

惯量和一次调频辅助服务市场机制设计研究


赵晋泉¹, 唐成魁¹, 陈涛¹, 代江²

(1. 教育部海上风电技术工程研究中心(上海电力大学), 上海 200090;
2. 贵州电网有限责任公司电力调度控制中心, 贵阳 550005)

摘要: 高比例新能源电力系统的频率安全面临挑战, 亟需构建有效的惯量和一次调频等安全性辅助服务市场机制。为此, 综述了国内外惯量及一次调频服务市场设计方面的研究成果; 剖析了不同电网场景下的频率安全需求以及各类主体提供惯量与调频服务的物理-成本特性; 提出了惯量和一次调频市场设计的若干原则, 包括平滑过渡性原则、定价机制简单透明原则及费用分摊清晰化原则; 对比分析了电能量、惯量和一次调频联合出清及顺序出清两种模式的差异和优缺点; 最后, 探讨了该领域未来待研究的方向。

关键词: 频率安全; 惯量辅助服务; 一次调频辅助服务; 市场设计原则; 费用分摊

DOI: 10.19585/j.zjdl.202602002

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Research on market mechanism design for inertia ancillary services and PFC services

ZHAO Jinqun¹, TANG Chengkui¹, CHEN Tao¹, DAI Jiang²

(1. Engineering Research Center of Offshore Wind Technology Ministry of Education (Shanghai University of Electric Power), Shanghai 200090, China;

2. Power Dispatching and Control Center of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550005, China)

Abstract: Frequency security in power systems with high-penetration renewable energy faces significant challenges, necessitating effective ancillary service market mechanisms for critical security services such as inertia ancillary services and primary frequency control (PFC) services. This paper comprehensively reviews domestic and international research on market designs for inertia ancillary services and PFC services. It analyzes frequency security requirements across diverse grid scenarios and examines the physical and cost characteristics of various entities providing inertia ancillary service and frequency control services. Principles for designing inertia ancillary service and PFC markets are proposed, including the principle of gradual transition, the principle of simple and transparent pricing mechanisms, and the principle of clear cost allocation. A comparative analysis is conducted on two market clearing models: (1) joint clearing of energy, inertia and PFC, and (2) sequential clearing of energy, inertia and PFC, highlighting their respective differences, advantages, and disadvantages. Finally, future research directions in this field are discussed.

Keywords: frequency security; inertia ancillary service; PFC ancillary service; market design principle; cost allocation

0 引言

随着新能源在电力系统中的渗透率不断提高, 传统同步机组电源占比下降, 导致系统中转动惯量和PFR(一次调频)资源短缺, 大扰动下系统面临较高的频率安全风险^[1-5]。2021年12月, 国家能源局印发的《电力辅助服务管理办法》首次将惯量

和PFR纳入有功平衡电力辅助服务范畴^[6]。当前, 尽管惯量和PFR服务逐渐开始受到重视, 但仍缺乏具备良好过渡性、合理费用分摊和价格激励的市场机制。因此, 开展惯量和PFR服务市场机制研究具有重要意义。

国际上已有多个国家开展了相关市场实践。爱尔兰和北爱尔兰系统运营商于2016年将SIR(同步惯量响应)服务纳入电力辅助服务中^[7], 系统运行商依据SIR可用容量、机组所在区位以及服务时段的惯量稀缺程度向参与辅助服务的机组支付费用, 通过市场激励的手段提升电网的惯量水平。

基金项目: 国家自然科学基金(51577049); 中国南方电网有限责任公司科技项目(GZKJXM20222444)

自2019年起,英国国家电网电力系统运营商开展了“稳定路径探索项目”,利用市场化手段采购惯量辅助服务,以解决惯量短缺带来的频率安全稳定性问题^[8]。项目已完成3期:第一期为市场化采购惯量服务,面向同步调相机和愿意在同步调相机模式下运行的同步发电机;第二期扩大了采购服务品种,除惯量服务外,还采购了短路容量服务(即暂态电压支撑服务);第三期增加了提供惯量服务的构网型变流器^[9-10]。2021年澳大利亚能源市场委员会开展惯量服务市场设计的探索^[11],提出嵌入日前现货电能量市场的旋转惯量辅助服务市场机制,采用边际惯量机组/调相机的报价作为惯量结算价格,具备良好的价格引导性、可解释性和透明性。

本文首先介绍了近年来国内外惯量和PFR服务市场设计方面的研究成果;其次,分析电网的频率安全需求与频率安全约束表达;接着,探讨常规机组、调相机和储能等不同主体的惯量和调频物理-成本特性;随后,提出惯量和PFR市场设计的若干原则;进而,对比分析惯量和电能量联合出清模式和顺序出清模式的差异和优缺点;最后,对该领域未来研究方向进行展望。

1 国内外相关学术研究成果

国内外学者针对惯量和PFR辅助服务的市场出清开展了大量研究。从时间脉络可划分为两个阶段:前期为多类型调频备用服务市场研究阶段;后期为惯量和PFR服务市场研究阶段。

2005年,加拿大学者GALIANA等^[12-13]提出电能量与PFR、二次调频和三次调频服务的联合出清定价机制。将传统SCUC(安全约束机组组合)模型中的备用,根据故障响应时序不同细化为上/下PFR备用、上/下二次调频备用和上/下三次调频备用,三者存在重叠关系,其中一次备用和三次备用与故障相关联,而二次调频备用与故障无关。模型同时考虑基态电网和包括功率不平衡故障及线路开断故障的预想故障集下,故障前、PFR阶段、二次调频和三次调频阶段的直流潮流安全约束。模型引入仅与PFR备用相关联的故障后FSS(准稳态频率)约束,目标函数中每种备用都有独立的成本(报价)函数。优化出清后产生考

