

考虑分布式电源的智能电网备用市场交易模型

张国芳, 吕林, 刘俊勇
(四川大学, 四川 成都 610065)

摘要: 全球范围内的智能电网研究和大用户直接交易已成为中国深化电力行业改革的一个新兴的、重要的方向, 进一步促进了实现电力科技创新与国民经济的协调发展。总结了国内外智能电网的研究和实践经验, 提出了将分布式电源纳入备用市场, 探讨了新型备用交易操作平台的概念和职能, 建立了相应的优化决策模型, 综合考虑了经济性、可靠性、清洁性等因素, 最后给出了求解方法和算例进行验证。

关键词: 智能电网; 分布式电源; 备用交易; 多种交易类型; 大用户

Abstract: The worldwide smart grid and the direct transactions between power consumers and generation enterprises have been a new and important direction to further deepen the realization of electric power technology innovation and promote the implementation of harmonious development of power and national economy. The research and practical experiences of smart grid at home and abroad are summarized. The way of distributed generation brought into reserve market is proposed. The definition and the function of operation platform of direct transaction are discussed. And the structure of reserve markets in the ancillary service is studied. Considering the mode of energy-conservation power generation dispatch, the relevant optimization decision model is established, which synthetically considers several factors such as economy, reliability, cleanliness. At the end, the solving method and the examples are given and verified.

Key words: smart grid; distributed generation (DG); reserve market; kinds of transaction; large customer

中图分类号: TM711 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)增-0023-05

0 引言

电力行业作为国家发展基础产业之一, 与能源规划、经济发展等有着密切的联系。为构建集中与分散相结合、智能重组、电能质量提高、双向通信、实现与传统电网截然不同的智能电网体系, 中国电力工业已逐步走向具有中国特色的智能电网建设过程中^[1]。建设不仅包括电网建设、信息轨道铺设, 还包括交易模式重构等电力市场建设。考虑发电侧与用户侧的直接交易, 以及分布式电源接入等多方面因素, 具有中国特色的智能电网旨在成为一个以高端信息技术支持下的高能源利用率、高收益的可持续发展“三高”网络。

随着社会对电能质量与安全可靠性要求越来越高, 单一大电网已不能满足用户, 尤其是大用户的要求^[2]。为避免一点扰动影响全网, 引入分布式电源成为降低网损、提高可靠性的公认发展方向。分布式发电 (distributed generation, DG) 即位于用户侧的小

发电机组的综合应用。分布式发电使用户不仅能从电力公司购电, 而且可以保证自己用电充裕的情况下将剩余电量出售给电力公司或其它用户。DG 电源一般包括太阳能发电系统、风力发电站、微型燃气轮机、柴油发电机、燃料电池、生物质能发电及储能装置等^[3]。可减轻远距离输电线路的需求、对大电厂的依赖, 还可作为备用电源降低购买备用成本, 保障用户用电安全。

智能电网下的开放经营更加彻底, 只是世界各国的实现方式和途径有所不同, 试点结果表明统购统销十大用户直接交易市场是适宜中国国情发展的。随着改革的逐步深化, 辅助服务 (ancillary service) 市场直接交易逐渐提上议程。备用作为 AS 的重要内容, 它的获取与调用方式与发电厂、大用户、电网公司的利益息息相关, 又对系统运行的可靠性和经济性有着重大影响。在此架构下计入分布式电源, 签定长期合同可保证电力系统的稳定性, 帮助煤电价格保持稳定, 同时也可帮助电力产品上游相关企业保持交易稳定, 相应地降低交易风险和成本, 刺激购售双方交易

量,对于眼下化石能源紧张所带来的压力有非常重大的意义。

目前各项研究工作正在稳步开展,如何将各部分整合起来成为有机整体,成为了研究热点。文献 [1] 提出了大用户直接交易的核心工作和替代方案,但未涉及到辅助服务。文献 [2,3] 提到了 AS 的重要性以及建议,但太笼统,未提出购销模型。电力市场下辅助服务是一种商品,其使用必须给予必要的经济补偿 [5]。辅助服务的获取和定价成为市场中关心的问题。文献 [4] 分析了大用户直购电主要各项辅助服务的经济成本,并基于大用户与发电厂对电网辅助服务的责任大小与受益大小对各辅助服务成本进行了合理分摊,但未提出辅助服务市场实施方案及其可行性。时下热议的分布式发电会改变备用购买、调度计划,文献 [9] 提出了在输配分离的电力市场中存在多种电力双边合同和分布式发电时配电公司的中长期购电优化模型,得到配电公司从各个不同电能来源处的最优购电比例以使得购电费用最小。文献 [2] 将分布式电源细化至备用电源,基于电力不足概率对分布式电源配置方案进行可靠性评估,给出不同可靠性目标下的最优配置方案,并对用户不同停电成本对配置方案的影响进行了敏感性分析。

