

DOI: 10.7667/PSPC180628

可再生能源跨区现货市场技术支持系统设计

昌力^{1,2,3}, 庞伟⁴, 严兵⁵, 杨春祥⁴, 司晓峰⁴, 刘一峰⁵

(1. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 江苏 南京 210061;

2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 210061; 3. 智能电网保护和运行控制国家重点实验室, 江苏 南京 210061; 4. 国网甘肃省电力公司, 甘肃 兰州 730000; 5. 国网宁夏电力公司, 宁夏 银川 750001)

摘要: 为了缓解日益严重的可再生能源弃风弃光弃水问题, 国家电网公司组织了富余可再生能源跨区现货市场, 通过利用市场化机制来促进可再生能源在大区域范围内有效消纳。设计了应用于可再生能源送端电网的富余可再生能源现货市场技术支持系统总体功能架构, 阐述了与国调现货交易平台及日前计划系统间关系, 分析了交易校核、市场出清规则库等核心功能的具体实现技术, 实现了与国调现货交易平台协调运行的送端电网富余可再生能源现货市场支持系统。系统已在甘肃、宁夏等多地投入运行, 为送端电网可再生能源参与跨区现货市场交易提供了全面技术支持, 提升了可再生能源跨区消纳水平与资源配置能力。

关键词: 可再生能源; 现货市场; 技术支持系统; 安全校核

Design of renewable energy inter-regional spot market operation support system

CHANG Li^{1,2,3}, PANG Wei⁴, YAN Bing⁵, YANG Chunxiang⁴, SI Xiaofeng⁴, LIU Yifeng⁵

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 210061, China; 2. NARI Technology Development Co. Ltd., Nanjing 210061, China; 3. State Key Laboratory of Intelligent Power Grid Protection and Operation Control, Nanjing 210061, China; 4. State Grid Gansu Electric Power Corporation, Lanzhou 730000, China; 5. State Grid Ningxia Electric Power Corporation, Yinchuan 750001, China)

Abstract: In order to alleviate the increasingly serious problem of wind, solar and hydro power curtailments, the State Grid Corporation of China organized the surplus renewable energy inter-regional spot market to promote renewable energy consumption in large region by using market mechanism. This paper designs the overall functional framework of the surplus renewable energy inter-regional spot market operation support system for sending end grid, describes the relationship between State Grid Dispatch Control Center's spot market trading platform and schedule system, analyzes the implementation technology of the core functions such as transaction security check and market clearing rule library, and develops the surplus renewable energy inter-regional spot market operation support system for sending end grid to coordinate the operation of State Grid Dispatch Control Center's spot market trading platform. The operation support system has been put into operation in Gansu, Ningxia and many other provinces, which provides a comprehensive technical support for the sending end grid to participate in the surplus renewable inter-regional spot market and enhances the level of inter-regional renewable energy consumption and resource allocation capabilities.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900502).

Key words: renewable energy; spot market; operation support system; security check

0 引言

近年来, 在我国新能源产业政策的扶持下, 风

光等新能源装机容量快速增长, 这些新增长的新能源发电机组主要集中在风光资源丰富的“三北”(华北、西北、东北)地区。由于新能源自身运行特性、跨区输电通道能力不足、灵活调节资源缺乏、省间壁垒严重及市场机制不完善等多方面原因导致弃风

弃光问题明显^[1-4]。为了缓解国网经营区域内愈加严重的弃水弃风弃光现象, 切实落实国家深化电力体制改革及促进可再生能源消纳的相关政策措施, 国调中心牵头组织建设可再生能源跨区现货市场, 发挥市场配置资源的决定性作用, 通过市场竞争充分挖掘可再生能源的跨省跨区消纳空间, 促进四川水电、“三北”地区风电光伏的充分利用。

电力市场技术支持系统是保障电力市场安全、经济、开放、有序运营的重要技术支撑手段, 是不同市场主体灵活参与市场竞争、实现市场高效互动的必要条件。因此, 相关研究者在电力市场发展的不同阶段, 从电力市场技术支持系统总体架构、功能设计、实现技术等多个方面进行了研究, 由于我国还未真正有效开展过电力现货市场运行, 这些研究主要集中在面向中长期交易市场的电力市场技术支持系统^[5-7]。而可再生能源跨区现货市场与中长期市场在市场模式、机制及系统运行要求等方面存在巨大差异, 因此, 亟需设计和开发适应现货市场运行特点及要求的技术支持系统。

