供应策略. 上述研究均集中在不确定性需求对供应和采购决策的影响方面. 本文研究问题中,不确定性来自于供应端,蒋东荣等<sup>[6]</sup>在多期模型中,基于线性规划,提出逐步淘汰式合约电量和竞价电量分配策略,兼顾了风电场的效益和电网所面临的虚报风险. 王丽梅等<sup>[7]</sup>对现货供应不确定下的优化采购策略进行了研究,推出相对于供应充足的情况,不确定性的增加会导致订货量的增加和供应链总收益的下降. Liu 等<sup>[8]</sup>研究了供应不确定性对市场决策和库存决策的影响,并讨论了付出努力减小供应不确定性带来的收益变化,这将指导公司进行新技术研发和应用的决策. 进一步的分析结果表明,减小市场营销成本较小产品的供应不确定性能得到较高的收益.

关于新能源的运作决策研究中, Korpaas 等<sup>[9]</sup>分析了储能对风电交易价格的影响,并通过仿真模型进行了计算分析; Kim 和 Powell<sup>[10]</sup>在风能分布均匀的假设下研究了风电场存储策略的最优决策问题. Wu 和 Babich<sup>[11]</sup>的分析表明,在私有信息存在的条件下,电厂有向分销商谎报供应情况的利益诉求,而分销商可以通过提高处罚来预防电厂的谎报行为. Wu 和 Kapuscinski<sup>[12]</sup>讨论了通过能源存储和主动削减输出减少风电供应间歇性的方法,并通过数值模拟进行分析求解;另一方面该

文结果表明,运营成本最小化和碳排放减小不能同时达到最优. 能源存储能减少供应间歇性和运营成本,但是会增加单位碳排放.

本文的研究贡献在于:第1,不同于以往研究采用运作系统中的电量存储释放的管理方式满足电网运作平稳性要求,本文在单期模型框架中,引入电量现货交易市场,在满足电网公司运作平稳性条件下,刻画了风电场的最优承诺供应决策和电网公司的最优采购决策;第2,借鉴需求不确定系统中的预测承诺合同,构建了风电场供应不确定系统中的预测承诺供给合同,并与固定供给合同进行对比研究;第3,分析了政府补贴按一定比例分别提供给电网公司和风电场时,对电网公司和风电场决策的影响;从社会福利最大化的角度,给出了发放政府补贴的最优策略,并分析了对系统运作指标的影响.

## 1 基本模型

### 1.1 系统特性

依据中国风电发展的现状,基于现有文献的研究进展,本文假设存在风电现货市场,以1个风电场和1个电网公司组成的系统为研究对象,首先,风电场承诺风电供给量,其次,电网公司确定购电量. 风电场面临着不确定性风速,通过风电机组,将风能转换为风电,根据 Boyel<sup>[13]</sup>研究结论,不确定性风电功率和不确定风速近似满足 Logit 曲线关系. 风电功率为单位时间内的供电量,不失一般性,本文假设单位时间内的供电量为  $x$ .

电网公司的电力供应源由风能发电和其他来源共同构成,在本文所研究的系统之外,尚存在大量用电需求方和以传统能源发电为主的供电方,所构成的供需交易市场定义为电量现货交易市场.

在中国,《风电发展“十二五”规划》引导相关企业参与风电的实时交易,可预见的将来,会形成电量现货交易市场. 在美国,可再生能源配额制度(RPS)和可再生能源证书(REC)充分促进和保障了能源的市场交易,最大程度减少政府干预. 目前,电量现货市场交易有两种:日前交易,指提前一天进行的次日24h的电量交易;实时交易,指

提前 15 min 至 1 h 进行的电量交易。

**假设 1 (电量现货交易市场)** 存在电量现货交易市场, 当风电供应不足或有盈余时, 电网公司可以在电量现货市场上进行交易。

电网公司需要提前安排各种电力供应源的配额, 要求风电场提前给出电量预测并以此为依据进行安排。2012 年, 全国风电量占总发电量 2%, 风电份额最高的吉林省也仅占本省的 7.5%。考虑到风电所占比例较小, 在系统中的风电场和电网公司间能够有效的输送风电的前提下有如下假设。

**假设 2 (风电配额)** 电网公司在对风电场的电量进行配额时没有限制。

本文假设电网公司的效用函数由 5 部分构成: 1) 通过向用户售电所获得的期望收益; 2) 向风电场购买风电的费用; 3) 风电场因缺电向电网公司支付的罚金; 4) 电网公司购买供电缺口的支付; 5) 因供应电量波动带来的损失。

对电网公司的效用函数进行合并简化, 可简化为两部分: 1) 电网公司向用户售电获得的纯利润; 2) 电网公司因供应电量波动产生的损失。

实践中, 对风电场而言, 因风速的波动性引发的损失, 体现在对风力机轮毂的冲击方面, 导致风力机轮毂使用时间变短, 是投资层面的损耗; 在本文研究框架内, 不涉及到风电场的投资决策行为。对电网公司而言, 电网的正常运行需要保证电量供给的平稳性, 否则严重时会导致电网崩溃; 本文采用“经济性指标”刻画电网的“安全性运作指标”, 有如下假设。

**假设 3 (平稳性特征)** 电网公司的运作平稳性能表现为其供电量波动性的规避度。

本文研究风电场和电网公司间的两种交易规则: 固定供给合同和预测承诺供给合同。

在预测承诺供给合同(记为合同 YC) 中, 为了缓解不确定性风电供给量所引发的电网波动, 电网公司和风电场签订预测承诺供给合同。双方决策过程为: 首先, 根据对不确定性风电供给量  $x$  的估计, 风电场预测并承诺最小供给量  $M$ , 即风电场承诺向电网公司提供的实际供电量不少于  $M$ 。其次, 根据风电场所承诺的最小供给量, 电网公司向风电场承诺最大采购量  $C$ 。若有一方拒绝, 双方间无交易发生; 若双方均接受对方的提议, 那么,