基于以上文献成果提出了智能电网备用市场直接交易操作平台概念,将备用服务单独于主能量市场直接交易,由购销双方协商或经交易中心撮合完成,计及分布式电源因素,根据等效用原则和决策理论建立联合优化模型,达到系统安全性、经济性和环保性三位一体的最终目标。

1 备用直接交易操作平台整体架构

试点初期只有少数大用户参与直接交易,但随着经济发展以及准入条件放低,大用户数量增多将形成“大用户库”,直接交易操作平台由电网公司和电监办联合组建,负责大用户库内成员交易和高度的监管工作,主要有主能量交易和节能发电调度原则要求下的发电权交易及补偿。备用平台作为其一个重要板块,主要负责备用调用,分布式电源调度,备用不足的网购工作(见图 1)。

1.1 备用市场结构

在中国传统的调度机制下,备用被作为一种保证电力系统可靠的措施,是属于指令性的无偿服务,各

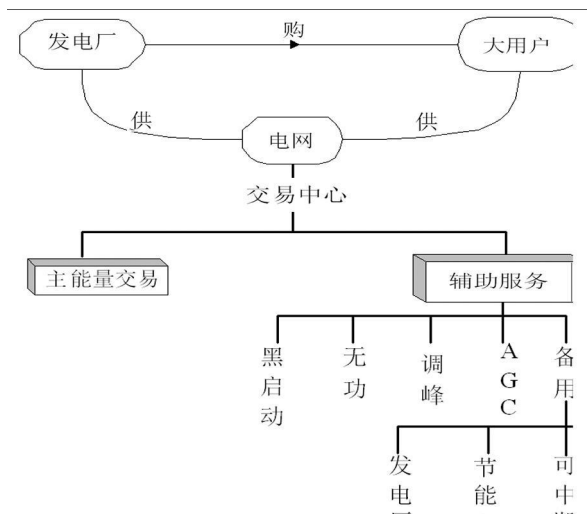


图 1 操作平台职能图

发电厂被指定安排一定容量的备用(一般比例为 5%~10%),在发生紧急情况时听从调度下达命令。所以,发电企业没有参与备用辅助服务的积极性。

智能电网备用市场不再建立集中交易的备用市场,而由购销双方协商完成,交易量和交易价格不再由集中的市场统一确定。具体说来即是大用户向发电厂直购主能量和相应的备用容量,而在购买之后交由操作平台统一调度。在这里,各大用户所购买的备用应被视为同质同等级地位,调用时完全受平台支配(不按合同中指定供方和需方)。在备用调用时电网公司收取过网费,同主能量,故不赘述。当备用被调用时,由平台统一调度。由于不同时段内备用调用率不同,电量价格也分为峰、平、谷三个时段价格,调用时电价等同现货电价。

1.2 分布式电源

具有中国特色的分布式电源不仅受供电公司调度,并且可直接连入输电网低压侧参与电网调度运行。其面临的电力市场结构如图 2 所示。

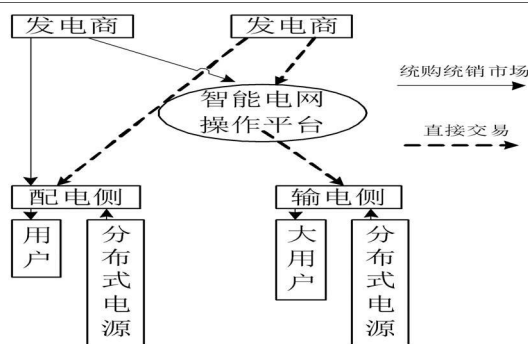


图 2 含分布式电源的市场结构

分布式发电分两种情况,一是由独立分布式发电

商所有,另外就是由供电公司所有。独立分布式发电商可以与供电公司或操作平台签订双边合同,也可以在短时间内提供电能支持。

2 最优备用容量模型

操作平台作为调度主体,倡导购销双方成交备用容量最优,保障可靠性和经济性。增加备用成交电量可提高系统的可靠性,但大用户的成本就会因此加大,降低资源利用率,不符合“节能减排”趋势。在追求容量经济性的同时重视供电安全性,体现了风险理念的重要性。风险是指在一定条件下和一定时期内,由于各种结果发生的不确定性而导致行为主体遭受损失的大小以及这种损失发生可能性的大小^[7]。为量化风险值,将其定义为停电概率与停电后果的乘积,反映了损失的数学期望值。可建立如下模型。

