

电力市场环境下考虑系统可靠性的备用调度

丁明, 安玲, 齐先军

(合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 电力系统的可靠性与备用辅助服务紧密相关, 旋转备用是备用辅助服务的重要组成部分。以旋转备用的需求为例, 以系统旋转备用的社会效益最大来确定最优备用容量。在竞价出清的模型中加入了可靠性约束, 使得备用容量在满足安全性要求的基础上达到了最优的经济性。文中采用启发式算法求解, 给出了算例及结果, 而且还分析了对可靠性水平影响的一些因素。

关键词: 电力市场; 旋转备用; 系统可靠性; 社会效益

Reserve dispatch considering system reliability in electricity market environment

DING Ming, AN Ling, QI Xian-jun

(School of Electric Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Power reserve ancillary services play an important role in maintaining power system's reliability, while spinning reserve is its important constituent. This paper gives an example of demanding for spinning reserve and proposes determine optimal reserve capacity by maximizing the social benefit of spinning reserve. Reliability restriction is considered in the bidding model, so that reserve capacity meets the requirement of optimal economic efficiency on the basis of satisfying security. By using heuristic method, the results of calculation examples are given and some factors of effecting reliability are gained.

This project is supported by the National Key Basic Research and Development Program (The 973 Program).

Key words: Electricity market; spinning reserve; system reliability; social benefit

中图分类号: TM73; F123.9

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)15-0014-04

0 引言

电力系统中总是要面临可能突然发生的故障和难以预测的负荷随机波动, 为了确保对用户供电的持续性, 电力系统要有一定的备用容量, 来保证系统的安全性和可靠性。一般来说, 备用容量越大, 系统的可靠性就越高。在传统垄断市场的条件下, 系统调度员根据基于电力系统安全性与可靠性考虑的《电力系统技术导则》, 以强制的手段来确定备用, 并不给予补偿。而且完全立足于系统的可靠性考虑, 相对而言, 经济性只是次要因素。

目前我国正在进行电力市场化改革, 维护电力系统的安全可靠运行始终是市场化改革得以顺利进行的必要前提, 可靠性处理不好会直接给系统和市场带来冲击, 甚至对整个社会的稳定带来影响, 最明显的例子莫过于美国加州电力市场的失败^[1,2]。但是在开放的电力市场中, 用户和发电商通过电网来

进行电能的交易, 对买卖双方而言参与市场的目的是追求自身的最大利益, 而决非为了系统的可靠性, 可靠性只是作为可能给他们带来经济利益的一种措施。因此在市场化的条件下需要合理地确定备用容量, 用市场经济的手段来运营备用市场, 使其既能满足系统的可靠性要求, 又能在此基础上实现最优的经济性。本文结合可靠性理论, 基于备用效益分析, 提出了一种新的备用竞价模型, 通过实例计算, 给出了结果。并对算例结果进行了分析, 得到了在电力市场条件下影响电力系统可靠性的一些因素。

1 备用的分类及其需求

1.1 备用的分类

备用的分类目前尚未达成统一的看法。在实际电力市场中^[3], 越来越倾向于将备用分为瞬时响应备用 (AGC)、10min 旋转备用、10min 非旋转备用、30min 备用、60min 备用和冷备用。这种分类方法严密, 简单明了, 可以很方便地将任一种分类囊括在内。这种分类方法能突出备用的最重要特征, 赋予实际操作明确的时间信息, 对备用理论的研究提供

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 资助项目 (2004CB217905)

了明确的量化指标, 在实践和理论上都有重要的意义。

1.2 备用的需求

影响备用需求的因素主要有^[4]: ①系统可靠性、安全性的技术标准, 如在加利福尼亚电力市场, ISO 根据北美电力可靠性委员会 (NERC) 和西部系统协调委员会 (WSCC) 的标准来确定容量; ②备用市场的规则与市场机制; ③在线机组的可靠性; ④最大在线机组的出力; ⑤负荷预测的误差及负荷的变动性; ⑥备用获得的成本, 即备用的供给曲线。本文不考虑负荷预测的误差, 认为负荷的预测是准确的, 在此基础上探讨备用的需求。

现在的电力市场中, 英国的 Pool 模式是较成熟的一种模式。本文所采用的是改进的 Pool 模式^[5], 建立单独的发电辅助服务市场, 各类备用市场依次出清, 以避免传统的 Pool 模式的缺陷。

在以往, 备用需求一般是用确定性方法确定的, 即备用容量等于系统中负荷的某个百分数, 或大于系统中最大的机组容量。这些经验性的方法虽然比较容易实施, 但缺乏理论支持; 并且在不需要额外研究工作的情况下提供了很高的可靠等级, 由于只重视最严重的事故, 结果显得过于保守。使用这种办法必须付出额外的费用。