虑安全的节点电能量价格,采用对偶乘子定价机制,由所有一次备用、二次备用和三次备用约束的对偶乘子之和构成“节点安全价格”作为节点电能量价格的一部分,但未单独计算和补偿。该文的不足之处在于忽视了系统惯量对于频率稳定的重要性,未考虑RoCoF(频率变化率)和频率最低点约束。

爱尔兰学者首次在出清模型中引入RoCoF约束和频率最低点约束^[14],未将惯量作为发电机的参数,而是采用了“机组动能”这一参数,仅考虑PFR备用,RoCoF约束则是关于机组动能的线性约束。为处理频率最低点约束的高度非线性问题,该论文通过离线计算拟合得到关于“机组动能”和“PFR备用”的5分段线性化等值约束,所考虑的故障集为各发电机跳机导致的功率缺额故障,从而将系统级的频率安全约束转化为 N 个机组级频率安全约束。该论文设计PFR备用单独报价,优化出清后产生的PFR备用和机组动能价格基于对偶乘子定价机制,PFR备用的价格由所有发电机5段频率最低点约束对偶乘子与系数之积求和构成。机组动能价格在此基础上增加RoCoF约束对偶乘子项。然而,该论文给出的定价公式未考虑众多起作用不等式约束对偶乘子,理论依据不足。同时,忽视了机组动能的离散特性和约束的不等式特性会造成对偶乘子为0,不能产生合理价格信号。

文献[15-16]提出了一种计及发电侧PFR服务与负荷侧FRR(快速频率响应)服务的PFR市场机制,构建其联合出清模型。该模型不涉及频率安全约束,仅通过等效比折算因子实现将FRR折算为PFR。PFR出清价格通过PFR需求约束与系统频率响应需求约束对偶乘子计算得到。

2014年,美国NREL实验室的ELA等^[17-18]首次在模型中引入基于惯量表达的RoCoF约束,并基于频率最低点约束、FSS约束和恢复时间约束等构建了4个关于PFR的不等式约束和2个关于避免恢复过程反复和振荡现象的启发式规则,将PFR备用细分为PFR全容量、频率最低点时刻PFR、FSS时刻PFR,并将二次调频备用细分为旋转和非旋转,基于起作用约束的对偶乘子值,给出这5个服务的价格和补偿方法。该论文指出由

于惯量的离散特性使得其定价困难(对偶乘子为 0), 需要启动新的 SCUC 计算, 使惯量变成连续变量以获得相应的对偶乘子值。

文献[19–22]提出了电能量与 PFR、二次调频联合出清定价机制, 构建含多个系统频率安全约束的 SCUC 模型。考虑到系统频率安全约束的复杂非线性特征, 论文基于 L-shape 方法将原问题分解为常规 SCUC 主问题和多个针对不同故障的频率安全校验子问题(本质为 PFR 和二次调频备用充裕性检查), 并通过生成割约束形成闭环。该论文基于对偶乘子定价给出了 PFR 备用和二次调频备用的价格公式, 由于主子问题解耦, 使得价格表达式变得简单。

美国纽约大学 LIANG Z R 等^[23]提出常规机组、新能源和储能惯量与 PFR 服务的联合出清模型, 将复杂的 RoCoF 约束和频率最低点约束转化为简单惯量功率总和不等式约束, 并基于简单约束的对偶乘子分别对常规机组、新能源和储能的备用及惯量进行定价。

瑞士学者在文献[24]中给出常规机组旋转惯量与变流器并网电源虚拟惯量的统一动态模型以及系统频率安全指标的解析表达, 将频率最低点约束转化为关于惯量、PFR 和阻尼等的分段线性化约束, 并提取得到了这些参数的限值。在此基础上, 提出了常规机组与变流器并网电源的惯量和 PFR 服务的联合出清模型, 基于方案树考虑了多个新能源随机场景。该论文并未讨论定价方法。

清华大学的学者在文献[25–26]中提出常规机组与新能源惯量和 PFR 服务的联合出清模型。该模型将复杂的频率最低点约束转化为含有 4 个待拟合参数的分段线性化约束, 并与本身即为线性的 RoCoF 约束和 FSS 约束一起加入模型中。论文指出频率最低点约束线性化处理的分段数越多, 精度越高, 但计算代价越大。目标函数考虑了新能源的 PFR 和惯量报价, 而常规机组仅有电能量报价; 惯量和 PFR 均采用基于对偶乘子的定价机制, 但常规机组和新能源的惯量价格一致, 而 PFR 价格不同。

伦敦帝国学院的 BADESAL 等^[27–29]提出了含新能源的惯量和 PFR 服务的联合出清模型。该模型采用旋转二阶锥公式将频率最低点不等式约束

转化为 3 个等价的等式约束, 并与 FSS 约束和 RoCoF 约束一同置于模型中。采用基于频率安全约束对偶乘子的定价机制, 对新能源和常规机组根据其服务能力机制的差异而采用不同的价格公式。需要说明的是, 约束数学表达的复杂性, 造成价格计算公式非常复杂, 不利于市场的价格引导。文献[30–31]继承了上述思想, 讨论了储能参与惯量和 PFR 服务后的变化。

2 系统频率安全需求与约束

系统频率安全风险评估与“系统可信最大功率缺额故障”密切相关。传统电网设计中, 最大功率缺额故障通常考虑为系统中最大容量发电机(或电厂)退出运行。对我国直流受端电网而言, 单一直流双极闭锁故障导致的功率缺失远大于最大单机(甚至整厂)停运造成的缺额。因此, 通常以最大直流线路输送容量为计算功率缺额基准纳入频率安全要求。在跨区域电网中, 可能需要考虑分区解列故障带来的功率缺额或盈余冲击。为保障系统安全, 需要确保解列后各分区频率稳定, 并建立各分区的频率安全需求表达。图 1 为故障后频率恢复和不同备用响应曲线, 展示了系统在发生大的功率缺额扰动时, 频率受扰恢复与惯量、PFR、二次调频和三次调频支撑演进关系^[11]。