$$\min C(Q) = L(Q) + C_c(Q) + B(Q_y) \quad (1)$$

$$\text{其中 } C_c(Q) = P_c^T Q + \lambda P_c^T Q_x; \quad (2)$$

$$B(Q_y) = b_t \times Q_y; \quad (3)$$

$$L(Q) = R_{\text{loss}} E_{\text{econs}} \quad (4)$$

式中, P_c^T 为容量价格, P_c^T 为电量价格; Q 为备用成交电量, Q_x 为备用调用量 ($Q_x \leq Q$); λ^T 为备用调用概率; $T=1, 2, 3$ 表示峰时段、平时段、谷时段; 大用户购入备用 Q 后,由于电力不足或停电响应滞后仍面临停电损失, $L(Q_x, Q)$ 为停电损失函数; b_t 为分布式电费,单位为元 / (kW · h); Q_y 为其发电量。

2.1 约束条件

1) 备用容量平衡约束 $\sum R_i - \sum M_j = 0$, 式中 R_i 为大用户申报的第 i 段备用成交电量, M_j 为发电厂的第 j 段备用成交电量。

2) 备用调用容量约束 $0 \leq M_j \leq M_{j\max}$, 式中 $M_{j\max}$ 为本合同签订备用成交电量。

3) 备用容量约束 $M_{\min} \leq M_j \leq M_{\max}$, 式中 M_{\min} , M_{\max} 分别为机组所能提供的备用上下限。

4) 功率平衡约束 $P_i - D_i \geq 0$, 表示在任意时刻 t 时发电侧机组功率上限必满足用户侧需求功率。

5) 电力不足概率 $P_{\text{LOLP}} \leq P_s$, 即风险度, 须满足系统电力不足概率 P_s 要求。

6) 电量不足期望值 $E_{\text{econs}} \leq E_{\text{so}}$

7) 废物排放约束, 发电产生的污气 (如 SO_2 , CO_2 等) 被限制到某一水平, 即排放量在一定限制之内。

2.2 模型求解

对于某一停电故障, 引起的备用调用量一定, 故寻求最优备用成交量, 既不剩余, 也不缺少。对式 (1) 求导, 得

$$\frac{\partial C}{\partial Q} = \frac{\partial L}{\partial Q} + \frac{\partial C_c}{\partial Q} + \frac{\partial B}{\partial Q}$$

当上式等于 0 时得到备用代价最小, 即最优备用容量条件。进一步可得到

$$R_{\text{loss}} \Delta E_{\text{econs}} + \Delta C_c + \Delta B = 0$$

其中 R_{loss} 值针对大用户类型近似为固定常数; ΔE_{econs} 为购买备用前后的电量不足期望值之差; 当发电厂为燃煤机组时, 可能面对被替代, ΔB 为被购买后得到的补偿增加值。

设置判定指标 $\omega = R_{\text{loss}} \Delta E_{\text{econs}} + \Delta C_c + \Delta B$, 该指标表明了当购入一定备用容量后, 备用调用所引起的费用变动, 可以有效地得到最优备用成交量。当 $\omega = 0$ 时, 得到最优配置方案; 当 $\omega < 0$ 时, 应继续购买备用。

2.3 算法步骤

算法步骤见框图 3。

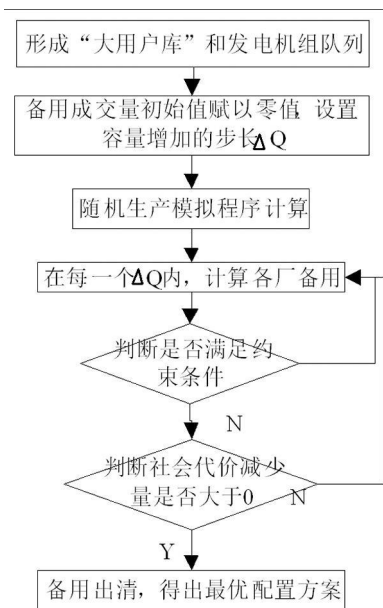


图 3 算法步骤框图

3 算例

这里采用一个简单算例, 假设大用户库中有六名成员 (其中四名为水电机组, 两名为火电机组), 签定长期合同和直购电合同, 并且在必要时从现货市场、自备电厂购电, 以双边交易模式参与交易。直购电用户与电厂采用多对多方式交易。电网供电有保证, 电