在不确定性风电供给量实现后, 若  $x < M$ , 电网公司采购的电量为  $x$ , 并从风电现货交易市场买入  $M - x$ , 风电场就额外产生的费用向电网公司支付罚金; 若  $x > C$ , 电网公司采购的电量为  $C$ , 并将剩余的  $x - C$  在电量现货交易市场上交易, 将此部分收益转移给风电场。若  $M \leq x \leq C$ , 电网公司采购的电量为  $x$ 。最后, 双方获得各自收益。

在固定供给合同(记为合同 GD) 中, 最小供给量和最大采购量相同且由风电场进行决策, 记为  $Q$ , 其他交易细节与预测承诺供给合同一致。

《可再生能源电价附加补助资金管理暂行办法》第十条规定, 对包括风电在内的可再生能源给予适当补助, 补助标准暂定为每年 4 000 元/kW。文中将考虑将政府补贴按一定比例分配给风电场和电网公司的最优策略。在固定供给合同中, 显然, 政府补贴应该提供给风电场, 这是因为, 若政府补贴给电网公司, 由于电网公司不需要做出任何决策, 所获得的政府补贴仅有助于增加其自身收益, 而对风电场的决策无影响, 不会增加社会总福利, 因此, 政府无动机提供补贴给电网公司。在预测承诺供给合同中, 由于电网公司和风电场均需要做出相应决策, 引入政府补贴会对双方的决策造成影响; 因此, 政府需要考虑补贴策略。

## 1.2 基本参数

本文所涉及到的系统参数和运作指标如下:

$x$ : 不确定性风电供给量,  $f(x)$ ,  $F(x)$  分别为密度函数和分布函数;

$T$ : 风电场的最大供电量;

$w$ : 风电并网单价, 即电网公司向风电场购买单位电量所支付的转移价格;

$p$ : 单位电量零售价, 即电网公司向用户索取的单位电量价格;

$\alpha$ : 在电量现货交易市场, 单位电量买入价格;

$\alpha - w$ : 当电量供应不足时, 风电场支付给电网公司的罚金;

$\beta$ : 在电量现货交易市场, 单位电量卖出价格;

$\gamma$ : 电网公司电量供给量波动的方差的规避程度;

$\mu_E$ : 风电场和电网公司间的成交电量的期望;

$\mu_G$ : 电网公司向用户出售的电量的期望;

$\Delta$ : 风电场和电网公司间的成交电量的方差;

$\Pi_j$ : 成员  $j$  的期望收益;

$\lambda_i$ : 电量现货交易市场的参与度,即在电量现货交易市场购电额度占风电场向电网公司转移的供电量的比例;

$\tau_i$ : 风电入网率,电网公司所采购的风电额度占风电场期望发电额度的比例;

$1 - \tau_i$ : 弃风率,即风电场卖入电量现货交易市场的风电量占风电场期望发电额度的比例;

$s$ : 政府对入网风电的补贴价格;

$\Pi_Z$ : 政府补贴的总支出.

其中,  $i = \{GD, YD\}$  分别指固定供应合同和预测承诺供给合同,  $j = \{E, G\}$  分别指风电场和电网公司; 并且, 系统成员的最优决策和最优收益用上标 “\*” 表示.

在固定供给合同中, 弃风率满足

$$1 - \tau_{GD} = \frac{E(x - Q)^+}{E_x}$$

电量现货交易市场的参与度满足

$$\lambda_{GD} = \frac{E(Q - x)^+}{EQ}$$

在预测承诺合同中, 弃风率满足

$$1 - \tau_{YC} = \frac{E(x - C)^+}{E_x}$$

电量现货交易市场的参与度满足

$$\lambda_{YC} = \frac{E(M - x)^+}{E(\max\{M, \min\{x, C\}\})}$$

假设 4 (无套利原则) 1)  $P > \alpha > w > \beta$ ;

2)  $w + s < \alpha$ .

其中,  $P > \alpha$  是指电网公司的单位电量零售价格总是高于电量现货交易市场的卖出价格;  $\alpha > w > \beta$  是指电网公司无法在电量现货交易市场套利;  $w + s < \alpha$  是指在有政府补贴的情况下电网公司无法在电量现货交易市场套利.

本文所涉及到的决策参数如下:

$Q$ : 在固定供给合同中, 风电场的供给量决策;

$C$ : 在预测承诺供给合同中, 电网公司承诺的最大采购量决策;

$M$ : 在预测承诺供给合同中, 风电场承诺的最小供给量决策;

$\phi$ : 政府补贴提供给电网公司的比例;

$1 - \phi$ : 政府补贴提供给风电场的比例.

## 2 固定风电供给合同机制分析

采用固定风电供给合同 GD 时, 风电场和电网公司间的成交电量的期望为

$$\mu_E = E \min\{x, Q\} = Q - \int_0^Q F(x) dx \quad (1)$$

电网公司向用户出售的电量的期望为

$$\mu_G = Q$$

由于电网公司向用户提供的电量总为  $Q$ , 则电网公司供电的方差波动为 0.

### 2.1 不存在政府补贴的固定供给合同

在固定风电供给合同 GD 中, 若不存在政府补贴, 风电场确定所供应的电量  $Q$ , 最大化其收益函数

$$\begin{aligned} \Pi_E(Q) = & w\mu_E - (\alpha - w) \int_0^Q (Q - x)f(x) dx + \\ & \beta \int_Q^T (x - Q)f(x) dx \end{aligned} \quad (2)$$

其中第 1 项指代风电场向电网公司售电所获转移支付; 第 2 项指代风电场供电不足时向电网公司支付的罚金; 第 3 项指代风电场在现货交易市场上获得的收益.