本文简单介绍了可再生能源跨区现货市场业务流程, 分析了送端电网在市场中的定位和作用。介绍了送端电网富余可再生能源跨区现货市场技术支持系统总体架构、主要功能及关键实现技术。该系统为送端电网新能源发电企业参与跨区现货市场提供了技术支撑, 与国调现货市场技术支持系统一体化协同运行, 全面支撑富余可再生能源跨区现货市场安全、稳定、高效、有序开展, 促进可再生能源利用跨区通道可用容量在大范围内优化配置。

1 跨区现货市场基本运作机制

可再生能源跨区现货市场分为日前市场和日内市场^[8], 日前市场提前一日开展, 日内市场分为固定时段交易(一天分为 5 个固定时段开展)和临时交易。送端电网每日首先根据自身负荷预测、检修、联络线计划、中长期交易合同等信息完成可再生能源机组初始基础发电计划编制, 在所有调节手段都用完后仍然存在弃风弃光弃水问题, 送端电网组织相关可再生能源发电企业对弃风弃光弃水部分电量进行报价并汇总上报到跨区现货市场, 受端电网结合自身接纳能力分析 & 大用户与售电公司用电需求提交购电需求及报价信息, 国调在跨区市场上依据价格高低并考虑输电通道约束条件形成送受端电网间的市场出清结果, 送受端电网根据交易结果对初始基础计划进行调整形成最终日前或日内发电计划。

2 跨区现货市场系统总体架构设计

根据可再生能源跨区现货市场机制运作要求, 现货市场技术支持系统分为部署在国调侧的跨区现货交易平台和部署在送端电网侧的配套现货市场技术支持系统, 总体架构如图 1 所示。

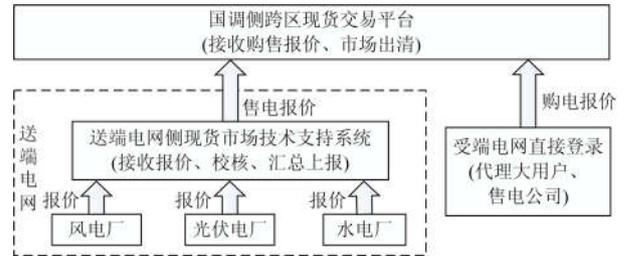


图 1 总体架构

Fig. 1 System architecture

国调侧现货交易平台部署在上级的国调中心, 用于接收参与市场竞争的送受端电网购售电报价信息、基于市场报价按照市场出清规则进行市场出清、下发跨区市场出清结果等, 受端电网通过直接登录到国调现货交易平台进行购电侧报价, 送端电网报价信息由送端电网侧现货系统汇总后通过上下系统间小邮件数据传输服务上报到国调现货平台。国调侧现货交易平台与送端电网现货系统根据安全防护要求部署在安全二区, 系统间通过二区小邮件方式+E^[9-10]文件方式实现数据快速交换, 对市场报价等私有数据采用了高强度加密算法对报价文件进行加密, 确保报价信息无泄漏。新能源发电企业通过基于数字证书方式下 HTTPS(Hyper Text Transfer Protocol over Secure Socket Layer)协议访问送端电网现货市场系统, 其报价数据在送端电网采用加密存储方式保存在本地数据库。国调侧跨区现货市场平台与送端电网现货系统协调运作, 共同支撑可再生能源跨区现货市场在多级电网间有效运营。

3 送端电网参与跨区市场业务流程设计

送端电网侧可再生能源跨区现货市场技术支持系统是水电、风电、光伏等可再生能源发电企业参与可再生能源跨区现货市场的代理接入终端。符合市场准入条件的可再生能源企业通过部署在对其具有调管权的省级调度中心的现货市场技术支持系统获取市场发布信息、参与市场报价、获取市场出清结果等。送端电网调度中心通过送端现货市场技术支持系统收集可再生能源企业报价数据后进行数据校验、安全校核、数据整合后上报部署在国调的现货市场交易平台, 从国调现货交易平台获取交易出