网转运费保持恒定,非直购电用户购电方式不变。电力不足概率通过 Monte-Carlo 随机模拟方法来得出,如表 1。

表 1 电力不足概率

时段	调用率	时段	调用率	时段	调用率
1	0.015	9	0.015	17	0.007
2	0.020	10	0.008	18	0.018
3	0.008	11	0.011	19	0.015
4	0.007	12	0.008	20	0.009
5	0.009	13	0.010	21	0.012
6	0.020	14	0.005	22	0.013
7	0.006	15	0.016	23	0.008
8	0.015	16	0.019	24	0.018

全天被分为峰时段、平时段、谷时段,各时段电价不同,反映出发电厂将机组用作备用所产生的机会成本也不相同,即容量价格不同。被调用时备用价格等同于现货电价。

以某时段为例,一用户购买备用容量曲线如图 4 所示。当备用购买量较小时,电力不足期望值较大,容易发生由于电力不足而导致的切负荷情况,停电损失赔偿远高于备用价格。随着备用容量增多,停电概率减小使得总费用减少。当备用成交量充足时,系统不易发生电力不足,总费用主要体现在备用购买上。

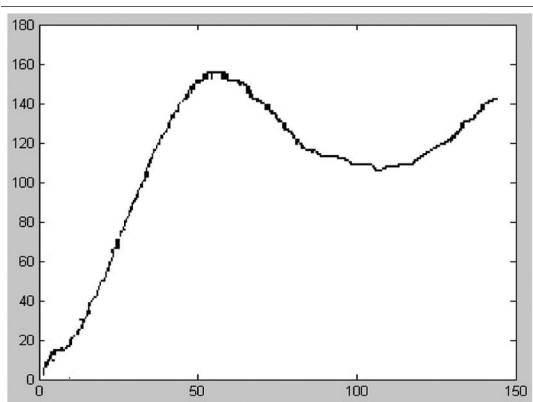


图 4 最优备用容量求解过程

按照《电力系统稳定导则》规定,备用容量为最大负荷的 10%。以模型进行备用容量优化的模拟分析,火电机组由于节能原则被替代,并根据“谁得益,谁补偿”原则得到水电机组补偿。基于动态规划算法,解得备用市场出清结果如表 2 所示。

表 2 备用容量

时段	预测负荷	备用容量	比例	时段	预测负荷	备用容量	比例
1	1 231	91	0.074	13	1 817	145	0.08
2	1 211	102	0.084	14	1 797	148	0.082
3	1 172	89	0.076	15	1 758	167	0.095
4	1 133	87	0.077	16	1 719	148	0.086
5	1 153	145	0.126	17	1 758	173	0.098
6	1 270	136	0.107	18	1 797	123	0.068
7	1 406	96	0.068	19	1 875	157	0.084
8	1 660	90	0.054	20	1 914	159	0.083
9	1 856	151	0.081	21	1 875	137	0.073
10	1 934	183	0.095	22	1 758	115	0.065
11	1 953	197	0.101	23	1 563	121	0.077
12	1 934	188	0.097	24	1 367	114	0.083

结果表明最优备用容量比例明显小于 10%,平均备用比率为 8.4%,低了 1.6 个百分点,为社会多创造效益共 149.868 1 万元。最优备用同时保证了可靠性和清洁性,但无法能耗最优。

火电机组在低谷时段没有进入机组组合,仅在系统腰荷时段承担了部分旋转备用,清洁能源机组在计及分布式电源时所承担的备用要远大于按成本最优原则。不考虑分布式发电后,可大大减少发电对环境的影响。

4 发展方向

(1) 储能技术应用。在传统电力系统中电能不能够储存,制约了电能的大规模生产,储能技术的应用可以打开制约发电量增长的瓶颈,将使电网运行的安全性、经济性、灵活性得到大幅度的提高。

分布式发电在可靠性和供电连续性上有待提高,为大规模应用储能技术成为必需技术,以支撑电源发展。分布式电源作为备用电源要求响应速度快,功率密度大,长期待机耗能少,抗恶劣环境;也就要求储能装置效率高,储能量大,可适应清洁能源不稳定性变化。

(2) 分布式智能电网构建。分布式智能电网是指依靠分布式电源、微网、储能系统的新型智能电网,可独立运行,也可与传统大电网相连接。广泛的说,分布式电源还可是大型电容、电池等等。分布式智能电网将成为清洁能源发挥作用,为大电网供电的主要途径。随着国家能源政策对新能源发展的激励,电力市场的扩大以及分布式电源技术发展使得分布式智能电网正成为下一步电网建设的必要补偿。风电