收到风电场所提交的电量  $Q$  后, 电网公司确定是否接受此合同, 若接受, 电网公司的收益函数为

$$\Pi_G = (p - w)\mu_G \quad (3)$$

定理 1 在固定供给合同 GD 中, 若不存在政府补贴, 风电场的最优决策满足

$$F(Q^*) = \frac{w - \beta}{\alpha - \beta}$$

定理 1 的直观解释为, 在电量现货交易市场, 风电场在确定供应量时, 需要在每少卖出 1 单位电量的机会成本  $w - \beta$  与每少供给 1 度电量的罚金  $\alpha - \beta$  之间权衡.

### 2.2 存在政府补贴的固定供给合同

在固定供给合同 GD 中, 若政府对风电场进行电价补贴, 政府补贴的总支出满足

$$\Pi_Z = s\mu_E$$

存在政府补贴时, 风电场确定所供应的风电量  $Q$ , 最大化其收益函数

$$\begin{aligned} \Pi_E(Q) = & w\mu_E - (\alpha - w) \int_0^Q (Q - x)f(x) dx + \\ & \beta \int_Q^T (x - Q)f(x) dx + s\mu_E \end{aligned} \quad (4)$$

其中,前 3 项与式(2)相同,第 4 项表示风电场从政府补贴政策中获得的收益。

收到风电场所提交的电量  $Q$  后,电网公司确定是否接受此合同,若接受,电网公司的收益函数参见公式(3)。

**定理 2** 在固定供给合同 GD 中,若政府对风电场进行电价补贴,风电场的最优决策满足

$$F(Q^*) = \frac{w + s - \beta}{\alpha + s - \beta} \quad (5)$$

对比定理 2 与定理 1 可见,在政府补贴提供给风电场时,每少供给一度电量的罚金  $\alpha - w$  不变,降低了风电场每少卖出一单位电量的机会成本,从而刺激风电场提高供给量  $Q$ 。

### 3 预测承诺供给合同机制分析

根据预测承诺供给合同 YC,风电场估计不确定性风电供给量  $x$ ,并承诺最小供给量  $M$ ;其次,根据风电场所承诺的最小供给量,电网公司向风电场承诺最大采购量  $C$ 。不失一般性,假设  $C \geq M$ ,风电场和电网公司间的成交电量的期望为

$$\mu_E = E \min\{x, C\} = C - \int_0^C F(x) dx \quad (6)$$

电网公司向用户提供电量的期望为

$$\begin{aligned} \mu_G = & E(\max\{M, \min\{x, C\}\}) \\ = & C - \int_M^C F(x) dx \end{aligned} \quad (7)$$

电网公司向用户提供电量的方差为

$$\begin{aligned} \Delta = & E(\max\{M, \min\{x, C\}\})^2 - \mu_G^2 \\ = & 2 \int_M^C (C - x) F(x) dx - \left( \int_M^C F(x) dx \right)^2 \end{aligned} \quad (8)$$

#### 3.1 不存在政府补贴预测承诺供给合同

预测承诺供给合同 YC 中,当不存在政府补贴时,首先,风电场决策最小供给量  $M$ ,最大化其期望收益函数为

$$\begin{aligned} \Pi_E(M) = & w\mu_E - (\alpha - w) \times \\ & \int_0^M (M - x)f(x) dx + \\ & \beta \int_Q^T (x - C)f(x) dx \end{aligned} \quad (9)$$

其中第 1 项表示风电场向电网公司售电所获转移支付;第 2 项表示风电场供电不足时向电网公司支付的罚金;第 3 项表示风电场在现货交易市场上获得的收益。

根据风电场的决策  $M$ ,电网公司决策  $C$ ,最大化期望收益函数为

$$\Pi_G(M) = (p - w)\mu_G - \gamma\Delta \quad (10)$$

其中第 1 项表示电网公司向用户售电获得的纯利润;第 2 项表示电网公司因供电量波动产生的损失。

**引理 1** 在不存在政府补贴的预测承诺供给合同 YC 中,总有  $C \geq M$ 。

引理 1 的直观解释为,给定风电场的承诺供给量  $M$ ,若电网公司做出的承诺购买量  $C$  小于  $M$ ,那么,若电网公司提高做出的承诺购买量  $C$  至等于  $M$ ,总能提高其收益,并且,电网公司承担的电量波动方差随之增大;因此,电网公司总有动机使得承诺购买量不小于承诺供应量。故下文分析中,仅需考虑  $C \geq M$  情况。

根据引理 1,在预测承诺供给合同 YC 中,分析成员的决策行为,有如下定理。

**定理 3** 在不存在政府补贴的预测承诺供给合同中

$$\begin{aligned} F(C^*) = & \frac{w - \beta}{\alpha - \beta} \\ \int_{M^*}^{C^*} F(x) dx = & \frac{p - w}{2\gamma} \end{aligned}$$

由定理 3,在预测承诺供给合同 YC 中:第 1,电网公司承诺的采购量  $C$ ,等于在固定供给合同 GD 中风电场决定的供给量  $Q$ ;即预测承诺供给合同 YC 中,系统的期望成交量小于固定供给合同 GD 中的。这是因为,电网公司承担了因电量供应波动而引发的损失;第 2,随着电网公司对电量供应波动的规避度  $\gamma$  的增大,风电场需要提高其所做出的承诺供应量  $M$ ,预测承诺供给合同 YC 形式趋近于固定供给合同 GD。特别地,当规避度  $\gamma$  趋向于无穷大时,预测承诺供给合同 YC 蜕变为固定供给合同 GD。

电网公司对实际供电量波动的方差的规避度  $\gamma$  对风电场和电网公司最优决策的直观解释为,电网公司的风险态度  $\gamma$  在一定程度上反映了系统的柔性, $\gamma$  增大时,系统向固定供给合同靠近。特