清结果并分解至机组，提交计划编制系统生成机组计划进行执行，如图 2 所示。

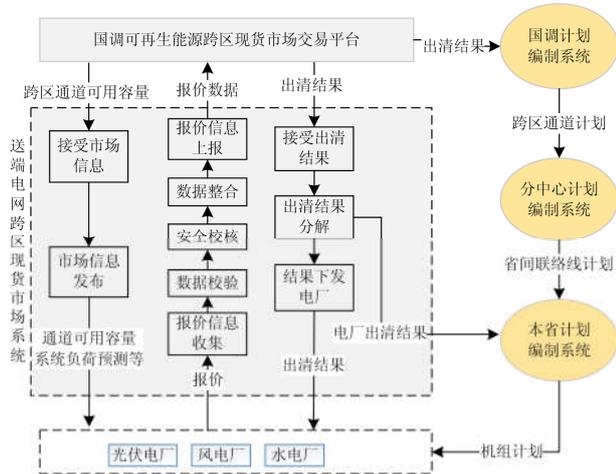


图 2 市场业务流程图

Fig. 2 Market functional process

主要流程包括：

(1) 国调下发市场信息接收。根据统一的数据格式规范要求接收国调下发的跨区通道可用容量信息。

(2) 市场信息发布。向调控范围内可再生能源企业发布跨区通道可用容量信息及省内设备检修、日计划预安排、负荷预测信息。

(3) 报价数据收集。可再生能源企业通过市场报价界面申报参与次日市场的 96 时段“电力-电价”信息。

(4) 报价数据校验。对发电企业上报的报价数据进行校验，包括校验上报的电力、电价是否在市场设定的限值范围内，申报电力是否在其自身可允许的发电能力范围等，对校验不通过的报价数据进行退回并提醒重新申报。

(5) 交易申报安全校核。对电厂的交易申报数据进行安全校核，判断交易申报新增送出电力是否满足电网安全约束条件，当不满足安全约束条件时，按照在总外送交易量最大情况下成本最低为目标对电厂交易申报电力进行调整，最终形成满足电网安全的交易申报电力。

(6) 报价数据整合。按照现货市场报价格式要求把电厂上报“电力-电价”整合成一个省的报价数据，即最终的报价信息中去掉发电企业信息，相同时段相同价格的电力进行相加，形成以省为单位的“电力-电价”的报价信息。

(7) 报价数据上报，对整合后的报价数据按照国调要求上传的数据格式导出上报数据文件并对数据文件进行加密，加密后报价文件通过小邮件发送给国调。

(8) 接收出清结果。从国调现货市场技术支持系统接收下发的市场出清结果数据文件，解析入库。

(9) 出清结果分解。把国调出清结果分解到电厂，送端电网根据发电企业报价由低到高进行排序，以各自申报的电力分解得到电厂出清结果，直至总出清电力分解完成。当存在多家电厂申报价格相同且剩余待出清电力无法满足排序相同的多家电厂申报电力总和时，按照各家申报电力比例进行分摊，最终各家出清价格采用国调统一出清价格。整个省调侧出清分解过程类似在省调侧开展了一次挂牌交易，挂牌电力和价格来自国调出清结果，各电厂以申报价格进行排序出清。

(10) 计划重新编制。根据电厂出清结果，在原先日前计划的基础上叠加交易出清结果生成最终日前计划，下发电厂执行。

(11) 出清结果下发。向各个发电厂发布各自的出清结果，在电厂登录系统中查看各自出清结果。

4 系统主要功能

系统主要包括市场管理、市场申报、市场发布、数据管理、优化计算、安全校核、日前市场、日内市场、市场结算、市场分析、模拟推演等十一大核心功能及统一支撑平台，各项核心功能构建于统一支撑平台之上，具体功能结构如图 3 所示。