如图 1 所示, 频率安全约束通常包含 RoCoF 约束、频率最低点约束和故障后 FSS 约束。考虑常规机组和构网型储能主体, 本章给出 3 个约束的

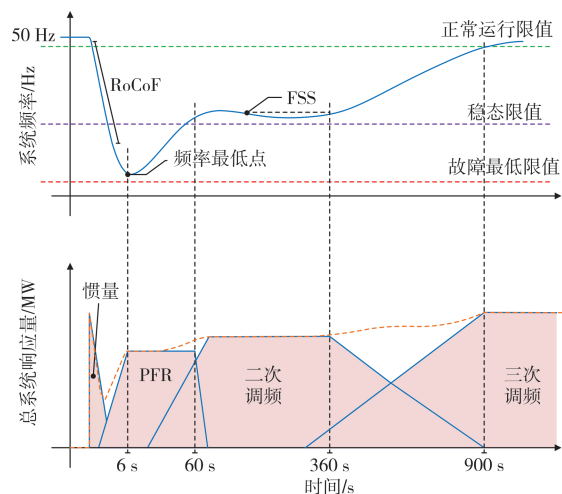


图 1 故障后频率恢复和不同备用响应曲线

Fig.1 Post-fault frequency recovery curve and different reserve response curve

表达式。

2.1 RoCoF约束

RoCoF约束为:

$$\sum_{i=1}^{N_g} u_{i,t} H_{g,i} P_{g,i,\max} + \sum_{i=1}^{N_s} u_{s,i}^1 H_{s,i} P_{s,i,\max} \geq \frac{f_0 P_{\text{loss}}}{2R_{\text{RoCoF},\max}} \quad (1)$$

式中: N_g 和 N_s 分别为常规机组、构网型储能总数; $u_{i,t}$ 为常规机组 i 在 t 时段的启停状态0-1变量, 1代表开机, 0代表停机; $u_{s,i}^1$ 为储能 i 是否提供惯量的0-1决策变量, 1为提供, 0为不提供; $H_{g,i}$ 和 $H_{s,i}$ 分别为常规机组、储能 i 的惯性时间常数^[27]; $P_{g,i,\max}$ 为常规机组 i 的最大有功功率; $P_{s,i,\max}$ 为储能 i 的最大充放电功率; f_0 为系统额定频率; P_{loss} 为最大功率缺额; $R_{\text{RoCoF},\max}$ 为系统最大允许频率变化率。

也可将式(1)写成:

$$\sum_{i=1}^{N_g} u_{i,t} I_{g,i} + \sum_{i=1}^{N_s} u_{s,i}^1 I_{s,i} \geq I_{\min}, I_{\min} = \frac{f_0 P_{\text{loss}}}{2R_{\text{RoCoF},\max}} \quad (2)$$

式中: $I_{g,i}$ 和 $I_{s,i}$ 分别为常规机组惯量、储能惯量, 均为离散变量; 在惯量、PFR和电能联合出清的市场模式下, RoCoF约束一般不会成为起作用的等式约束, 对偶乘子一般为0。

2.2 频率最低点约束

频率最低点约束为^[27]:

$$\sum_{i=1}^{N_g} u_{i,t} I_{g,i} + \sum_{i=1}^{N_s} u_{s,i}^1 I_{s,i} \geq \frac{f_0}{2\Delta f_{\max}} \left(\frac{T_{g,\text{ramp}} \left(\sum_{i=1}^{N_g} R_{s,i,t}^{\text{pfr}} - P_{\text{loss}} \right)^2}{2 \sum_{i=1}^{N_g} R_{g,i,t}^{\text{pfr}}} + T_{g,\text{del}} P_{\text{loss}} - \left(T_{g,\text{del}} - T_{s,\text{del}} - \frac{T_{s,\text{ramp}}}{2} \right) \sum_{i=1}^{N_s} R_{s,i,t}^{\text{pfr}} \right) \quad (3)$$

式中: $R_{s,i,t}^{\text{pfr}}$ 和 $R_{g,i,t}^{\text{pfr}}$ 分别为系统中储能 i 、常规机组 i 在 t 时段提供的PFR备用容量; Δf_{\max} 为发生扰动时系统允许的最大频率偏差; $T_{g,\text{ramp}}$ 和 $T_{g,\text{del}}$ 分别为常规机组PFR完全响应时间、响应延时时间; $T_{s,\text{ramp}}$ 和 $T_{s,\text{del}}$ 分别为储能PFR的完全响应时间、响应延时时间。

将式(3)可简写为:

$$f(I, R^{\text{pfr}}) - B \geq 0 \quad (4)$$

式中: I 和 R^{pfr} 分别为不同主体的惯量常数向量、PFR备用向量; B 为常数。

频率最低点约束为惯量和PFR备用不可分解的非线性约束。惯量和PFR两种不同辅助服务需要联合市场出清的理论基础。同时, 频率最低点约束也是造成出清计算困难和商品定价复杂耦合的本质原因。虽然惯量是离散变量, 但是由于PFR备用是连续变量, 该不等式起作用时等号成立。

2.3 FSS约束

PFR使得系统频率恢复到FSS水平后, 再依靠二次调频和备用等进行调整。需要说明的是, FSS约束仅与PFR容量有关, 在惯量和PFR与电能联合出清的市场模式下, 由于PFR中标值为连续变量, 所以式(5)在优化求解起作用时为等式约束, 对偶乘子不为0。

$$\sum_{i=1}^{N_g} R_{g,i,t}^{\text{pfr}} + \sum_{i=1}^{N_s} R_{s,i,t}^{\text{pfr}} \geq \lambda P_{\text{loss}} \quad (5)$$