在电力市场条件下, 经济性和可靠性不再表现为两个独立的数字指标, 可靠性将有机地融入经济性当中, 与经济性相互协调。可靠性与经济性的研究主要是分析可靠性水平的高低与投资、运行成本大小的变化关系, 从而为定量评估可靠性的效益提供一条途径。发电机组的备用容量是保证系统供电可靠性的重要手段, 如何平衡维持或提高可靠性所带来的成本与其带来的社会效益之间的关系即本文所探讨的备用容量的需求研究问题。文献[6, 7]给出了各种备用市场联合调度的模型。文献[8]给出了各种备用市场依次出清的数学模型。因为旋转备用对可靠性的作用较明显, 本文以旋转备用市场的出清为例, 在文献[8]所采用的备用出清模型的基础上进行了一些修改。因为电力市场下的交易比较复杂, 故在模型中加入了可靠性的约束, 以避免频繁的交易和发电商可能的投机行为对系统的安全性和可靠性的影响。在电力市场环境下, 这种出清方式既考虑了购买旋转备用所创造的效益, 还考虑了购买旋转备用的费用, 解决了如何出清备用容量的问题, 又满足了系统可靠性的要求, 并分析了电力市场条件下影响可靠性水平的几个因素。

2 旋转备用市场的需求模型

2.1 旋转备用的需求

旋转备用市场的出清在电能市场之后, 购买旋转备用的目的是提高系统的可靠性, 满足负荷容量的随机需求, 尽量减少事故损失。在旋转备用市场中, 需要体现购买旋转备用的主要目的, 就不仅仅只考虑购买的费用, 还需要考虑因为使用备用提高可靠性而创造的效益。所以备用市场的出清方式不是传统的指令性模式, 而是基于备用的成本效益分析的方法。

本文采用以购买旋转备用的社会效益最大为目标函数的数学模型, 可以充分体现购买旋转备用的目的, 同时通过效益这个指标可以方便地确定备用容量的问题。

系统购买旋转备用所创造的社会效益体现在: 在购买了这部分旋转备用以后, 会提高系统的可靠性水平, 电量不足期望值 E_{ENS} 减少, 从而使用户停电的总成本降低。

购买旋转备用创造的效益可以表示为^[8]:

$$L_R = VOLL \Delta E_{ENS} = VOLL(E_{ENS,0} - E_{ENS,R}) \quad (1)$$

式中: $E_{ENS,0}$ 和 $E_{ENS,R}$ 分别为购买旋转备用前后系统的电力不足期望值; 系数 $VOLL$ 表示每 kWh 电量的停电损失费用。由于各国和各地区每 kWh 的平均产值不同, 因此, 停电损失也不同。一般, 这个停电损失指标通过采用问卷形式的调查研究法得到^[9], 对用户调查结果分类计算, 加权平均。

需要指出的是, 购买备用带来的效益是很难精确评估的, 因为 $VOLL$ 本身是一个估计值, 而且随着我国的国民经济的发展, 这一数值会不断提高, 所以计算的精度将随着对 $VOLL$ 的研究工作的不断深入而逐步提高。

2.2 旋转备用的出清模型

旋转备用的出清模型如下:

$$\max B = VOLL(E_{ENS,0} - E_{ENS,R}) - \sum_{j \in N_G} (R_1, R_2, \dots, R_{N_G}) \quad (2)$$

式中: B 为购买了旋转备用后所创造的社会效益; $F_j(R_1, R_2, \dots, R_{N_G})$ 为购买备用容量的费用函数。

2.3 约束条件

(1) 备用容量约束

$$R_{\min,j} \leq R_j \leq R_{\max,j} \quad j \in N_G \quad (3)$$

式中: $R_{\min,j}$, $R_{\max,j}$ 分别为机组 j 所能提供的备用最小、最大容量; R_j 为机组已中标的备用容量; N_G 为备用机组的组合。