别的,当  $\gamma$  足够大时,预测承诺供给合同蜕变为固定供给合同。 $\gamma$  的增加会迫使风电场做出让步,电网公司的承诺保持不变,这意味着电网公司对  $\gamma$  非常敏感。

### 3.2 存在政府补贴预测承诺供给合同

在预测承诺供给合同 YC 中,政府进行电价补贴是可以按一定比例分配给风电场和电网公司。存在政府补贴的预测承诺供给合同 YC 中,风电场和电网公司间的成交电量的期望、电网公司的供电量和方差,分别满足式(4)、式(7)和式(8);政府补贴的总支出同式(4)。

若政府补贴提供给电网公司的比例为  $\phi$ ,提供给风电场的比例则为  $1 - \phi$ ,风电场的期望收益为

$$\begin{aligned} \Pi_E(M) = & w\mu_E - (\alpha - w) \times \\ & \int_0^M (M - x)f(x) dx + \\ & \beta \int_Q^T (x - C)f(x) dx + (1 - \phi) s\mu_E \end{aligned} \quad (11)$$

其中前3项与式(9)相同,第4项表示风电场从政府补贴政策中获得的收益。

电网公司期望收益函数为

$$\Pi_G(M) = (p - w)\mu_C - \gamma\Delta + \phi s\mu_E \quad (12)$$

其中前两项与式(10)相同,第3项表示电网公司从政府补贴政策中获得的收益。

**定理4** 存在政府补贴的预测承诺供给合同中,系统成员的最优决策满足

$$\begin{aligned} F(C^*) = & \frac{w + (1 - \phi)s - \beta}{\alpha + (1 - \phi)s - \beta} \\ \int_{M^*}^{C^*} F(x) dx = & \frac{p + \phi s - w}{2\gamma} \end{aligned}$$

社会总福利函数为

$$\begin{aligned} \Pi_S(\phi) = & \Pi_E + \Pi_G - \Pi_Z \\ = & p\mu_E - (p - \alpha) \times \\ & \int_0^M (M - x)f(x) dx + \\ & \beta \int_C^T (x - C)f(x) dx - \gamma\Delta \end{aligned}$$

其中第1项表示风电产生的总收益;第2项表示购电产生的损失;第3项表示多余电量在现货交易市场上获得的收益;第4项表示电网公司因供电量波动产生的损失。

从政府采取补贴策略的视角,有如下定理。

**定理5** 在预测承诺供给合同中,考虑社会总福利最大化,政府的补贴策略为  $\phi = 0$ 。

上述定理的直观解释为,政府应该将全部的补贴提供给风电场,这样做有助于提高社会总福利。

**推论1** 当政府将补贴全部给风电场时,系统成员的最优决策满足

$$\begin{aligned} F(C^*) = & \frac{w + s - \beta}{\alpha + s - \beta} \\ \int_{M^*}^{C^*} F(x) dx = & \frac{p - w}{2\gamma} \end{aligned}$$

上述推论的直观解释为,当政府补贴全部提供给风电场,给定每少供给1度电量的罚金  $\alpha - w$  不变,降低风电场每少卖出1单位电量的机会成本,可以激励风电场增加承诺供电量,间接地激励电网公司提高承诺采购量,最终能够增加社会总福利。

## 4 敏感性分析

分别给定固定供给合同 GD 和预测承诺供给合同 YC,已得出风电场和电网公司的最优决策,接下来,回答的问题是:

1) 电量现货交易市场的风电交易价格和电网公司风险态度的变动,对成员的收益和系统运作指标的影响。

2) 在预测承诺供给合同 GD 中,分析政府补贴提供给不同成员时,社会总福利及系统运作指标的相对变化情况。

### 4.1 收益和运作指标的敏感性分析

在不存在政府补贴时,对比两种合同中的系统运作指标,可得:

**结论1** 1)  $\tau_{GD} = \tau_{YC}$ ; 2)  $\lambda_{GD} = \lambda_{YC}$ 。

上述结论的直观解释为,相对于固定供给合同 GD,预测承诺供给合同 YC 所带来的系统运作柔性,降低了在电量现货交易市场中的买卖电量比例;但是,由于两类合同中,电网公司所承诺的最大采购量相等,因此,采用预测承诺供给合同,没有降低弃风率。

**结论2** 在不存在政府补贴的风电入网合同中,单位电卖出价格  $\alpha$ 、单位电买入价格  $\beta$  和方差的规避程度  $\gamma$  对风电场、电网公司、系统总收益,以及系统运作指标的影响见表1。

表 1 成员收益和系统运作指标的敏感性分析

Table 1 Sensitivity analysis of profits and operations indexes

参数	指标									
	$\Pi_E$		$\Pi_G$		$\Pi_E + \Pi_G$		$1 - \tau$		$\lambda$	
	GD	YC	GD	YC	GD	YC	GD	YC	GD	YC
$\alpha$	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-
$\beta$	+	+	-	-	+	+	+	+	-	-
$\gamma$	×	-	×	+	×	+	×	×	×	+

注：“-”表示成员收益或系统运作指标为相应参数的递减函数，“+”表示该函数的增函数，“×”表示在对应合同中没有相应的参数。

从上表可以看出,当单位电量买入价格  $\alpha$  和单位电量卖出价格  $\beta$  增加时,成员收益和运作指标在两种合同下的变化情况是相同的。

以下两点说明参数  $\alpha$  和  $\beta$  对风电场的影响过程在两种合同形式下是相同的:

1) 在固定供给合同 GD 中,电网公司并不参与决策,其收益变化随风电场的决策而变化。

2) 在预测承诺供给合同 YC 中, $\alpha$  和  $\beta$  并不直接影响电网公司的承诺采购量  $C$  的决策,换言之,当  $\alpha$  或  $\beta$  发生变化时,若风电场的承诺供给量决策  $M$  保持不变,则电网公司的最优策略保持不变。