式中: λ 为功率缺额比例, 取0.85。

3 不同主体的惯量和PFR特性

3.1 常规机组

常规机组包括火电、水电和核电机组。常规机组的发电和备用服务呈现“互补性耦合特性”, 而其发电和惯量服务则呈现“依存性耦合特性”, 两者特性显著不同。

互补性耦合特性表现为一种资源分配的权衡(可选择和牺牲)关系。机组若选择以全部容量发电, 意味着放弃承担备用服务; 反之, 若承担备用服务, 则需要牺牲部分发电收益。依存性耦合特性源于机组的机械旋转物理特性及最小发电功率运行约束, 表现为一种不可选择和重叠的关系。这使得常规机组在并网运行状态下无法选择仅发电不提供惯量, 或仅提供惯量不发电。这种重叠关系使得常规机组无法将其惯量服务成本与发电成本分离, 即惯量服务成本无法独立核算。正因为如此, 长期以来, 常规机组的惯量服务是义务提供的, 在电力现货市场中仅基于其电能报价与出清。

常规机组在满足最小发电出力约束运行时, 即可提供相应的惯量支撑。因此, 可采用其最小发电功率报价模型来等效量化其惯量服务报价模

型^[9]。常规机组在某个时段内所产生的最小出力费用为机组提供惯量所需的费用，将此费用除以该机组对应的转动惯量后，便得到机组的惯量报价：

$$\rho_{g,i}^1 = \frac{\rho_{g,i,\min} P_{g,i,\min} \Delta T}{H_{g,i} P_{g,i,\max}} \quad (6)$$

式中： $\rho_{g,i}^1$ 为常规机组*i*的惯量报价； $\rho_{g,i,\min}$ 为常规机组*i*的最小电能量报价； $P_{g,i,\min}$ 为常规机组*i*的有功下限值； ΔT 为单时段时长。

该方式可实现与非市场模式平顺接轨。同时，“惯量开机机组”与“电能量开机机组”的收益模型是一致的，激励相容。

常规机组的PFR辅助服务报价为0。原因在于，其PFR备用已包含在总备用容量之中（总备用包含PFR备用、二次调频备用和三次调频备用）。火电机组的发电、惯量和PFR容量关系如图2所示。

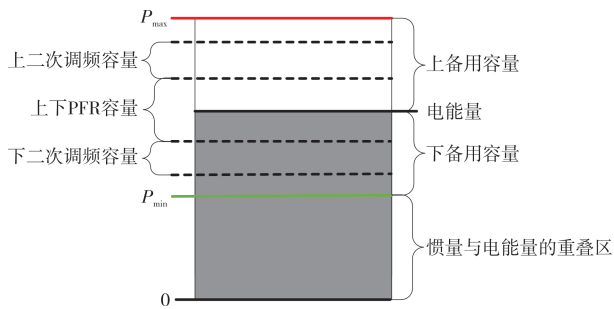


图2 火电机组的发电、惯量和PFR容量关系

Fig.2 Relationship between generation, inertia, and PFR capacity of thermal power units

出于安全运行考虑部分电网的核电机组不参与PFR服务。然而，在新型电力系统背景下，鉴于PFR资源的稀缺性以及核电机组PFR技术能力的提升，未来需考虑核电机组为电网提供PFR服务。虽然水电机组的最小发电功率限制不强，但大量水电机组需满足水利、灌溉、航运、泄洪等综合利用要求所决定的最小发电限制。因此，水电机组的惯量报价可参照火电机组方法处理。

3.2 调相机

调相机(包括退役发电机改造后的调相机)通常可为系统提供惯量和“暂态电压支撑”两种安全性辅助服务，且这两种服务具有“依存性耦合特性”。调相机无法为系统提供PFR服务，且其运行

不受最小发电功率约束限制，这些特性显著区别于常规机组。对于非电网主体拥有的调相机，需要通过上述两种辅助服务得到收益。调相机具有独立的成本模型，主要包括能量消耗成本、启停成本、运行维护成本、投资成本折算和合理收益。因此，调相机可基于其成本模型申报惯量服务价格。

3.3 构网型储能

储能系统可分为构网型和跟网型。构网型储能系统能够提供惯量和PFR辅助服务，通过变流器的虚拟同步构网控制以及在充、放电状态时预留一定的功率空间与SOC(荷电状态)容量，提供惯量和PFR辅助服务^[30]。储能系统的调峰服务、惯量服务和PFR服务三者具有“互补性耦合特性”，即其调峰容量、惯量备用容量和PFR备用容量之和为总物理容量，如图3所示。与火电机组不同，储能系统的调峰、惯量和PFR等服务具备独立的成本模型。因此，可分别进行独立报价并形成独立的价格。其报价主要考虑储能预留容量带来的调峰机会成本损失。

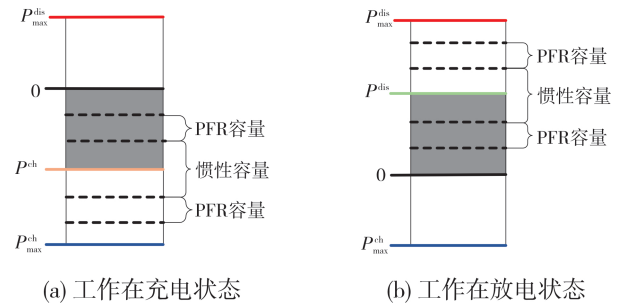


图3 储能系统的调峰容量、惯量和PFR备用容量关系
Fig.3 Relationship between peak shaving capacity, inertia, and PFR reserve capacity of energy storage systems