(2) 爬坡率约束

$$R_j \leq 10R_{amp,j} \quad j \in N_G \quad (4)$$

式中: $R_{amp,j}$ 为机组 j 的爬坡速度 (MW/min)。

(3) 可靠性指标约束

$$RI_k \leq RI \quad k = 1, 2, \dots, NS \quad (5)$$

式中: RI_k (Risk Index) 是在 k 时段的系统风险度, 即系统的失负荷概率; RI 是系统的风险度要求。 NS 是总的计算时段数。

在电力市场环境下, 发电商并不会考虑系统的可靠性水平, 他只关注自身利益的最大化。而且在旋转备用市场的出清过程中, 发电厂商有可能采用策略性投标, 这样可能出现某些厂商联合起来共同抬高价格的投机行为, 在严重情况下, 甚至出现所有厂商共同抬价的情况。这样的话, 虽然可以通过减少备用容量在一定程度上抑制投机行为, 但同时系统的可靠性水平也有所降低, 系统的安全性可能受到威胁。所以, 确保系统有一定的可靠性的责任就落在了 ISO 身上, 他必须保证系统运行可靠性和经济性相互协调的同时, 系统有一定的可靠性。在约束条件中加入可靠性约束, 用概率分析的方法确定系统失负荷的风险系数, 调整备用容量的需求。

旋转备用出清的模型可以采用启发式算法求解, 算法步骤如图 1 所示。其他的备用出清与此类似。

3 算例分析

发电厂商在电能市场出清以后进行备用报价, 此时电能市场已经出清, 电能市场出清的容量和出清价都为已知值。以 10 机系统为例, 选取峰荷时段旋转备用的出清为例。在旋转备用市场出清计算中, 系统停电损失费用取为 3.5\$/kWh。图 2 给出了可靠性指标随备用容量变化而变化的曲线。

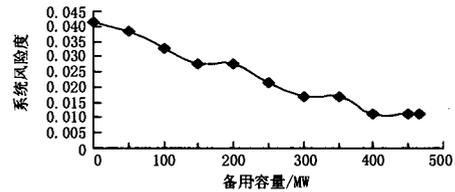


图 2 可靠性指标对备用容量的变化

Fig 2 Reliability index vs reserve capacity

从图 2 可以看出电力系统中可靠性与备用容量有很紧密的关系, 可通过评估可靠性水平与调整备用容量来满足可靠性的要求。

在旋转备用出清过程中, 可靠性约束的出清结果如表 1 所示。

表 1 可靠性约束对旋转备用出清结果的影响

Tab.1 Reliability restriction's effect on spinning reserve clearing result

可靠性约束	出清容量/MW
没有约束	250
≤ 0.02	266
≤ 0.015	367

用户一般对供电的可靠性都有比较敏感的反应, 大部分用户都能够对此提出相应的要求。对 ISO 来说, 可靠性约束中可靠性指标的选择应该能满足用户的最低的要求。

在备用市场中, 有可能出现某些厂商联合起来共同抬高价格的投机行为。在严重情况下, 甚至出现所有厂商共同抬价的情况。为了说明这种情况对备用市场的影响, 本文计算了在峰荷时段的旋转备用市场出清中, 厂商同时提高报价对备用出清的影响, 结果如表 2 所示。

从表 2 可以看出, 对于厂商联合抬价的投机行为, 在本文采用的出清模式中, 可以减少备用的容量来进行自动调节, 这样虽然可以在一定程度上抑

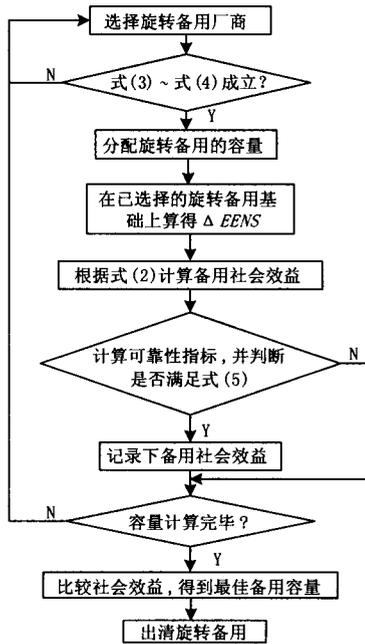


图 1 旋转备用市场出清流程图

Fig 1 Flow chart of the spinning reserve clearing

这样 ISO 作为系统的操作员, 才真正做到了从宏观上把握大局, 监督了备用市场上经济性和可靠性的双重执行。

制厂商的投机行为,但是可靠性水平却降低了,风险度提高了,系统的安全性受到了威胁。加入可靠性约束以后,可以使系统在满足可靠性标准后达到备用的社会效益最大化,实现经济性和可靠性的协调。

表2 厂商共同抬价对旋转备用出清结果的影响

Tab.2 Spinning reserve market clearing result when power plants raise the price together

报价提高倍数/(%)	出清容量/MW	
0	250	0.021 517
10	232	0.023 784
20	171	0.027 826
30	171	0.027 826

