

电力市场备用容量的一种交易模式及其定价机制

易亚文, 石东源

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 备用容量关系到电力系统的安全运行和可靠性。在电力市场环境, 备用容量的交易模式和定价机制是引导发电公司作出正确的投资决策, 保证备用容量供需平衡的重要因素。文中针对当前的在电力市场环境下备用容量交易模式进行了分析, 并提出了不足之处。对此, 该文提出了预付费备用容量交易模式和基于平均利润率的容量定价机制。该方法明确了容量市场的交易对象为备用容量, 电网公司对订购的备用容量预先向发电公司支付费用, 备用容量的定价保证发电公司的容量市场交易与能量市场交易获取同样的利润率, 以此引导发电公司正确地投资备用容量。该文的论证和算例表明该方法可以确保发电公司投资足够满足系统可靠性需求的备用容量, 并且防止过量投资。

关键词: 备用容量; 系统可靠性; 容量市场; 预付费; 平均利润率

中图分类号: TM73; F123.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)03-0006-04

0 引言

系统备用关系到电力系统的安全运行和可靠性。一般而言, 备用容量占系统总负荷的比例越高, 系统的供电可靠性越高。

2003年全国电力供需形势严峻。2003年夏季, 备用容量严重不足, 有的电网甚至出现了零备用^[1]。2004年全国电力供需总体形势比2003年更为严峻, 2005年形势将由紧张开始走向缓和, 到2006年, 全国电力供需将基本平衡^[2]。

在浓厚的“缺电”氛围下, 确保系统可靠供电的问题显得更加突出。传统的电力工业中, 备用机组由调度员指定, 不单独核算备用的成本或对其计费。但是, 在市场环境下, 发电公司成为独立的经济实体。如果没有备用的额外付费, 很难有哪家发电商会自愿提供有额外成本支出的备用辅助服务, 由此可能会导致系统备用不足。因此, 电力工业改革的主要目的之一是建立合适的市场机制, 保证备用机组获得适当的投资回报, 引导发电公司投资足够满足系统可靠性要求的备用容量, 同时防止盲目过量投资。

大量的研究和实践表明单一能量市场很难保证备用容量的充裕性^[3~5]。由此, 很多国家和地区采用了支付备用容量费用或建立备用容量市场的方法。这些方法的一个共同特点是不论参与备用的系统可利用装机容量是否被调用, 都给这些备用容量付费, 可以在一定程度上激励发电公司投资备用容量, 但还是很难引导发电公司做出正确的备用容量

投资决策。针对这一问题, 本文提出预付费备用容量交易模式和基于平均利润率的定价机制。该方法将容量市场的交易对象严格限定为备用容量, 电网公司预先向备用容量供应商支付容量费用。容量定价考虑备用容量在备用期间的固定成本和可能投运的运行成本, 保证发电公司在容量市场中进行容量交易也可以获得与在能量市场中进行电量交易同样的利润率。该方法可以创造一个公平有效的容量市场投资环境, 实现电网公司和提供备用的发电公司双赢。

1 现有的备用容量交易方法

目前, 备用容量交易主要有三类方法正在使用或完善中:

a 单一能量市场

单一能量市场的方法是一种最传统的做法。市场交易只向发电公司提供的被调度的电量和备用容量付费, 即只支付能量费用。如美国加州、挪威、加拿大的阿尔波特和澳大利亚等, 只有能量市场。回收容量成本的唯一途径是市场清算价和发电成本之差。即使有辅助服务市场, 也不是所有可提供备用容量的发电机都能够被支付辅助服务费用, 只有在辅助服务市场中标的发电机组被支付费用。如果市场是完美的竞争市场, 这种方法是有效的。如果市场不是完美的竞争市场, 价格不能及时响应需求变化, 那么市场清算价很难如期待的那样产生正确的发电投资响应, 很难保证足够的备用容量^[4]。

b 容量费用

容量费用分为固定容量费用和动态容量费用。固定容量费用在阿根廷、智利、哥伦比亚和西班牙等国家使用。在这种方法中,备用机组不论是否被调度发电,都获得固定的附加容量费用。动态容量费用在英格兰和威尔士(E&W)电力市场中使用。容量费用的确定依赖于发电机组的利用率,即通过估测第二天的失负荷价值来确定。容量费用作为附加费,加上市场清算价即为电力购买价格。