4 惯量和PFR市场设计的基本原则

针对我国纳入现货市场的惯量和PFR辅助服务市场机制设计，本文提出以下4个原则。

1) 平滑过渡性原则

我国惯量市场机制应确保与“两个细则”补偿机制实现平滑接轨性。这需要深刻理解“两个细则”的内涵：在新能源渗透率较低、系统惯量充裕的场景下，惯量服务既无价格也“无价值”，新能源搭上了火电惯量服务的便车；当新能源渗透率

达到临界值,并挤压火电开机空间,惯量变得稀缺,独立的惯量服务价格和市场价值随之显现,新能源就不能再搭便车,需要分摊惯量服务费用;随着新能源渗透率持续提升,惯量服务的价格和价值随之增大,从而对惯量市场产生正向激励。因此,市场机制设计必须兼容惯量服务“无价值”的场景,并能有效辨识惯量由充裕到稀缺的临界场景;同时,应该避免因少量惯量缺额引发惯量费用激增,导致用户和新能源发电商面临陡变性支出。

平滑过渡性原则同样涵盖现货市场出清模式、模型和优化算法的平滑性过渡。惯量市场和PFR市场应更好地嵌入现有现货市场SCUC预出清、SCED(安全约束经济调度)正式出清的模式中,不宜采用FSC-SCUC(考虑频率安全约束的安全约束机组组合)完全替代现有计算引擎,跳跃式进入新模式。此外,市场设计需要前瞻性地考虑未来可能需要纳入的其他安全性辅助服务。例如,随着常规机组开机空间被挤压,电网暂态电压稳定问题日益突出,需要考虑“暂态电压支撑”等辅助服务获取机制的平滑嵌入。

2)惯量和PFR服务联合出清原则

PFR辅助服务市场出现早于惯量市场,且目前仍然存在独立的PFR市场。然而,受频率安全约束中非线性耦合频率最低点约束影响,惯量和PFR这两种辅助服务实际上不可解耦,并具有一定程度的相互可替代性。因此,需要联合出清才能获得最经济的结果。

3)定价机制简单透明原则

定价机制有“基于频率安全约束对偶乘子定价”和“基于边际机组报价定价”两种。“基于频率安全约束对偶乘子定价”基于RoCoF约束、FSS约束和频率最低点约束及其演化后多个约束的对偶乘子生成惯量和PFR辅助服务价格。然而,惯量本身具有块状离散特性,且频率安全约束多为不等式形式,导致对偶乘子数值呈现随机性,价格计算极其复杂;此外,该价格与市场报价无关,不具备引导性、可解释性和透明性,不利于市场开展。“基于边际机组报价定价”则具备市场开展所需的引导性、可解释性和透明性。作为一类安全性商品,惯量市场和定价机制既需要反映其成

本特性,也需要反映稀缺度和惯量供求关系。惯量与PFR定价应与稀缺度成正相关。

4)费用分摊清晰化原则

新能源发电增长挤压常规机组开机空间是系统惯量稀缺的根本原因。若新能源发电不主动承担惯量和PFR服务,则需将其部分发电收益用于购买其他主体的惯量服务。新能源发电的绿色价值通过绿证市场和碳证价值来体现,不在本文讨论之列。市场机制设计中,常规机组不能同时得到电能量收益和惯量服务收益。对“惯量开机机组”给予惯量服务费用,并确保该费用清晰化且不低于其同等情况下电能量收益,这有利于从“两个细则”到市场的平稳过渡,并形成有效的价格激励。

惯量和PFR费用应由电力用户与新能源发电商分摊。遵循“谁引起、谁承担”的原则,建议各新能源发电商按其上网电量比例来分摊响应费用。惯量和PFR辅助服务的需求源于系统遭受的功率不平衡扰动及其频率安全要求,与新能源无关;而其价值的市场外化是由新能源发电的无惯量特性以及其在系统电量占比上升并挤压火电开机空间引起的,与新能源随机波动特性关联较弱;调峰、二次调频、备用等辅助服务则是由新能源随机波动特性引起的。本文暂不考虑不同新能源主体上网价格的定价方式差异,均视其为现货市场的价格接受者。该分摊方式也可以起到促进跟网型新能源改造为构网型的作用。

5 联合与顺序市场出清模式设计

国内外研究表明,显式地考虑RoCoF约束、频率最低点约束、FSS约束的惯量和PFR辅助服务联合出清与定价是惯量市场机制设计的一般性原则。然而,现有研究大多未能从第一性原理出发给出惯量市场机制设计的基本原则和设计思路。

5.1 电能量和惯量联合市场出清

将3个频率安全约束加入传统SCUC模型中,形成FSC-SCUC问题。目标函数除机组的发电报价和储能的调峰服务报价外,还增加了常规机组的PFR报价以及其他主体的惯量和PFR服务报价。电能量、惯量和PFR服务可实现一次性优化出清,并基于对偶乘子得到各商品的价格。

在求解基于FSC-SCUC的联合出清问题时,频率最低点不等式约束的不同处理方法决定了不同的惯量和PFR定价方式。主要有以下3种方式:

1)基于旋转二阶锥公式的等价转化:将频率最低点约束拆分为3个等值的等式约束,与RoCoF约束、FSS约束一起求解^[28-30]。在此模式下,定价只能基于上述5个频率安全约束的对偶乘子。然而,单一约束的对偶乘子缺乏明确的物理意义,导致惯量和PFR定价函数非常复杂、缺乏透明度,难以有效引导市场行为。

2)频率最低点约束分段拟合:将频率最低点约束分段拟合为多个关于PFR和惯量的线性约束^[23-26]。该方式下,约束虽被彻底分解,但惯量和PFR服务的定价仍只能采用基于对偶乘子的定价机制。其计算公式较方式1大为简化,但透明度依然不足。