在旋转备用出清过程中,单位停电损失费用 $VOLL$ 对结果有较大的影响,表3给出了 $VOLL$ 取值的不同对出清结果的影响。

表3 $VOLL$ 对旋转备用市场出清结果的影响

Tab.3 $VOLL$'s effect on the clearing result of spinning reserve market

$VoLL/(kWh)^{-1}$		RI
1.5	148	0.028039
2.5	170	0.027826
3.5	250	0.021517
5.0	287	0.018080

从表3可以看出, $VOLL$ 取值的不同导致由最大社会效益确定的旋转备用出清容量也有很大的区别,以致于可靠性水平也有很大的差别。所以对于 $VOLL$ 值的选取应该尽量使其精确。我国地域辽阔,经济发展不均衡,按照各电网所在地区的发展情况可以采取不同的 $VOLL$ 值,而且可以根据当地的发展进程合理的修改 $VOLL$ 值。

4 结语

电力系统可靠性一直是人们关注的焦点,电力备用对系统的可靠性起着重要的作用。本文在改进的 Pool 市场模式下对旋转备用的运营问题进行了探讨,基于成本效益分析,建立了最优旋转备用容量出清的竞价数学模型。本文在数学模型中加入了可靠性约束,使得备用容量在满足安全性要求的基础上达到最优的经济性。而且避免了在电力市场条件下发电商为了追求自身的利益而采取投机行为导致系统可靠性水平降低的情况,并且分析了 $VOLL$ 取值的精确度对系统可靠性的影响,得到了影响系统可靠性水平的一些因素。

随着可靠性研究的不断深入,还应该制定更加

适合我国经济发展程度的可靠性指标。可靠性是一个抽象的概念,而将其具体化,增强可靠性评估的可操作性,则需要提出新的适合市场需要的可靠性指标,以指导发电商的市场行为。

备用关系到整个电力市场运行的安全性、可靠性和经济性,应该更深入地开展对备用需求的研究,建立适合我国国情的备用市场机制,为我国建立安全、高效的电力备用市场打下坚实的基础。

参考文献

- [1] 文福拴, David A K.加州电力市场失败的教训[J].电力系统自动化, 2001, 25(5):1-5.
WEN Fu-shuan, DAVID A K. Lessons from Electricity Market Failure in California[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(5):1-5.
- [2] Hpgan W W. Electricity Market Restructuring: Reforms of Reforms[J]. Journal of Regulatory Economic, 2002, 21: 103-132.
- [3] 谭伦农, 张保会, 刘海涛. 市场环境下的备用调度问题研究[J]. 华东电力, 2003, (11):1-4.
TAN Lun-nong, ZHANG Bao-hui, LIU Hai-tao. Reserve Dispatch Under Market Environment[J]. East China Electric Power, 2003, (11):1-4.
- [4] 何永秀, 黄文杰, 谭忠富, 等. 电力备用市场化运营问题研究[J]. 水力发电, 2003, 29(7):7-10.
HE Yong-xiu, HUANG Wen-jie, TAN Zhong-fu, et al. Study on the Marketing Operation Problems of Reserve Electricity[J]. Water Power, 2003, 29(7):7-10.
- [5] 沈瑜, 夏清, 康重庆. 中国电力市场模式的探讨[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(4):6-9.
SHEN Yu, XIA Qing, KANG Chong-qing. A Novel Model for Restructuring of Electric Power Industry in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(4): 6-9.
- [6] Arroyo J M, Conejo A J. Optimal Response of a Power Generator to Energy, AGC, and Reserve Pool-based Markets[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(2): 404-410.
- [7] 李惠娟, 周明, 李庚银, 等. 计及辅助服务的发电市场日交易计划的研究[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(10):5-8.
LI Hui-juan, ZHOU Ming, LI Geng-yin, et al. Research on Daily Trading Plan Considering Ancillary Service in Power Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(10):5-8.

(下转第 27 页 continued on page 27)

结果的傅立叶分析,从理论的角度阐明了整流侧交流故障时直流电压和电流中出现大量二次谐波的原因,这有利于采取相应的保护和控制措施,减小谐波的影响和危害;有助于确保研究交直流并列系统安全稳定运行。

2)交流系统故障如主保护拒动或断路器失灵时,直流系统100 Hz保护可能动作,将引发单回或多回直流系统同时降功率甚至闭锁,对整个电网造成灾难性后果。所以,首先应根据电网结构,研究哪些厂站发生故障可能会对直流输电系统造成重大影响,然后重点加强对其断路器及主保护的运行维护工作,严防误动、拒动;其次,应更合理地设置交直流保护动作时间、优化交直流保护的配合,在发生交流系统故障时,可以尽可能地防止多回直流系统同时降功率或闭锁,又避免对直流设备造成影响。