通过这种支付装机容量费用的方法可以补偿备用容量投资,扩大装机容量和机组利用率,吸引新的发电投资。但是,固定的容量费用的管制属性很强,不能适应供电需求平衡的变化。动态容量费用将容量费用加入 pool 电价,可能歪曲短期市场电价,而且发电公司没有明确的容量交易义务,期望的可靠性水平仍然很难保证^[4]。

c 容量市场

PJM、NEPOOL、NYPP都采用容量市场的方法。这种模式下,监管机构确定每个用户实体必须购买的容量以及每个发电机允许出售的最大容量^[4]。容量市场由可运行容量市场和装机容量市场共同组成。可运行容量市场针对正在运行的,或按市场规则定义的在“一定期限”内可以运行的那部分装机容量,按小时进行交易,确保在运行需要时有充足的可调度容量。装机容量市场用于保证将来长时期内电力市场中有充裕的装机容量,是按月拍卖,用于解决长期的系统容量充裕性问题。

这种方法最大的优势是产生了自由交易的容量市场和通过竞争形成的容量价格,既可以保证短期内系统能够安全调度,又可以维持长期的发电容量充裕。但是,这种方法很大的一个缺点是可能导致过量投资^[3,4]。

为了激励发电公司投资足够的备用容量和防止过量投资,本文在传统电力市场的基础上,根据交易对象明确区分能量市场和容量市场。在容量市场中,采用了预付费的容量交易模式和基于平均利润率的定价机制。

2 预付费容量交易模式

在能量市场中,交易对象是被调度机组的发电量。两类参与者分别是发电公司和电网公司。发电公司向电网公司提供电能,同时有责任可靠供电。机组故障导致的停电损失应该由发电公司承担。

与传统交易方法不同,考虑到备用机组可能长期停运,甚至不出力,本文认为容量市场交易对象是

备用容量,而不是备用机组出力。两类参与者分别是提供备用容量的发电公司(容量供应商)和有备用容量需求的电网公司。电网公司根据可靠性要求和自身的利益预先向容量供应商订购所需的备用容量并支付容量费用,备用机组在电网公司需要时投运,而电网公司不必另外支付投运机组的运行费用,即备用机组出力不造成电能交易。如果容量供应商不能提供足够的备用,必须补偿由此造成的电网公司损失。由于容量交易是预先对容量付费,不涉及备用机组投运造成的电量交易,因此容量市场交易和能量市场交易不会相互干扰。

在能量市场中,设电网公司购买并完全投运容量 P 的收益为 $S(P)$,则该函数可以反映用电量的收益。

在容量市场中,若电网公司购买备用容量 P 且全部投运,则电网公司的收益是 $S(P)$ 。实际上,系统事故和负荷波动都存在随机性,备用容量投运产生的收益表现为一种风险收益。假设备用容量投运的概率为 k ,则实际能为电网公司创造价值的备用容量就只有投运的备用容量 kP ,电网公司购买备用容量 P 的收益期望值即为:

$$S_E(P) = S(kP) \quad (1)$$

为了给容量供应商足够的投资回报,电网公司必须向供应商支付的容量费用应该等于备用容量的容量成本 $C(P)$ (包括固定成本、运行成本和适当收益)。然而,备用容量供应商实际提供给电网公司的备用容量 Q 很可能不等于电网公司需求的备用容量 P 。当 $Q < P$ 时,供应商应该赔偿电网公司的损失 $S_E(P - Q)$ 。在这种情况下,备用容量供应商的收入为:

$$T_T(Q) = C(P) - S_E(P - Q) \quad (2)$$

将式(1)代入上式可得:

$$T_T(Q) = C(P) - S[k(P - Q)] \quad (3)$$

为了得到最大利益,容量供应商的最优决策 Q 应满足: $Q = P$,即容量供应商提供的最优备用容量 Q 与电网公司需要的备用容量 P 相等。此时供应商获得最大收入 $C(P)$ 。显然,超过电网公司需求的备用容量投资不会得到回报,因此供应商不会过量投资。