3)两阶段:第一阶段进行基于FSC-SCUC的预出清,根据预出清计算结果将起作用的频率最低点约束简单地拆分为惯量需求约束和PFR备用需求约束,再结合RoCoF约束和FSS约束,得到系统最终的惯量需求约束和PFR备用需求约束,从而实现两者的解耦。第二阶段仅将简化后的惯量需求约束和PFR备用需求约束加入SCED模型中优化出清。这种方式属于基于约束转化的联合市场出清模式,其优点在于可将电能量、惯量和PFR等商品独立定价。需要指出的是,在该方式下,采用对偶乘子定价与采用边际机组报价定价在结果上是一致的。

5.2 电能量与惯量、PFR顺序市场出清

基于SCUC的电能量与惯量、PFR顺序市场出清流程分为4个阶段,具体流程如图4所示。阶段1为基于SCUC的日前电能市场预出清,此阶段不考虑系统频率安全约束,与我国现行现货市场机制完全相同。阶段2针对阶段1的预出清结果进行系统频率安全校验。若所有时段均满足频率安全要求则表明惯量和PFR容量充裕,无需额外采购。此时,惯量由义务主体提供,不产生惯量价格及费用。若存在时段不满足频率安全要求,表明惯量或PFR容量不足,则进入阶段3。阶段3为惯量和PFR辅助服务市场出清阶段,考虑频率安全约束进行惯量与PFR采购,为缺额采购。该阶

段旨在弥补阶段2识别出的容量缺额,得到常规机组新增开机结果、储能的惯量和PFR中标结果。阶段4为基于SCED的日前电能量市场正式出清阶段,在阶段1和阶段3得到的常规机组开机方式及储能惯量和PFR辅助服务中标结果基础上,进行电能量市场正式出清优化计算。

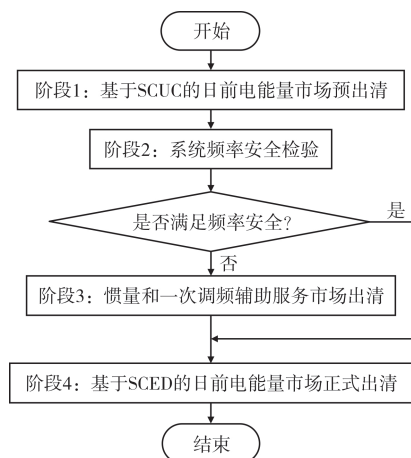


图4 电能量与惯量、PFR顺序市场出清流程

Fig.4 Sequential market clearing process of energy, inertia and PFR

5.3 两种出清模式的比较

采用电能量、惯量和PFR联合出清模式时,难以清晰界定系统惯量稀缺的临界状态。该模式下,常规机组同时获取电能量收益和惯量收益,且其惯量收益与系统实际惯量稀缺程度缺乏强关联。这阻碍了惯量服务从现行“两个细则”补偿机制向市场机制的平滑过渡。该模式对技术要求高且升级困难,需要采用FSC-SCUC替代现有SCUC计算引擎,若未来考虑因“暂态电压支撑”辅助服务而新增开机,则仍需对计算引擎跨越式升级,不利于市场平稳过渡。总之,联合出清机制下黑匣子式的出清模式透明性不足。

电能量与惯量、PFR顺序出清模式能够清晰界定系统惯量稀缺的临界状态,并可针对惯量和PFR缺额来构建市场,从而界定“惯量开机机组”和“电能量开机机组”。该模式可无缝嵌入我国现行现货电能量市场框架。若未来需考虑因“暂态电压支撑”辅助服务而新增开机,只需要在图4所示流程的阶段2(系统频率安全检验)后嵌入“暂态电压安全检查模块”和“暂态电压支撑辅助服务获取模块”即可,从而实现市场的平稳过渡。

6 若干相关问题

本文认为该领域仍需要研究的问题有:

1)我国正在建立调峰、二次调频、备用和爬坡等有功平衡性辅助服务的市场机制,计划先建立现货电能量市场的顺序出清机制,待具备条件时与现货市场联合出清。同时,我国国网和南网均积极开展惯量市场机制研究。惯量和PFR市场机制与现货市场及有功平衡性辅助服务市场机制密不可分。因此,建议先建立惯量和PFR与现货市场的顺序出清机制,待条件成熟时再考虑建立与现货市场和有功平衡性辅助服务市场的联合出清模式。具体而言,建立联合模式需要大电网FSC-SCUC计算引擎的鲁棒性和有效性得到充分验证,市场主体能够充分接受基于对偶乘子的定价机制,并建立合理的费用分摊机制。

2)惯量和PFR安全性辅助服务市场与二次调频、备用这两个已经建立的有功平衡类辅助服务市场之间的衔接关系。简言之,它们之间基本互不影响。二次调频、备用与惯量、PFR的时间尺度不同,调用机制不同,具有可解耦性。但是,由于常规机组PFR、二次调频和三次调频备用容量具有包含关系,其费用补偿需避免重复计算,具体定价和补偿机制有待深入研究^[32-35]。

3)开展惯量和PFR辅助服务市场机制评估指标的研究^[11]。建议从惯量出清结果的有效性、惯量价格信号的透明性、价格信号引导的有效性、惯量费用的稀缺关联性、费用分摊的合理性等角度设立评价指标,对不同市场机制设计进行前评估与后评估。