由于在固定供给合同 GD 中,电网公司不参与决策,只是反映风电场的决策变化,故下文敏感性分析中以预测承诺供给合同 YC 下的情况为例。

在固定供给合同 GD 中的敏感性分析与其类似,在此不做赘述。

在预测承诺供给合同 YC 中,成员收益关于系统参数的敏感性解释如下:

1) 随着单位电量买入价格  $\alpha$  的增加,从风电场的视角,导致风电场的供电成本提高。因此,为了规避潜在的损失,风电场有动机减少承诺供给量  $M$ 。从电网公司的视角,风电场减少承诺供给量  $M$  的决策,会降低潜在的期望收入,并放大供电量的波动性  $\Delta$ ,因此,为了减少损失,电网公司需要作出降低承诺采购量  $C$  的决策。显然,此时,系统的总收益总是减少。

2) 随着单位电量卖出价格  $\beta$  的增加,从风电

场的视角,可以通过增加剩余电量的比例,即降低承诺供给量  $M$ ,增加自身的收益。从电网公司的视角,风电场降低承诺供给量  $M$  的决策,会降低电网的潜在期望收入,并放大供电量的波动性  $\Delta$ ,为了减少损失,电网公司需要作出降低承诺采购量  $C$  的决策。从系统总收益的视角,变化趋势与方差的规避度  $\gamma$  有关,当  $\gamma$  较大,即电网公司对供电波动性敏感度较高时,系统总收益减小;反之,系统总收益增加。

3) 随着规避度  $\gamma$  的增加,迫使风电场增加承诺供给量  $M$ ,由于电网公司的承诺采购量  $C$  保持不变,因此,系统的总收益增加,也就是说,从总收益最大化的视角,固定承诺供给合同 GD 总是优于预测承诺供给合同 YC。

在预测承诺供给合同 YC 中,系统运作指标关于参数的敏感性解释为:随着  $\alpha$  或  $\beta$  的增加,都会增加弃风率  $1 - \tau$ ,同时减少电网公司所采购的风电额度占风电场期望发电额度的比例  $\lambda$ ,亦即减少风电场对电量现货交易市场的依赖程度。也就是说,需要设定一个合理的系统参数,平衡系统中的弃风率和对电量现货交易市场的依赖程度。而  $\gamma$  的变化不影响弃风率,但是,随着  $\gamma$  的增加,会提升系统对电量现货交易市场的依赖程度。

#### 4.2 政府补贴政策分析

结论 3 在存在政府补贴的风电上网合同中,政府只补贴风电场,单位补贴电价  $s$  的变化对风电场、电网公司、系统总收益,以及系统运作指标的影响见表 2。

表 2 政府补贴提供给风电场的敏感性分析

Table 2 Sensitivity analysis of government subsidy for the wind power plant

参数	指标									
	$\Pi_E$		$\Pi_G$		$\Pi_E + \Pi_G$		$1 - \tau$		$\lambda$	
	GD	YC	GD	YC	GD	YC	GD	YC	GD	YC
$s$	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+

注：“-”表示成员收益或系统运作指标为相应参数的递减函数，“+”表示该参数的增函数。

在结论2中已经指出,面对供应波动,固定供给合同GD中风电场的决策响应机制,与预测承诺供给合同YC中风电场的决策响应机制是相同的.故下文仅以预测承诺供给合同YC中的政府补贴情况为例进行敏感性分析.

考虑政府对风电场进行电价补贴,成员收益关于补贴电价 $s$ 的敏感性解释如下.

1) 随着补贴电价 $s$ 的增加,从风电场和电网公司的视角,政府补贴是一笔额外的收益,因此,无论对风电场还是电网公司来说,其收益都是增加的.

2) 随着补贴电价 $s$ 的增加,从政府的视角,进行补贴是财政负担,故希望能够创造额外的收益,社会总福利是风电场和电网公司的总收益减去政府补贴.当政府对风电场进行补贴时,社会总福利是帕累托改进的.

3) 随着补贴电价 $s$ 增加,对风电场进行补贴能够减小弃风率 $1-\tau$ ,但同时会提升系统对电量现货交易市场的依赖度 $\lambda$ ,因此,进行补贴的同时需要进一步完善风电现货交易市场.

## 5 结束语

风电场将风能资源转化为电能,在和电网公司缔结供给合同时需要考虑风电本身的波动风险.由于现阶段不能对风能的波动性进行有效地控制,本文假设电网公司总可以为风电场的承诺的供给量进行配额,并且存在一个电量现货交易市场,能对供给进行调节.研究了两种风电上网合同:固定供给合同和预测承诺供给合同.首先,分析了风电场和电网公司采用固定供给合同和预测

承诺供给合同时的成员最优决策.从系统收益最大化的角度来看,固定供给合同具有一定的优势.但是风险分配的角度来说,风电场会更加偏向预测承诺供给合同.相对于签订固定供给合同来说,风电场可以通过预测承诺供给合同将一部分电量波动风险转移给电网公司,同时减少了风电场对电量现货交易市场的依赖性,增加了系统柔性.进一步的分析表明,在预测承诺供给合同中,当电网公司的风险规避系数趋于无穷时,该合同就蜕变成了固定供给合同.这在一定程度上解释了两种合同机制下弃风率相同的原因.其次,从系统参数的敏感性分析结果得出,电量现货交易市场买入和卖出价格的变化对风电场及电网公司的收益和系统运作指标的影响.由于固定供给合同可以看成预测承诺供给合同的特例,因此,两种合同在敏感性分析时的反应机理和结果具有高度的一致性.文中以预测承诺合同为例,解释了电网公司和风电场面对电量现货交易市场的买入和卖出价格变化时最优决策的变化情况及其影响.结果表明,由于风电场优先决策,因此,当面对供应波动性时,具有先发优势,电网公司的决策只能跟随风电场的决策变化,尤其是在固定供给合同中,电网公司只能被动地接受风电场的调整结果.最后,本文分析了政府提供补贴时的最优策略和对成员最优决策及结果的影响,得出,在两种合同形式下,从收益的角度分析,政府将风电并网补贴供给风电场是较优的,不仅增加了系统成员的收益,而且增加了社会总福利,该补贴策略是帕累托的.但从系统运作指标的角度分析,补贴给风电场虽然减少了弃风率,却增加了系统对电量现货交易市场的依赖性.