由上述分析可以看出,这种交易方法一方面将电网公司面临的由系统事故或负荷波动产生的备用需求转交给容量供应商来承担。在利益驱动下,备用容量供应商会投资足够的备用容量,满足系统的

安全性和充裕性要求,而且可以避免出现过量投资的危险。另一方面,容量市场不进行任何电量交易,只进行备用容量交易,能够在不影响双方利益和系统可靠性的情况下简化交易过程和结果,可以为投资者提供明确的能量和容量投资环境。

3 基于平均利润率的备用容量定价机制

上述备用容量交易模式明确了容量市场的交易对象和交易规则。然而怎样的备用容量价格才能给备用机组足够的投资回报,充分激励备用投资?作为独立的市场个体,无论投资在容量市场还是在能量市场,发电公司都希望获得最大利润率。由于备用机组的利用率较低,如果采用与能量市场同样的交易价格,那么投资备用机组获取的利润率较低,发电公司更希望机组只用于发电而不是备用。因此,只有当备用容量的价格能够保证发电公司在容量市场的利润率与在能量市场的利润率相同时,发电公司才可能有足够的动力选择投资备用容量。为此本文通过比较发电公司分别在能量市场和容量市场的成本与收益,提出基于平均利润率的备用容量定价机制。

在能量市场,如果参与电量交易的机组容量为 E ,其中故障机组容量为 G ,市场清算价为 V_{MCP} ,电网公司的停电损失可表示为 $S(G)$,根据交易规则,该损失由能量市场中的供电商完全补偿,则供电商的收益为:

$$T_e = (E - G)V_{MCP} - S(G) \quad (4)$$

发电成本为:

$$C_e = F(E) + R(E - G) \quad (5)$$

其中: $F(\cdot)$ 和 $R(\cdot)$ 分别为供电商的固定成本函数和运行成本函数。由于由式(4)和式(5)可以求出能量供应商的利润率:

$$f_e = \frac{T_e}{C_e} = \frac{(E - G)V_{MCP} - S(G)}{F(E) + R(E - G)} \quad (6)$$

在容量市场,若容量供应商作出最优决策,即交易的备用容量为 P ,则容量供应商的收入为:

$$T_c(P) = C(P) \quad (7)$$

同时, $T_c(P)$ 也是电网公司支付给容量供应商的容量费。设备用容量交易价为 V_c ,则:

$$T_c(P) = C(P) = V_c P \quad (8)$$

容量供应商的生产成本应该包括备用容量在备用期的固定成本和可能投运的运行成本。若备用容

量投运概率为 k ,则投运容量为 kP ,容量供应商的成本期望值为:

$$C_c = F(P) + R(kP) \quad (9)$$

其中: $R(kP)$ 为备用容量运行成本期望值。由式(8)和式(9)可求出备用容量供应商的利润率:

$$f_c = \frac{T_c(P)}{C_c(P)} = \frac{V_c P}{F(P) + R(kP)} \quad (10)$$

为了在能量市场和容量市场获得同样的利润率,令:

$$f_c = f_e \quad (11)$$

将式(6)和式(10)代入上式,可以求得备用容量交易价:

$$V_c = \frac{[(E - G)V_{MCP} - S(G)][F(P) + R(kP)]}{[F(E) + R(E - G)]P} \quad (12)$$

由上式可以看出,当能量市场清算价、供电商的固定成本函数和运行成本函数给定时,容量交易价 V_c 是 P 、 G 和 E 的函数。当交易能量 E 和停电量 G 一定时, V_c 随 P 的变化而变化。

上述基于平均利润率的备用容量定价机制,可以真实反映利润驱动的市场投资决策过程,可以保证无论备用容量是否投运都能获得充分的回报,可以根据备用容量价格信号反映系统备用容量需求,体现容量价格和系统可靠性的紧密联系。

4 算例

下面将用简化的发电成本模型和电网公司收益模型分析上述备用容量交易模式和定价机制对系统充裕性和可靠性的影响。

机组运行成本主要是燃料消耗,假设是发电容量的线性单调递增函数:

$$R(P) = r_1 P \quad (13)$$

固定成本与装机容量和机组利用率有关。随着装机容量的增加,固定成本将会大幅度增加。而机组利用率越低,机组生产单位电量的时间越长,固定成本越大。当电量需求为0时,所需装机容量和机组利用率为0。随着电量需求的增加,所需装机容量和机组利用率相应增大,固定成本缓慢增加。当机组利用率趋近于1时,若电量继续增加,则需要更多机组参与发电,固定成本大幅度增加。因此,机组固定成本函数 $F(P)$ 可以描述为:

$$\begin{cases} F(0) = 0 \\ F'(P) \geq 0 \\ F''(P) \geq 0 \end{cases} \quad (14)$$