图 3 系统功能结构图

Fig. 3 Function architecture

(1) 市场管理。具备市场准入资格的成员通过市场管理完成市场成员信息注册、审核后方可参与市场, 并可根据自身情况进行变更、注销等操作。

(2) 市场申报。为市场成员提供参与市场报价功能及根据市场运行需要申报自身运行约束条件及状态信息。

(3) 市场发布。根据市场披露原则, 事前向市场主体发布市场需求信息及事后发布市场出清结果信息。

(4) 数据管理。用于接入和监视各类外部数据并对这些数据提供查询与编辑功能, 为市场出清计算准备数据。

(5) 安全校核。基于市场交易数据进行交流潮流计算, 提供灵敏度分析、基态潮流分析、预想故障分析与短路电流分析功能。

(6) 日前市场。包括日前市场的交易管理、分解及交易校核功能, 实现对日前市场流程进行控制管理及核心业务操作。

(7) 日内市场。包括日内市场的交易管理、分解及交易校核功能, 实现对日内市场流程进行控制管理及核心业务操作。

(8) 市场结算。基于日前、日内市场出清结果和实际交易执行情况, 按照结算规则进行结算计算, 形成结算单。

(9) 市场分析。从市场结构、安全、效益等多个维度进行市场指标计算, 分析评估市场运营状况。

(10) 模拟推演。提供对电网模型、市场模型、市场规则及成员行为的模拟仿真, 并对模拟仿真下的市场运行结果进行分析, 得到模拟仿真市场运行特征。

5 系统关键实现技术

5.1 现货市场统一支撑平台

电力市场尤其是现货市场系统与智能电网调度控制系统相比面临着更多市场主体的接入访问、更复杂的网络环境、更高要求的安全防护及更便捷易用的用户交互接口等要求。同时, 现货市场系统又与现有的智能电网调度控制系统存在紧密联系, 现货市场系统需要从调度控制系统获取电网模型和电网运行信息, 市场出清结果又需要通过调度控制系统进行控制执行, 两个系统间存在大量业务与数据交互。

智能电网调度控制系统支撑平台 D5000 在电网模型管理、实时运行数据存储访问、服务总线、消息总线等基础功能上具有明显优势^[11], 而基于 WEB 中间件的准实时平台则在系统前端展示、信息管理维护等方面更强大。为了解决现货市场系统自身业

务需求及与调度控制系统间的无缝衔接和高效交互, 通过对 D5000 平台和准实时平台进行各自瘦身与裁剪, 对各自优势功能进行融合形成了基于 C/S(Client/Server)和B/S(Browser/Server)的混合架构统一支撑平台。后台服务计算、实时数据存储访问、数据服务总线、消息总线等基础核心功能采用 D5000 相关功能实现, 前端可视化展示、业务信息管理、流程管理、报表管理等采用准实时平台功能实现。电网模型和电网运行数据存储与访问由 D5000 提供, 市场模型和市场运营数据存储与访问由准实时平台提供, 两者之间通过 D5000 的数据服务总线实现数据共享, 并且设计开发了全新的用户权限的统一管控来兼容原先两个平台的权限管理功能, 提供基于 Ukey 数字证书的系统访问认证和各类市场私有数据的加密存储、传输。统一支撑平台架构如图 4 所示。

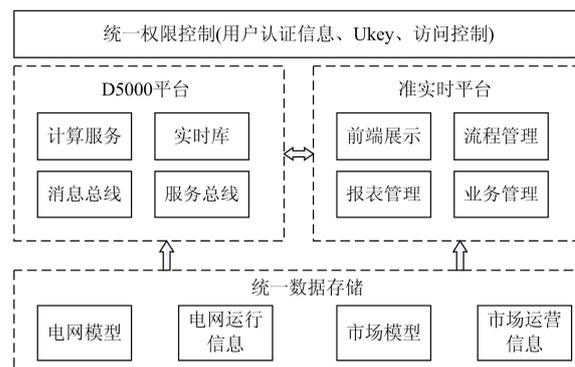


图 4 统一支撑平台架构

Fig. 4 Unified support platform architecture

5.2 基于 SCED 的交易校核技术

交易校核采用安全约束经济调度(Security-Constrained Economic Dispatch, SCED)算法。SCED 将机组出力分配与电网安全联合优化, 是求解满足网络安全约束条件下发电计划与交易结果的良好工具^[12-15]。SCED 主要建模思路是基于优化变量建立目标函数及优化变量所要满足的约束条件, 通过线性规划方法进行求解得到最优结果。SCED 在其内部采用了潮流分布因子来计算断面和设备是否满足电网安全约束, 由于其计算的直流潮流存在一定误差, 因此, 通过交易安全校核再次判断计算结果是否满足安全约束, 如果存在越限设备, 则反馈给 SCED 进行再次调整, 直至通过安全校核计算^[16-17]。

可再生能源跨区外送交易需要在确保外送交易电力最大的基础上成本最低, 而单次 SCED 一般只能计算最大外送能力或最低外送成本。交易校核采用了两次 SCED, 第一次 SCED 用于计算考虑交易