## 参考文献:

- [1]Green R J, Newbery D M. Competition in the british electricity spot market [J]. The Journal of Industrial Economics, 1992, 100(5): 929-953.
- [2]Green R. Increasing competition in the british electricity spot market [J]. The Journal of Industrial Economics, 1996, 44(2): 205-216.
- [3]Tsay A A, Lovejoy W S. Quantity flexibility contracts and supply chain performance [J]. Manufacturing & Service Operations Management, 1999, 1(2): 89-111.
- [4]Durango-Cohen E J, Yano C A. Supplier commitment and production decisions under a forecast-commitment contract [J]. Management Science, 2006, 52(1): 54-67.
- [5]Durango-Cohen E J, Yano C A. Optimizing customer forecasts for forecast-commitment contracts [J]. Production and Opera-

- tions Management Society ,2011 ,20( 5) : 681 – 698.
- [6] 蒋东荣, 刘学军, 李群湛. 电力市场环境下的电网日发电计划的电量经济分配策略[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24( 7) : 90 – 94.  
Jiang Dongrong , Liu Xuejun , Li Qunzhan. Economically distributing strategies for daily generation scheduling in a power system under power market environment [J]. Proceedings of the CSEE , 2004 , 24( 7) : 90 – 94. ( in Chinese)
- [7] 王丽梅, 姚 忠, 刘 鲁. 现货供应不确定下的优化采购策略研究[J]. 管理科学学报, 2011, 14( 4) : 24 – 35.  
Wang Limei , Yao Zhong , Liu Lu. Dual sourcing optimal procurement policy under spotmarket supply uncertainty [J]. Journal of Management Sciences in China , 2011 , 14( 4) : 24 – 35. ( in Chinese)
- [8] Liu S H , So K C , Zhang F Q. Effect of Supply reliability in a retail setting with joint marketing and inventory decisions [J]. Manufacturing & Service Operations Management , 2010 , 12( 1) : 19 – 32.
- [9] Korpaas M , Holen A T , Hildrum D. Operation and sizing of energy storage for wind power plants in a market system [J]. Electrical Power and Energy Systems , 2003 , 25( 8) : 599 – 606.
- [10] Kim J H , Powell W B. An hour-ahead prediction model for heavy-tailed spot prices [J]. Energy Economics , 2011 , 33( 6) : 1252 – 1266.
- [11] Wu Q Q , Babich V. Unit-contingent power purchase agreement and asymmetric information about plant outage [J]. Manufacturing & Service Operations Management , 2012 , 14( 2) : 245 – 261.
- [12] Wu Q Q , Kapuscinski R. Curtailing intermittent generation in electrical systems [J]. Manufacturing & Service Operations Management , 2013 , 15( 4) : 578.
- [13] Boyle G. 可再生能源与电网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.  
Boyle G. Renewable Electricity and the Grid [M]. Beijing: China Electric Power Press , 2011. ( in Chinese)

## Forecast-commitment contract of wind power integration

LI Juan<sup>1</sup> , LI Long<sup>1</sup> , QU Hui<sup>1</sup> , XUE Wei-li<sup>2</sup>

1. School of Management and Engineering , Nanjing University , Nanjing 210093 , China;

2. School of Economics & Management , Southeast University , Nanjing 210096 , China

**Abstract:** Assuming that there exists an electricity spot market , the contract between one wind power plant and one power grid company is studied. To effectively manage the fluctuation of the wind power supply , both the fixed supply contract and the forecast-commitment supply contract , where the latter transfers part of the supply fluctuation risk from the wind power plant to the power grid company , are studied; this reduces the dependence of the wind power plant on the electricity spot market. The optimal decisions of the wind power plant and the power grid company , as well as the sensitivity of the optimal decisions and profits to the spot market price and the risk attitudes are discussed. Finally , how the government subsidy policy affects the members' decisions is analyzed and the conclusion is that to provide the subsidy to the wind power plant is always better and a Pareto improvement from the perspective of social welfare maximization. Providing the subsidy to the wind power plant can reduce the rate of the abandoning wind , and increase the dependence of the wind power plant on the electricity spot market.

**key words:** wind power; fixed supply contract; forecast-commitment supply contract; risk aversion; government subsidy

附录:

A1 定理 1 的证明

在固定供给合同 GD 中, 风电场的收益函数为

$$\begin{aligned} \Pi_E(Q) &= w\mu_E - (\alpha - w) \int_0^Q (Q - x)f(x) dx + \\ &\beta \int_Q^T (x - Q)f(x) dx \end{aligned}$$

求  $\Pi_E(Q)$  关于  $Q$  的一阶、二阶导数

$$\frac{d\Pi_E}{dQ} = w - \beta - (\alpha - \beta) F(Q)$$

$$\frac{d^2\Pi_E}{dQ^2} = -(\alpha - \beta)f(Q) < 0$$

可得风电场的最优决策为  $F(Q^*) = \frac{w - \beta}{\alpha - \beta}$

**A2 引理 1 的证明**

采取反证法, 在不存在政府补贴的预测承诺供给合同 YC 中, 给定风电场的承诺供电量  $M$ , 若电网公司的承诺购电量  $C < M$ , 可得风电场和电网公司间的成交电量的期望为

$$\mu_E = E \min\{x, M\} = M - \int_0^M F(x) dx$$

电网公司向用户提供电量的期望为

$$\mu_C = E(\max\{C, \min\{x, M\}\}) = M - \int_C^M F(x) dx$$

电网公司向用户提供的电量方差为

$$\Delta = E(\max\{C, \min\{x, M\}\})^2 - \mu_C^2 = 2 \int_C^M (M - x) F(x) dx - (\int_C^M F(x) dx)^2$$