为简单起见,取固定成本函数为:

$$F(P) = f_1 P + f_2 P^2 \quad (15)$$

其中: f_1 、 f_2 均大于 0。

一般情况下,电网公司用电量越大,收益越多。但是用电量越趋近于用电上限,收益增幅越小。因此,表示电网公司收益函数 $S(P)$ 具有以下特性:

$$\begin{cases} S(0) = 0 \\ S'(P) \geq 0 \\ S''(P) \leq 0 \end{cases} \quad (16)$$

为简单起见,取电网公司收益函数为:

$$S(P) = s_1 P - s_2 P^2 \quad (17)$$

其中: s_1 、 s_2 均大于 0,且 $s_1 > 2 s_2 P_0$ 。

将式 (13)、(15) 和 (17),代入式 (12) 可得:

$$V_c = \frac{[(E - G)V_{MCP} - s_1 G + s_2 G^2](kr_1 + f_1 + f_2 P)}{f_1 E + f_2 E^2 + r_1 (E - G)} \quad (18)$$

设能量市场清算价 $V_{MCP} = 100$ 美元 / MW · h, 交易量 $E = 1\,000$ MW · h, 停电量 $G = 50$ MW · h。求出对应不同参数时容量费用 V_c 的结果如表 1。

表 1 测试结果

Tab 1 Test results

情况	参 数							V_c
	r_1	f_1	f_2	s_1	s_2	k	P	
1	20	10	0.05	500	2.5	0.1	100	16.41
2	10	10	0.05	500	2.5	0.1	100	17.55
3	20	8	0.03	500	2.5	0.1	100	17.39
4	20	10	0.05	600	3	0.1	100	15.60
5	20	10	0.05	500	2.5	0.2	100	18.34
6	20	10	0.05	500	2.5	0.1	200	21.23

注: P 和 V_c 的单位分别为 MW · h 和美元 / (MW · h)

下面以情况 1 为基准,分析模型参数变化(记作情况 2~情况 6,见表 1)对容量价 V_c 的影响。情况 2 和情况 3 分别反映容量供应商的运行成本和固定成本越低,容量价越高。可见,参与容量交易的发电厂生产效率越高,投资回报越丰厚。情况 4 与情况 1 相比,增加了电网公司使用备用容量的收益,容量价随之降低,反映了电网公司容量成本的降低。情况 5 和情况 6 分别增加了备用容量投运的概率和交易的容量,即增加了电网公司对备用容量的需求,结果表明需求增长,容量价也相应上涨。综上所述,该定价机制可以确保容量价正确地响应供需变化,正确指导发电公司投资备用容量,而且,还可以激励发电公司减小生产成本,提高生产效率。

5 结论

本文将容量市场的交易对象定义为备用容量,而不是备用机组的出力,将容量交易与能量交易彻底分开,避免了对能量市场价格信号的干扰。研究结果表明,本文采用的预付费备用容量交易模式可以引导发电公司作出正确的最优备用容量投资决策,既满足电网公司的需求,又避免过量投资。基于平均利润率的定价机制可以激励发电公司投资备用容量。以此制定的容量价格能够正确响应备用容量需求的变化,为发电公司和电网公司提供正确的市场信号,还可以激励发电公司提高生产效率。

参考文献:

- [1] 2003 年国家电网公司系统安全生产情况基本稳定 [J]. 继电器, 2004, 32 (6): 5.
Stable Power Production of State Grid Corporation in 2003 [J]. Relay, 2004, 32 (6): 5.
- [2] 国家信息中心. 2004 年中国电力行业年度报告 [A]. 第七届中国北京国际科技产业博览会. 2004.
State Information Center Annual Report for China Electric Power Industry in 2004 [A]. The Seventh China Beijing International High-tech Expo 2004.
- [3] 文福拴, 吴复立, 倪以信. 电力市场环境下的发电容量充裕性问题 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (19): 16-22.
WEN Fu-shuan, WU Fu-li, NI Yi-xin. Generation Capacity Adequacy in the Deregulated Electricity Market Environment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (19): 16-22.
- [4] Vazquez C, Rivier M, Perez-Arriaga I J. A Market Approach to Long-term Security of Supply [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17 (2): 249-257.
- [5] Rau N S. The Need for Capacity Markets in the Deregulated Electrical Industry—A Review [A]. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting 1999. 411-415.