申报数据且满足安全约束条件下的最大外送能力，第二次 SCED 计算满足该最大外送能力且总外送成本最低的申报出力。

(1) 第一次 SCED

求解的目标函数为

$$\max P = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \Delta p(i,t) \quad (1)$$

式中： P 为调整后外送交易电力； T 为系统调度周期内的时段数目； I 为系统中参与申报的新能源机组数目； $\Delta p(i,t)$ 为最终调整后机组 i 在时段 t 的申报出力。

约束条件：

$$0 \leq \Delta p(i,t) \leq \Delta p_0(i,t) \quad (2)$$

$$p_{i,\min} \leq p(i,t) \leq p_{i,\max} \quad (3)$$

$$p(i,t) = \Delta p(i,t) + p_0(i,t) \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^I p(i,t) = p_d(t) \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^I r(i,t) \geq p_r(t) \quad (6)$$

$$-\Delta_i \leq p(i,t) - p(i,t-1) \leq \Delta_i \quad (7)$$

$$\left| \sum_{i \in M} [p(i,t) - l(i,t)] S(i,j,t) \right| \leq p_{ij,\max} \quad (8)$$

式中： $\Delta p_0(i,t)$ 为机组原始申报出力； $p_0(i,t)$ 为机组预计划； $p(i,t)$ 为机组含现货申报电力的最终总出力； $p_{i,\max}$ 和 $p_{i,\min}$ 分别表示电机 i 输出功率的上下限； $p_d(t)$ 为系统 t 时的总负荷； $r(i,t)$ 为机组在 t 时提供的旋转备用； $p_r(t)$ 为系统在 t 时的旋转备用需求； $u_{i,t}$ 为机组 i 在时段 t 的组合状态； Δ_i 为机组 i 每时段爬坡速率的最大值； $P_{ij,\max}$ 表示支路 ij 的潮流上限； M 为电网计算节点集合； $l(i,t)$ 为节点负荷功率； $S(i,j,t)$ 为节点 i 的注入功率对支路 ij 的灵敏度。式(2)表示调整后申报出力不能大于原始申报出力的不等式约束，式(3)为机组出力上下限约束，式(4)为最终机组出力等式约束，式(5)为系统功率平衡约束，式(6)为系统旋转备用约束，式(7)为机组爬坡速率约束，式(8)为电网安全约束。

(2) 第二次 SCED

求解目标函数为

$$\min f = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \Delta p(i,t) C(i,t) \quad (9)$$

式中： f 为总的外送电力成本； $C(i,t)$ 为机组申报价格。

除与第一次 SCED 约束条件相同外，新增以下约束条件：

$$P = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \Delta p(i,t) \quad (10)$$

式中， P 为最终总外送电力，即为第一次 SCED 优化目标值。

5.3 市场模型动态建模技术

市场成员、机组、负荷等市场各类模型的参数属性随着市场规则及业务需求的变化常常会需要进行不断地调整^[18-19]，系统中模型表结构及应用访问接口也会随之进行调整。为此，本系统建立了一种灵活、可动态调整的市场模型建模技术。该技术采用固定结构的基础参数表、可扩展的模型参数定义表及扩展参数值表进行模型结构存储，并通过模型实例化工具基于固定参数和扩展的模型参数定义生成具体模型实例对象，具体建模过程如图 5 所示。

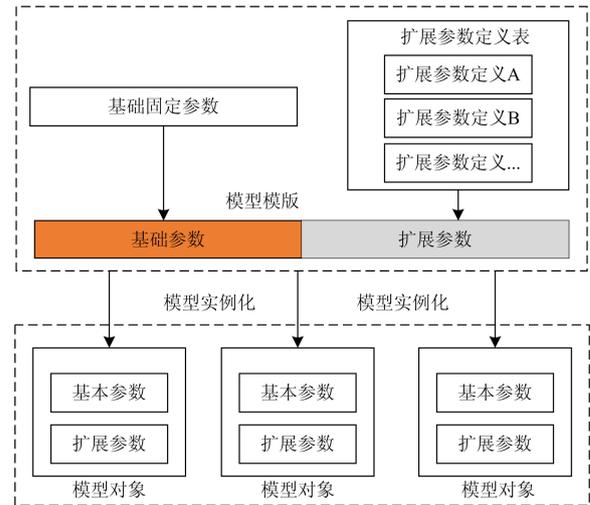


图 5 动态建模过程

Fig. 5 Dynamic modeling process

(1) 固定的基础参数模型表。市场模型中基本模型参数通过不同表结构的模型参数基本表来进行存储，该表列由模型对象的基本参数确定，并保持固定不变，应用程序采用固定访问接口访问不同类型的模型对象基本参数表。由于基础模型参数表只存放固定的基础参数，表结构简单，数据存储量小且存放的参数一般都是频繁访问的模型参数，采用该方式将大大提升模型参数访问效率。