则, 电网公司期望收益函数为

$$\Pi_C(C) = (p - w)\mu_C - \gamma\Delta$$

当  $C < M$  时, 电网公司最大化自身收益, 对  $\Pi_C(C) = (p - w)\mu_C - \gamma\Delta$  关于决策变量  $C$  进行求导可得

$$\frac{d\Pi_C}{dC} = p - w + 2\gamma \int_C^M (1 - F(x)) F(x) dx > 0$$

即当  $C < M$  时, 电网公司的收益随着承诺采购量  $C$  递增, 电网公司的最优决策满足  $C^* = M$ , 即  $\Pi_C(C) |_{C < M} \leq \Pi_C(C^*) |_{C \leq M} = \Pi_C(M)$

当  $C \geq M$  时, 易得  $\Pi_C(C) |_{C \geq M} \geq \Pi_C(M)$ .

综上可得  $\Pi_C(C) |_{C < M} \leq \Pi_C(C^*) |_{C \geq M}$ , 即 给定风电场的决策  $M$ , 电网公司的最优决策总满足  $C \geq M$ .

**A3 定理 3 证明**

在不存在政府补贴的预测承诺供给合同中, 采取逆序法求解, 首先, 给定风电场的决策  $M$ , 电网公司决策  $C$  最大化其收益函数为  $\Pi_C(C) = (p - w)\mu_C - \gamma\Delta$ , 可得

$$\frac{d\Pi_C}{dC} = p - w - 2\gamma(1 - F(C)) \int_M^C (1 - F(x)) dx$$

令  $\frac{d\Pi_C}{dC} = 0$  可得  $C$  关于  $M$  的隐函数  $\int_M^C (1 - F(x)) dx =$

$$\frac{p - w}{2\gamma}$$
 对上述隐函数求全微分, 可得  $\frac{\partial C}{\partial M} = \frac{F(M)}{F(C)} > 0$ .

其次, 风电场的收益函数为

$$\Pi_E(M) = w\mu_E - (\alpha - w) \int_0^M (M - x)f(x) dx + \beta \int_0^T (x - C)f(x) dx$$

依复合函数链式求导法, 风电场的收益函数关于决策变量  $M$  的一阶导数满足

$$\frac{d\Pi_E(M)}{dM} = (\beta - \alpha + \frac{w - \alpha}{F(C)})F(M)$$

易得风电场的收益函数  $\Pi_E(M)$  关于决策变量  $M$  的一阶导数在正半轴上只有一个零点, 可得风电场在  $\frac{d\Pi_E(M)}{dM} = 0$  时

收益最大, 即有

$$F(C^*) = \frac{w - \beta}{\alpha - \beta}$$

$$\int_{M^*}^{C^*} F(x) dx = \frac{p - w}{2\gamma}$$

**A4 定理 5 证明**

对于电网公司和风电场的最优反映决策, 政府从社会福利最大化的角度考虑, 即考虑

$$\max_{\phi} \Pi_S(\phi) | (C^*, M^*) = \max_{\phi} \left\{ p\mu_E^* - (p - \alpha) \int_0^{M^*} (M^* - x) \times f(x) dx + \beta \int_{C^*}^T (x - C^*)f(x) dx - \gamma\Delta \right\}$$

对上述公式求一阶导数可得  $\frac{d\Pi_S(\phi)}{d\phi} < 0$ .

于是, 当  $\phi = 0$  时, 社会福利达到最大, 即对于政府来说, 将补贴都给风电场是较好的选择.

**A5 结论 1 证明**

在该结论的证明中, 固定合同下的过程较为简单且和预测承诺合同下的证明过程一致, 故下文以预测承诺合同下的参数敏感性分析为例.

在不存在政府补贴的固定供给合同 GD 中, 弃风率为

$$1 - \tau_{GD} = \frac{\int_{Q^*}^T (1 - F(x)) dx}{\int_0^T (1 - F(x)) dx}$$
 电量现货交易市场的参与

$$\text{度 } \lambda_{GD} = \frac{\int_0^{Q^*} F(x) dx}{Q^*}.$$

在不存在政府补贴的预测承诺供给合同 YC 中, 弃风

$$\text{率为 } 1 - \tau_{YC} = \frac{\int_{C^*}^T (1 - F(x)) dx}{\int_0^T (1 - F(x)) dx}$$
 电量现货交易市场的

$$\text{参与度 } \lambda_{YC} = \frac{\int_0^{M^*} F(x) dx}{\int_0^{C^*} (1 - F(x)) dx + \int_0^{M^*} F(x) dx}.$$

由定理 1 和定理 3 可得  $M^* < C^* = Q^*$ , 于是有  $\tau_{GD} = \tau_{YC}$ ,  $\lambda_{GD} > \lambda_{YC}$ .

**A6 结论 2 的证明**

在该结论的证明中, 固定合同下的过程较为简单且和预测承诺合同下的证明过程一致, 故下文以预测承诺合同下的参数敏感性分析为例.

$$\text{由定理 3 可得 } \frac{dC^*}{d\alpha} = - \frac{w - \beta}{(\alpha - \beta)^2 f(C^*)} < 0,$$

$M^* \frac{dM^*}{d\alpha} = C^* \frac{dC^*}{d\alpha}$ ; 将定理 3 的最优解代入风电场收益函数可得其最优收益函数满足

$$\frac{d\Pi_E}{d\alpha} = - \int_0^{M^*} F(x) dx < 0$$

将定理 3 的最优解代入电网公司的收益函数可得其最优收益函数满足

$$\frac{d\Pi_G}{d\alpha} = (p - w) \frac{dC^*}{d\alpha} - 2\gamma \frac{dC^*}{d\alpha} \times \int_{M^*}^{C^*} (F(x) - F(C^*)) dx < 0$$

于是有  $\frac{d(\Pi_E + \Pi_G)}{d\alpha} < 0$ .