4)前瞻性地考虑未来新增的“暂态电压支撑”辅助服务,并研究如何将其平滑地嵌入考虑惯量和PFR辅助服务的现货市场机制。需要指出的是,暂态电压支撑辅助服务不适宜于采用市场机制,而更适合采用调度补偿机制。然而,暂态电压支撑辅助服务需与惯量和PFR辅助服务同步进行,因为能够提供惯量的主体大多也能提供暂态电压支撑。对于常规机组而言,如果系统暂态电压支撑服务变得稀缺,可能导致机组为提供该辅助服务而额外开机发电(提供电能量),从而挤占新能源或其他常规机组的发电空间。因此,其补偿与

费用分摊机制亟待深入研究。

5)研究构网型新能源参与惯量和PFR辅助服务后的市场机制、出清模型和费用分摊机制。随着构网型技术的不断落地应用,构网型新能源将成为常态。构网型新能源在惯量和PFR辅助服务市场中同样可获得相应费用。其费用计算与分摊机制需要深入研究,以促进跟网型新能源向构网型改造,进而提升整个系统的频率安全水平^[36-37]。

7 结语

以新能源为主体的新型电力系统的频率安全面临严重挑战。惯量和PFR等安全性辅助服务市场机制对于确保频率安全具有重要意义。本文分析了电网不同场景下的频率安全需求,指出了频率最低点约束的非线性和耦合特性是造成惯量市场出清与定价困难的关键因素;分析了常规机组、调相机和储能提供惯量和调频服务的物理-成本特性;介绍了近年来国内外惯量和PFR服务市场设计方面的研究成果;提出了惯量和PFR市场设计的若干基本原则;对比分析了电能量、惯量及PFR联合出清模式和顺序出清模式的优缺点;最后,对该领域未来研究方向进行了讨论。

参考文献

- [1] 孙华东,王宝财,李文锋,等.高比例电力电子电力系统频率响应的惯量体系研究[J].中国电机工程学报,2020,40(16):5179-5192.
SUN Huadong, WANG Baocai, LI Wenfeng, et al. Research on inertia system of frequency response for power system with high penetration electronics [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5179-5192.
- [2] 卓振宇,张宁,谢小荣,等.高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J].电力系统自动化,2021,45(9):171-191.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.
- [3] 陈亦平,卓映君,刘映尚,等.高比例可再生能源电力系统的快速频率响应市场发展建议[J].电力系统自动化,2021,45(10):174-183.
CHEN Yiping, ZHUO Yingjun, LIU Yingshang, et al. Development and recommendation of fast frequency response market for power system with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems,

- 2021,45(10):174-183.
- [4] HONG Q T, KHAN M A U, HENDERSON C, et al. Addressing frequency control challenges in future low-inertia power systems: a Great Britain perspective [J]. *Engineering*, 2021, 7(8):1057-1063.
- [5] 周一鸣, 季振东, 荣亿君, 等. 模块化大功率制氢电源参与电网一次调频控制策略研究[J]. *山东电力技术*, 2025, 52(5):41-49.
ZHOU Yiming, JI Zhendong, RONG Yijun, et al. Research on the control strategy of modular high-power hydrogen production power supply for primary frequency modulation of power grid [J]. *Shandong Electric Power*, 2025, 52(5):41-49.
- [6] 国家能源局. 电力辅助服务管理办法[EB/OL]. (2021-12-21)[2025-02-19]. http://zfxgk.nea.gov.cn/2021-12/21/c_1310391161.htm.
- [7] EirGrid&SONI. Recommendation on DS3 system services protocol-regulated arrangements [EB/OL]. (2020-06-12)[2025-02-20]. <https://www.eirgridgroup.com/site-files/library/EirGrid/DS3-SystemServices-Protocol-Recommendations-Paper-with-responses.pdf>.
- [8] 李云, 陈图南, 黄福全. 英国新型电力系统频率管理及对中国电网建设的启示[J]. *全球能源互联网*, 2024, 7(3):312-324.
LI Yun, CHEN Tunan, HUANG Fuquan. Frequency management of new power system in the UK and its enlightenment to the power grid construction in China [J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2024, 7(3):312-324.
- [9] 何希然, 荆朝霞, 赵宣宜, 等. 新能源电力系统惯量辅助服务市场机制研究综述与展望[J/OL]. *电网技术*, 2024:1-17. (2024-12-04)[2025-02-20]. <https://link.cnki.net/doi/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0731>.
HE Xiran, JING Zhaoxia, ZHAO Yuxuan, et al. Review and prospect of research on inertia ancillary service market mechanism in the new energy power system [J/OL]. *Power System Technology*, 2024: 1-17. (2024-12-04)[2025-02-20]. <https://link.cnki.net/doi/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0731>.
- [10] 谢义国, 刘牧阳, 常喜强, 等. 转动惯量辅助服务市场交易机制研究[J]. *电力建设*, 2024, 45(10):158-166.
XIE Yiguo, LIU Muyang, CHANG Xiqiang, et al. Trading mechanism for the rotational inertia ancillary service market [J]. *Electric Power Construction*, 2024, 45(10):158-166.
- [11] Veronika Nemes. Inertia ancillary service market options [R]. Australia: Australian Energy Council, 2021.
- [12] GALIANA F D, BOUFFARD F, ARROYO J M, et al. Scheduling and pricing of coupled energy and primary, secondary, and tertiary reserves[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2005, 93(11):1970-1983.
- [13] RESTREPO J F, GALIANA F D. Unit commitment with primary frequency regulation constraints [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2005, 20(4):1836-1842.
- [14] DOHERTY R, LALOR G, O' MALLEY M. Frequency control in competitive electricity market dispatch [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2005, 20(3):1588-1596.
- [15] LI W F, DU P W, LU N. Design of a new primary frequency control market for hosting frequency response reserve offers from both generators and loads [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(5):4883-4892.
- [16] YANG Y, PENG J C, YE Z S. A market clearing mechanism considering primary frequency response rate [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(6):5952-5955.
- [17] ELA E, GEVORGIAN V, TUOHY A, et al. Market designs for the primary frequency response ancillary service: part I: motivation and design [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(1):421-431.
- [18] ELA E, GEVORGIAN V, TUOHY A, et al. Market designs for the primary frequency response ancillary service: part II: case studies [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(1):432-440.
- [19] ZHANG G Y, ELA E, WANG Q. Market scheduling and pricing for primary and secondary frequency reserve [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(4):2914-2924.
- [20] 王霞, 应黎明, 卢少平. 考虑动态频率约束的一次调频和二次调频联合优化模型[J]. *电网技术*, 2020, 44(8):2858-2867.
WANG Xia, YING Liming, LU Shaoping. Joint optimization model for primary and secondary frequency regulation considering dynamic frequency constraint [J]. *Power System Technology*, 2020, 44(8):2858-2867.
- [21] 王霞. 含储能能量与一次调频服务市场联合优化出清研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2021.
WANG Xia. Research on the joint optimization clearing for energy and primary frequency regulation markets incorporating energy storage [D]. Wuhan: Wuhan University, 2021.
- [22] 李建林, 张梦圆, 王茜, 等. 计及风光不确定性的现货-调频市场联合出清策略[J]. *电力工程技术*, 2025, 44(3):53-63.
LI Jianlin, ZHANG Mengyuan, WANG Qian, et al. Joint clearing strategy in electricity spot market and frequency regulation market considering the uncertainty of wind and solar [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2025, 44(3):53-63.
- [23] LIANG Z R, MIETH R, DVORKIN Y. Inertia pricing in