收稿日期: 2004-06-09; 修回日期: 2004-07-08

作者简介:

易亚文 (1979 -), 男, 硕士研究生, 从事电力市场、电力系统继电保护整定计算及故障管理相关软件技术的研究;
E-mail: eleven_yi@163.com

石东源 (1974 -), 男, 博士, 从事信息化电力系统相关理论及支撑软件技术的研究。

(下转第 36 页 continued on page 36)

精度的特殊要求,注入双频法选线原理比较适合应用于船舶电网,但是选线判据存在不足。本文通过分析其原理,提出了基于工程实践的改进综合判据。在高阻接地时应用双频法选线原理,近似金属接地时采用零序电流幅值相位判据,实际应用中无需改动硬件,选线准确度高,覆盖了工程所需求的接地电阻范围,有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] 杨秀霞,张晓锋,等.基于启发式遗传算法的舰船电力系统网络重构研究[J].中国电机工程学报,2003,23(10):42-46
YANG Xiu-xia, ZHANG Xiao-feng, et al The Study of Network Reconfiguration of the Shipboard Power System Based on Heuristic Genetic Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 42-46
- [2] 郑鹏鹏.小电流接地选线的工程实践与技术探讨[J].电力自动化设备,2003,23(6):82-85
ZHENG Peng-peng Engineering Practices and Discussion

of Weak Current Grounding Wire Selection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(6): 82-85

- [3] 庄劲武,徐国顺,戚连锁,等.双频法在浮地交流电网绝缘故障定位中的应用[J].电力自动化设备,2003,23(6):83-86

ZHUANG Jin-wu, XU Guo-shun, QI Lian-suo, et al Research on Application of Double Frequency Principle to Insulation Fault Location in Earth Free AC System[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(6): 83-86

收稿日期: 2004-05-26; 修回日期: 2004-06-08

作者简介:

杨 锋(1977-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统自动化及安全运行; E-mail: yangfeng_1118@163.com

沈 兵(1961-),男,副教授,主要从事舰船电力系统自动化及稳定运行等方面的教学和科研工作;

庄劲武(1967-),男,副教授,主要从事舰船电力系统安全运行与继电保护方面的教学和科研工作。

Study of fault feeder detection for ship power system with ungrounded neutral

YANG Feng, SHEN Bing, ZHUANG Jin-wu, YE Zhi-hao
(Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: This paper analyzes the shortcomings of the selection method of injecting double frequency currents. By dynamic simulation experiments, maloperation is proved to be existed. After finding its reasons, a new composite criterion is presented and practical measures are put forward, which can meet the requirement of earth fault feeder detection with large scale resistance.

This project is supported by National Natural Science Foundation of Hubei Province (No. 2004ABA026).

Key words: ship power system; injection double frequency currents; fault feeder selection

(上接第 9 页 continued from page 9)

A market trade and pricing approach to reserve capacity

YI Ya-wen, SHI Dong-yuan

(College of Electrical & Electronics Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Reserve capacity contributes to system security and reliability. In electricity market environment, the transaction mechanism and price strategy of reserve capacity is important to direct the act of generators' investment and maintain the balance between its demand and supply. This paper analyses the existed transaction mechanism and discloses their limitations. Then, the paper presents a prepaying transaction mechanism and a price strategy based on average profit margin. With this policy, the commodity is reserve capacity, grid corporation prepays the reserve capacity to generators, and the price of reserve capacity ensures the profit margin of generators in capacity market is the same as that in energy market. As a result, generators will be inspired to invest enough reserve capacity to ensure system reliability and prevent over-investment.

Key words: reserve capacity; system reliability; capacity market; advance payment; average profit margin