由定理 3 可得  $\frac{dC^*}{d\beta} = - \frac{w - \alpha}{(\alpha - \beta)^2 f(C^*)} < 0$ ,

$M^* \frac{dM^*}{d\beta} = C^* \frac{dC^*}{d\beta}$ . 将定理 3 的最优解代入风电场收益函数可得其最优收益函数满足

$$\frac{d\Pi_E}{d\beta} = - \int_{C^*}^T (1 - F(x)) dx < 0$$

将定理 3 的最优解代入电网公司的收益函数可得其最优收益函数满足

$$\frac{d\Pi_G}{d\beta} = (p - w) \frac{dC^*}{d\beta} - 2\gamma \frac{dC^*}{d\beta} \times \int_{M^*}^{C^*} (F(x) - F(C^*)) dx < 0$$

于是有  $\frac{d(\Pi_E + \Pi_G)}{d\beta} = \int_{C^*}^T (1 - F(x)) dx + 2\gamma \frac{dC^*}{d\beta} \times$

$$\int_{M^*}^{C^*} (F(x) - F(C^*)) dx.$$

由定理 3 可得  $\frac{dC^*}{d\gamma} = 0$ ,  $M^* \frac{dM^*}{d\gamma} = \frac{p - w}{2\gamma^2}$ . 将定理

3 的最优解代入风电场收益函数可得其最优收益函数满足

$$\frac{d\Pi_E}{d\gamma} = - (\alpha - w) \frac{p - w}{2\gamma^2} < 0$$

将定理 3 的最优解代入电网公司的收益函数可得其最优收益函数满足

$$\frac{d\Pi_G}{d\gamma} = \frac{(p - w)^2}{2\gamma^2} + \frac{p - w}{\gamma} \int_{M^*}^{C^*} (1 - F(x)) dx > 0$$

结合附录 A4 和附录 A5 可得

$$\frac{d(1 - \tau_{YC})}{dC^*} = - \frac{(1 - F(C^*))}{\int_0^T (1 - F(x)) dx} < 0$$

$$\frac{d(1 - \tau_{YC})}{d\alpha} = \frac{d(1 - \tau_{YC})}{dC^*} \frac{dC^*}{d\alpha} > 0$$

$$\frac{d(1 - \tau_{YC})}{d\beta} = \frac{d(1 - \tau_{YC})}{dC^*} \frac{dC^*}{d\beta} > 0$$

$$\frac{d(1 - \tau_{YC})}{d\gamma} = \frac{d(1 - \tau_{YC})}{dC^*} \frac{dC^*}{d\gamma} = 0$$

$$\frac{d\lambda_{YC}}{d\alpha} = \frac{\int_{M^*}^{C^*} (1 - F(x)) F(C^*) dx + \int_0^{M^*} (F(C^*) - F(x)) dx}{\left(C^* - \int_{M^*}^{C^*} F(x) dx\right)^2} \times \frac{dC^*}{d\alpha} < 0$$

$$\frac{d\lambda_{YC}}{d\beta} = \frac{\int_{M^*}^{C^*} (1 - F(x)) F(C^*) dx + \int_0^{M^*} (F(C^*) - F(x)) dx}{\left(C^* - \int_{M^*}^{C^*} F(x) dx\right)^2} \times \frac{dC^*}{d\beta} < 0$$

$$\frac{d(1 - \tau_{YC})}{d\gamma} = \frac{(p - w) \int_0^{M^*} (1 - F(x)) dx}{2\gamma^2 \left(C^* - \int_{M^*}^{C^*} F(x) dx\right)^2} > 0$$

### A7 结论 3 的证明

补贴给风电场 考虑帕累托效用时需要除去政府的补贴部分

$$\Pi_S(s) |_{\phi=0} = \Pi_E + \Pi_G - \Pi_Z = p\mu_E - (p - \alpha) \times \int_0^M (M - x)f(x) dx + \beta \int_C^T (x - C)f(x) dx - \gamma\Delta$$

由定理 4 可得

$$\frac{dC^*}{ds} = \frac{1}{(\alpha - \beta)f(C^*)} > 0$$

$$F(M^*) \frac{dM^*}{ds} = F(C^*) \frac{dC^*}{ds}$$

故有

$$\frac{d\Pi_S(s) |_{\phi=0}}{ds} = (p - \beta) C^* - (\alpha - \beta) F(C^*) C^* + 2\gamma \int_{M^*}^{C^*} (1 - F(x)) dx > 0$$

即在分散控制的情况下,政府对风电场的电价补贴是帕累托改进.

补贴给电网公司 考虑帕累托效用时需要除去政府的补贴部分

$$\Pi_S(s) |_{\phi=1} = \Pi_E + \Pi_G - \Pi_Z = p\mu_E - (p - \alpha) \int_0^M (M - x) \times f(x) dx + \beta \int_C^T (x - C)f(x) dx - \gamma\Delta$$

由定理 4 可得

$$\frac{dC^*}{ds} = 0$$

$$F(M^*) \frac{dM^*}{ds} = - \frac{1}{2\gamma}$$

故有

$$\frac{d\Pi_S(s) |_{\phi=1}}{ds} = - \frac{p - \alpha}{2\gamma} - \int_{M^*}^{C^*} (1 - F(x)) dx < 0$$

即在分散控制的情况下,政府对风电场的电价补贴不是帕累托改进.