(2) 可扩展的模型参数定义表。采用固定表结构的纵表来存放不同类型市场模型的参数定义信息，该表结构通过增加表记录方式来为不同市场模型扩展其参数定义，参数定义信息包括参数所属模型类型、参数名称、参数值类型、默认值等。通过扩展参数定义表，可以快速检索出某种类型模型所具有

的扩展参数类, 并可以灵活、动态地对这些模型扩展参数定义进行增、删、改。

(3) 扩展参数值表。所有扩展参数统一存放在扩展参数值表中, 在实例化市场模型对象时, 根据扩展模型参数表中定义的模型扩展参数定义信息, 生成相应模型扩展参数值存储在统一的模型扩展参数实体表中。该表采用固定表结构, 主要包括所属模型实体 ID、参数 ID 及参数值信息, 完整的市场模型由基本参数与扩展参数组合形成。

针对该动态建模技术实现了一套市场建模工具, 包括模型参数定义工具和模型维护工具。模型参数定义工具主要用于维护不同类型的市场模型其关联的扩展参数定义, 主要包括对选定的模型类型(市场成员、发电机组、负荷等)增加、删除、修改其扩展参数定义。模型维护工具用于维护市场模型实体, 当新增一个模型对象实体时, 首先读取其模型对象所属类型的扩展参数定义信息生成相应的参数维护项, 并根据参数值类型和默认值来实现参数输入校验, 模型实体参数值分别存储到基础参数表和扩展参数值表中。

5.4 可扩展的市场出清规则库

根据跨区现货市场规则, 省调对新能源企业申报曲线进行汇总并以省的身份上报到国调现货市场交易平台, 国调侧现货交易平台以省为单位形成出清结果, 省调根据自身情况采用合理的出清规则把以省为单位的出清结果再进行二次出清到省内电厂, 具体省内出清规则和算法在跨区现货规则中并没有明确指出, 因此, 各省会根据新能源装机、弃风弃光及发电企业生产经营等情况来选择不同的市场出清规则及算法。

为了灵活适应不同省份对出清规则的变化要求, 系统采用了基于可配置的市场出清规则库。规则库是一种提升系统扩展性与灵活性的重要技术, 已在多个应用场景进行使用^[20-21]。根据对市场出清规则分析把市场出清规则分解成多个可配置的组成部件, 通过组成部件的灵活组合和替换形成适应不同市场出清要求的出清规则库。出清规则库主要包括排序规则、定价方式、分配原则、设置参数等组成部分。这些组成部分在系统中采用了插件化方式进行设计开发, 支持灵活添加各种排序规则、定价方式和分配原则。通过排序规则、定价方式和分配原则组合形成能够支撑不同市场模式下市场出清规则库。

市场出清规则库功能组成如图 6 所示。主要包括出清规则定义、算法引擎、数据输入、结果输出等模块。规则定义采用可读文本格式描述了一条市场出清规则其包括的排序规则、定价方式及分配原

则信息; 算法引擎根据市场模式找到其对应的市场规则定义, 解析规则定义信息并通过数据输入从市场数据池读取相关报价及排序数据, 根据规则定义中配置信息对报价进行排序、形成出清价格及出清电力电量信息, 最终结果由结果输出进行简单数据校验后送回市场数据池。