参考文献

- [1] 袁懋振.南方交直流混合电网的发展与挑战[A].亚太地区IEEE/PES输配电国际会议上的报告[C].2005.
- [2] 浙江大学发电教研组直流输电教研组.直流输电[M].北京:水利电力出版社,1985.
- [3] 郭强,张运洲,吕健.我国未来同步电网构建研究[J].电网技术,2005,29(22):14-18.
GUO Qiang, ZHANG Yun-zhou, LU Jian. Study on Scheme for Structure and Construction of Synchronous Power Grid in China from 2010 to 2020[J]. Power System Technology,2005, 29(22):14-18.
- [4] 杨汾艳,徐政.直流输电系统典型暂态响应特性分析[J].电工技术学报,2005,29(22):14-18.
YANG Fen-yan, XU Zheng. Typical Transient Responses in HVDC Transmission System[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005,29(22):14-18.
- [5] 洪潮,饶宏.南方电网直流多落点系统实时仿真研究[J].中国电机工程学报,2005,25: 29-35.
HONG Chao, RAO Hong. Real Time Simulation Studies of China Southern multi-Infeed HVDC System[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25: 29-35.
- [6] 陈树勇,李新年,余军,等.基于正余弦分量检测的高压直流换相失败预防方法[J].中国电机工程学报,2005,25(14):1-6.
CHEN Shu-yong, LI Xin-nian, YU Jun, et al. A Method Based on the Sin-Cos Components Detection Mitigates Commutation Failure in HVDC[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(14): 1-6.
- [7] 徐政,蔡晔,刘国平.大规模交直流电力系统仿真计算的相关问题[J].电力系统自动化,2002, 26(15): 4-8.
XU Zheng, CAI Ye, LIU Guo-ping. Some Problems in the Simulation of Large-scale AC/DC Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2002, 26(15): 4-8.
- [8] Thio C V,Davies J B,Kent K L. Commutation Failures in HVDC Transmission Systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery,1996,11(2): 946-957.
- [9] Kristmundsson G M,Carroll D P. The Effect of AC Systems Frequency Spectrum on Commutation Failure in HVDC Inverter[J].IEEE Trans on Power Delivery, 1990,5(2): 1121- 1128.
- [10] 天广直流输电工程换流变压器维护手册[Z].1999.
Tian-Guang HVDC Transmission Project Maintenance Manual of Converter Transform[Z]. 1999.
- [11] 黄方能,梁小冰.直流输电系统在交流故障下的谐波分析[J].广西电力,2000,(4): 1-5.
HUANG Fang-neng, LIANG Xiao-bing. The Analysis of Harmonic HVDC System During AC-Side Fault[J]. Guangxi Electric Power, 2000,(4): 1-5.
- [12] 黄方能,梁小冰,顾南峰.天广交直流并联输电系统的谐波分析[J].广西电力,2002,(3): 1-9.
HUANG Fang-neng, LIANG Xiao-bing, GU Nan-feng, et al. Harmonic Analysis in Parallel Operation of TSQ-GBJ HVDC/AC Transmission System[J]. Guangxi Electric Power, 2002,(3): 1-9.

收稿日期:2006-10-30; 修回日期:2007-04-29

作者简介:

张海风(1976-),男,工程师,从事高压直流系统技术管理工作; E-mail:zhanghaifeng@spsc.com.cn

朱韬析(1980-),助理工程师,从事直流输电运行工作。
E-mail:taoxi_zhu@hotmail.com

(上接第17页 continued from page 17)

- [8] 王建学,王锡凡,张显,等.电力备用市场的竞价模型[J].电力系统自动化,2003,27(2):7-11.
WANG Jian-xue,WANG Xi-fan,ZHANG Xian,et al.Bidding model of reserve capacity in electricity market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003,27(2):7-11.
- [9] 曹世光,杨以涵,于尔铿.缺电成本及其估算方法[J].电网技术,1996,20(11):72-74.
CAO Shi-guang,YANG Yi-han,YU Er-keng.Power Outage Cost and Its Estimation[J].Power System

Technology, 1996,20(11):72-74.

收稿日期:2006-12-08; 修回日期:2007-01-31

作者简介:

丁明(1956-),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统安全经济运行、规划、可靠性; E-mail:mingding@mail.hf.ah.cn

安玲(1978-),女,硕士研究生,研究方向为电力市场、电力系统规划及可靠性;

齐先军(1977-),男,讲师,研究方向为电力市场、电力系统规划及可靠性。