组并网运行提供了分布式电网的相关经验,实际证明大电网系统和分布式智能电网相联可节省投资,降低能耗,提高系统安全性和灵活性。

表 3 智能电网备用发展

发展阶段	传统	现在	智能未来
规划方式	传统方法	各种能量系统	微电网
发电方式	集中	分散	分散
负荷特性	就地备用电源	传统备用为主,小部分分布式电源	较高、多分布式电源
配网特性	有变电站供电的被动网络	半自主的网络	自主网络,具有双向能量交换能力
紧急状态管理	机组强迫停运	切负荷,切分布式机组	孤岛自治运行

(3)先进技术。分布式智能电网技术发展先进的电力电子技术、计算机控制技术、通信技术紧密相联,其整体智能水平非常之高。其主要包括几大部分:①集控中心:为可视化监控全网,实现双向通讯,提供智能运行及监视多重功能;②分布式电源,储能装置,自备发电机组等等;③智能化用户:具有双向通信功能的智能电表(高级量测体系),并入一体化通讯网络,支持需求侧管理,自主切换;④具有系统重构能力:故障发生时重构速度快,多重监测开关实时通讯电网状态,通过调度管理实现故障隔离、恢复供电和故障定位诊断等等;⑤新型电力电子设备支撑:改善电能质量,适应分布式新能源接入。

5 结 论

DG联合了多种清洁能源,具有很好的经济性和环保性,减少了不可再生能源消耗,能够解决常规能源无法解决的问题,是现今世界能源战的有力武器。智能电网环境下,DG将随着微网的发展发挥巨大的作用。风电并网后为今后各种能源发电技术提供了发展经验,DG必将成为 21 世纪电力行业的生力军。

这里提出智能电网交易模式采用协商式的双边交易,并在此基础上提出智能电网备用交易平台概念,加入了分布式电源作为备用电源,分析了备用市场直接交易的现实意义和重要性,搭建了备用成交量寻优算法模型,最后用算例进行验证,为灵活的备用市场进一步细化奠定了良好的基础。

中国应该加大对该方面研究的重视程度及支持力度,使得这一关系到生态环境和能源可持续供应的国计民生重大问题的研究工作得以全面开展。

参考文献

- [1] 肖世杰. 构建中国智能电网技术思考 [J]. 电力系统自动化, 2009, (9): 1—4.
- [2] 赵国波, 刘天琪, 李兴源. 分布式发电作为备用电源的优化配置 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(1): 85—88.
- [3] 黄兴, 翟绘景, 路晓明. 大用户直购电所面临的三个核心问题探讨 [J]. 电力需求侧管理, 2007, 19(3): 78—80.
- [4] 何永秀, 黄文杰, 赵晓丽, 等. 大用户直购电辅助服务成本分摊机制 [J]. 华北电力大学学报, 2004, 31(4): 70—74.
- [5] 曾芳. 并网发电厂辅助服务研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2008.
- [6] 安玲. 电力市场环境备用辅助服务的需求和调度问题的研究 [D]. 合肥工业大学, 2007.
- [7] 齐先军, 丁明. 发电系统中旋转备用方案的风险分析与效用决策 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 9—13.
- [8] 陈树勇, 宋书芳, 李兰欣, 等. 智能电网技术综述 [J]. 电网技术, 2009, (8): 1—7.
- [9] 魏玲, 杨明皓. 含分布式发电和多种合同的配电公司中长期购电策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(2): 53—57.
- [10] 魏玲, 杨明皓. 输配分离电力市场中含分布式发电的配电公司购电模型 [J]. 电网技术, 2008, 32(8): 71—76.
- [11] 王建学, 王锡凡, 张显. 电力市场中弹性运行备用研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(18): 20—27.
- [12] 宋云亭, 郭永基, 程林. 大规模发输电系统充裕度评估的蒙特卡罗仿真 [J]. 电网技术, 2003, 27(8): 24—28.
- [14] 时珊珊, 鲁宗相, 周双喜, 等. 中国微电网的特点和发展方向 [J]. 中国电力, 2009, (7): 21—25.
- [15] 肖立业, 林良真. 构建全国统一的新能源电网, 推进我国智能电网的建设 [J]. 电工电能新技术, 2009, 28(4): 54—59.
- [13] PANG C K, SHEBLE G B. Evaluation of dynamic programming based methods and multiple area representation for thermal unit commitments. IEEE Trans on Power Systems 1981, 100(3): 1212—1218.
- [14] Ettore Bompard, Yuchao Ma. Modeling Bilateral Electricity Markets: A Complex Network Approach. IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS VOL. 23, NO. 4, NOVEMBER 2008.
- [15] Sameh ElKhatib, Francisco D. Negotiating Bilateral Contracts in Electricity Markets. IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS VOL. 22, NO. 2, MAY 2007.

(收稿日期: 2009—11—04)