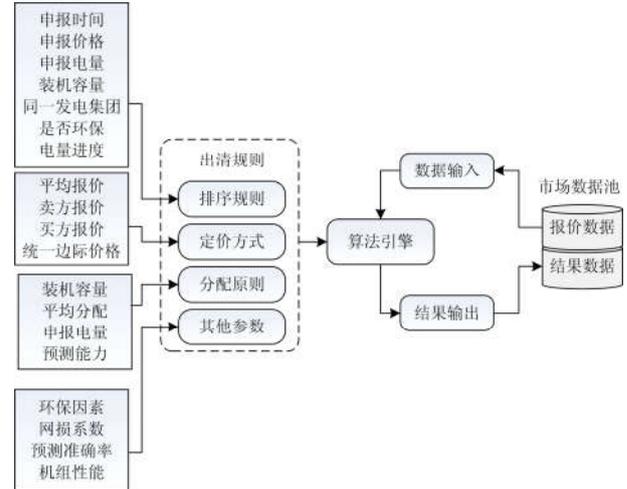


图 6 市场出清规则库功能结构

Fig. 6 Function structure of market clearing rule library

6 应用效果

系统自 2017 年 1 月 8 日以来分别在甘肃、宁夏、黑龙江、吉林等地上线运行以来, 系统整体运行平稳, 有力促进了可再生能源跨区消纳, 减少了弃风弃光弃水。

2017 年全年, 国家电网经营区内通过交易系统共完成了新增跨区可再生能源日前、日内现货交易总电量 62.85 亿 kW·h, 其中甘肃省全年现货交易电量达到 32.71 亿 kW·h。图 7 显示了甘肃电网公司在 2017 年参加跨区现货市场前后每月新能源消纳对比曲线, 除现货市场刚开始运行的 1 月份、2 月份外, 剩余月份最低新增新能源外送达到 2 亿 kW·h, 最高达到 5 亿 kW·h, 跨区现货市场交易成果显著。

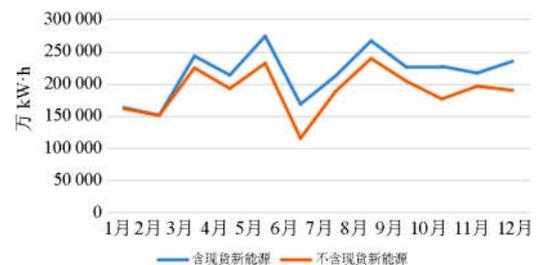


图 7 2017 年甘肃电网新能源现货市场交易电量

Fig. 7 Gansu power grid new energy spot market trading electricity in 2017

7 结论

本文设计并实现的可再生能源跨区现货市场系统采用混合架构统一支撑平台, 实现了可再生能源跨区现货市场各项业务功能, 支撑跨区现货市场平稳、高效运行, 为未来开展多交易品种的现货市场提供了宝贵经验和技術基础。

目前, 可再生能源现货市场中市场主体主要是可再生能源企业, 随着我国省内现货市场启动试点及调频、调峰等辅助服务市场启动, 基于分散式和集中式的省内现货市场运行模式将与目前可再生能源跨区现货市场存在较大差异。现有跨区现货系统需要在市场出清算法、市场流程、市场竞价等方面进行进一步研究以支撑省内现货市场运行, 并实现省内现货与跨区现货市场协调运作。同时, 需要进一步支撑大用户、售电公司、虚拟报价投资机构等多元市场主体接入。