- stochastic electricity markets [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(3): 2071-2084.
- [24] PATURET M, MARKOVIC U, DELIKARAOGLU S, et al. Stochastic unit commitment in low-inertia grids [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(5): 3448-3458.
- [25] ZHANG Z Y, DU E S, TENG F, et al. Modeling frequency dynamics in unit commitment with a high share of renewable energy [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(6): 4383-4395.
- [26] LI K X, GUO H Y, FANG X C, et al. Market mechanism design of inertia and primary frequency response with consideration of energy market [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(6): 5701-5713.
- [27] BADESA L, TENG F, STRBAC G. Optimal portfolio of distinct frequency response services in low-inertia systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(6): 4459-4469.
- [28] BADESA L, TENG F, STRBAC G. Pricing inertia and Frequency Response with diverse dynamics in a Mixed-Integer Second-Order Cone Programming formulation [J]. Applied Energy, 2020, 260: 114334.
- [29] BADESA L, MATAMALA C, ZHOU Y J, et al. Assigning shadow prices to synthetic inertia and frequency response reserves from renewable energy sources [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023, 14(1): 12-26.
- [30] 朱兰,董凯旋,唐陇军,等.计及同步机惯性与储能虚拟惯性价值的电能、惯性及一次调频联合优化出清模型[J].中国电机工程学报,2024,44(19):7543-7555.
- ZHU Lan, DONG Kaixuan, TANG Longjun, et al. Joint optimal clearing model for electric energy, inertia and primary frequency response considering synchronous inertia and energy storage virtual inertia values [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(19): 7543-7555.
- [31] 赵熙临,李品,付波.基于频率响应特性的储能辅助电网调频方法[J].电力工程技术,2024,43(1):41-49.
- ZHAO Xilin, LI Pin, FU Bo. Frequency regulation method assisted by energy storage based on frequency response characteristics [J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(1): 41-49.
- [32] 赵晋泉,吴天娇,林孙奔,等.两种第三方主体参与的现货市场出清模式比较[J].电力工程技术,2023,42(6): 241-248.
- ZHAO Jinquan, WU Tianjiao, LIN Sunben, et al. Comparison of two market clearing modes for day-ahead power market incorporating third-party entity [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(6): 241-248.
- [33] 石剑涛,郭焯,孙宏斌,等.备用市场机制研究与实践综述[J].中国电机工程学报,2021,41(1):123-134.
- SHI Jintao, GUO Ye, SUN Hongbin, et al. Review of research and practice on reserve market [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 123-134.
- [34] 刘航航,周蕾,司君诚,等.考虑电价不确定性的发电企业电能量-辅助服务市场报价策略[J].山东电力技术,2024,51(8):27-35.
- LIU Hanghang, ZHOU Lei, SI Juncheng, et al. A bidding strategy of electric energy and auxiliary service market for power generation enterprises considering the uncertainty [J]. Shandong Electric Power, 2024, 51(8): 27-35.
- [35] 陆建宇,吉斌,张怀宇,等.新型电力系统的负荷调控电价补偿机制设计[J].电力需求侧管理,2024,26(3):27-33.
- LU Jianyu, JI Bin, ZHANG Huaiyu, et al. Design of load regulation and electricity price compensation mechanism for new type power systems [J]. Power Demand Side Management, 2024, 26(3): 27-33.
- [36] 潘祺,赵晋泉,王岗,等.消纳新能源引发的系统平衡成本解析及计算方法[J].电力系统自动化,2024,48(14): 61-68.
- PAN Qi, ZHAO Jinquan, WANG Gang, et al. Analytical and computational method for system balancing cost caused by renewable energy accommodation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(14): 61-68.
- [37] 吴争,甘海庆.电力市场环境下需求侧资源评估与调控综述[J].电力需求侧管理,2024,26(1):1-8.
- WU Zheng, GAN Haiqing. Review of research on the assessment and regulation of the demand side resources under electricity market circumstances [J]. Power Demand Side Management, 2024, 26(1): 1-8.

收稿日期: 2025-04-10; 修回日期: 2025-05-01

作者简介:

赵晋泉(1972),男,博士,博士生导师,研究方向为电压稳定与控制、电力系统优化运行和电力市场。

(本文编辑:张瑞敏)