参考文献

- [1] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-8.
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-8.
- [2] 朱凌志, 陈宁, 韩华玲. 风电消纳关键问题及应对措施分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 29-34.
ZHU Lingzhi, CHEN Ning, HAN Hualing. Key problems and solution of wind power accommodation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 29-34.
- [3] 陈雨果, 李嘉龙, 刘文涛, 等. 电力市场环境下发电计划关键技术综述[J]. 广东电力, 2018, 31(6): 14-19.
CHEN Yuguo, LI Jialong, LIU Wentao, et al. Overview on key technologies for generation scheduling under electric market environment[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(6): 14-19.
- [4] 周强, 汪宁渤, 何世恩, 等. 高弃风弃光背景下中国新能源发展总结及前景探究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 146-154.
ZHOU Qiang, WANG Ningbo, HE Shien, et al. Summary and prospect of China's new energy development under the background of high abandoned new energy power[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 146-154.
- [5] 史连军, 邵平, 张显, 等. 新一代电力市场交易平台架构探讨[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(24): 67-76.
SHI Lianjun, SHAO Ping, ZHANG Xian, et al. Discussion on architecture of new-generation electricity trading platform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 67-76.
- [6] 于尔铿, 周京阳, 张学松. 电力市场技术支持系统的新框架[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(9): 9-11.
YU Erkong, ZHOU Jingyang, ZHANG Xuesong. The new framework of power market technical support system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(9): 9-11.
- [7] 苏凯, 姚星安, 张德亮, 等. 广东电力市场交易系统设计与实现[J]. 南方电网技术, 2015, 9(8): 52-56.
SU Kai, YAO Xingan, ZHANG Deliang. Design and implementation of Guangdong electric power market trading system[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(8): 52-56.
- [8] 国家能源局. 关于发布跨区域省间富余可再生能源电力现货市场试点规则的公告[Z]. 2017.
- [9] 王恒, 郭凌旭, 武瑞龙, 等. 基于电力调度数据网的广域消息总线设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(15): 100-106.
WANG Heng, GUO Lingxu, WU Ruilong, et al. Design and implementation of wide-area message bus based on electric power dispatching data network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(15): 100-106.
- [10] 梅峥, 厉启鹏, 李西太, 等. 电力消息邮件体系架构及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(20): 126-132.
MEI Zheng, LI Qipeng, LI Xitai, et al. Architecture and key techniques of message mail in electric power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(20): 126-132.
- [11] 辛耀中, 石俊杰, 周京阳, 等. 智能电网调度控制系统现状与技术展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 2-8.
XIN Yaozhong, SHI Junjie, ZHOU Jingyang, et al. Technology development trends of smart grid dispatching and control systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 2-8.
- [12] 吕翔, 刘国静, 周莹. 含抽水蓄能的风水火联合机组组合研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 35-43.
LÜ Xiang, LIU Guojing, ZHOU Ying. Research on combined unit commitment of wind power-hydro power-thermal power for the power system with pumped hydro storage[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 35-43.
- [13] 夏清, 钟海旺, 康重庆. 安全约束机组组合理论与应用的发展和展望[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 94-103.

- XIA Qing, ZHONG Haiwang, KANG Chongqing. Review and prospects of the security constrained unit commitment theory and applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 94-103.
- [14] 马留洋, 孟安波, 胡函武. 基于离散纵横交叉算法的含风电电力系统机组组合优化[J]. 广东电力, 2018, 31(2): 38-44.
MA Liuyang, MENG Anbo, HU Hanwu. Optimization on power system unit commitment with wind power based on discrete crisscross algorithm[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(2): 38-44.
- [15] 徐帆, 耿建, 姚建国, 等. 安全约束经济调度建模及应用[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 55-58.
XU Fan, GENG Jian, YAO Jianguo, et al. Modeling and application of security constrained economic dispatch[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 55-58.
- [16] 甘德树, 林桂辉, 吴海雄, 等. 以断面控制为核心的电网调度运行控制体系及系统开发[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 117-124.
GAN Deshu, LIN Guihui, WU Haixiong, et al. Research and development of power grid dispatching operation control system based on transmission section control[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 117-124.
- [17] 杨楠, 王璇, 周峥, 等. 基于改进约束序优化方法的带安全约束的不确定性机组组合问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(11): 109-117.
YANG Nan, WANG Xuan, ZHOU Zheng, et al. Research on uncertain unit commitment problem with security constraints based on improved constraint ordinal optimization method[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(11): 109-117.
- [18] 黄海峰, 曹阳, 宋鑫, 等. 适应于智能调度的电网模型管理系统设计[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(增刊1): 7-10.
HUANG Haifeng, CAO Yang, SONG Xin, et al. Power network model management system fitted for smart dispatch[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(S1): 7-10.
- [19] 邢佳磊, 杨洪耕, 陈文波, 等. 智能电网框架下的开放式电网模型管理系统[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 227-232.
XING Jialei, YANG Honggeng, CHEN Wenbo, et al. Open power network model management system under smart grid infrastructure[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 227-232.
- [20] 昌力, 刘拥军, 朱成, 等. 基于规则的电力调度计划数据校验机制[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(21): 98-101.
CHANG Li, LIU Yongjun, ZHU Cheng, et al. A rule-based data validation mechanism for power scheduling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 98-101.
- [21] 程海花, 杨争林, 曹荣章. 电力交易中规则库和算法库的开发[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(3): 49-52.
CHENG Haihua, YANG Zhenglin, CAO Rongzhang. The development of rule library and algorithm library for electricity market trading[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(3): 49-52.

收稿日期: 2018-05-25; 修回日期: 2018-09-13

作者简介:

昌力(1982—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统调度自动化及电力市场; E-mail: changli80@163.com

庞伟(1974—), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统调度运行控制及电力市场建设。

(编辑 魏小丽)