

旋转备用辅助服务的需求与调度

曹娜, 曾次玲, 张步涵

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 备用辅助服务关系到电力系统的安全运行和可靠性。旋转备用与能量市场有很强的耦合关系, 其容量需求和调度分配受到了人们的广泛关注。该文采用和能量市场解耦的旋转备用辅助服务模式, 提出了以系统旋转备用社会效益最大的最优备用容量确定原则和基于竞争的备用分配调度模型。文中采用启发式算法求解, 算例的仿真结果说明了该方法的有效性。

关键词: 电力市场; 辅助服务; 旋转备用; 社会效益

中图分类号: TM73; F123.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)21-0013-04

0 引言

备用对电力系统的安全性和可靠性起着重要的作用。电力市场环境下, 备用作为一种辅助服务, 其交易方式与电力市场的运营模式密切相关, 许多发达国家已将备用从电量交易市场中分离出来, 建立独立竞价的备用市场, 使其与电量交易市场并行^[1~4]。

我国目前的发电侧电力市场中, 市场竞争仅存在于能量市场, 没有开辟独立的辅助服务市场。旋转备用是一项能迅速响应系统负荷变化需求的辅助服务内容, 对维护系统的安全可靠有着重要的意义。在发电侧电力市场环境中, 系统的旋转备用容量仍然按传统的确定性方法决定, 其分配调度仍然是指令性的, 即在确定运行方式条件下, 向各厂商安排或指定一定的容量, 在故障情况下, 由运营部门调度下达回复命令, 并在结算时给予一定的补偿。

然而, 在电力市场条件下, 发电厂为各自独立的经济实体, 旋转备用服务本质上应看作是发电商提供的一种商品, 因此需要引入市场机制, 引导市场参

与者积极提供旋转备用服务。从世界各国的电力市场范围来看, 以竞标方式组织旋转备用辅助服务是一种趋势。本文针对我国的实际情况, 提出了基于改进的 Pool 模式的旋转备用交易模型, 对市场环境下旋转备用的容量及调度问题进行了初步的探讨。

1 旋转备用市场与能量市场的解耦

旋转备用包括水电旋转备用和火电旋转备用, 分别指水电机组和火电机组投入运行后同步运行容量中剩余未发电的容量。在竞争的电力市场中, 能量市场的竞争结果决定了机组出力, 而机组出力、机组容量和机组的爬坡速率等因素又影响了机组可提供旋转备用容量的大小, 因此旋转备用市场与能量市场有着很强的耦合关系。

现在的电力市场模式中, 英国的 Pool 模式是应用最早而且比较成熟的一种模式。许多国家和地区参考 Pool 模式建立了自己的电力市场, 如新西兰、澳大利亚、新英格兰等。我国目前的发电侧电力市场类似于英国初期的 Pool 模式。传统的 Pool 模式没有将备用市场和能量市场明确分开, 造成备用容

A new method for optimal allocation of reactive power sources

HU Cai-e, YANG Rerr gang

(College of Information and Electrical Engineering, China Agriculture University, Beijing 100083, China)

Abstract: The concept of network partitioning using "electrical distance" is applied to reactive power allocation. A new method of combining network partitioning and sensitivity to decide the optimal allocation of reactive power sources is presented. With this approach, the reactive power sources can be allocated reasonably and reactive compensation is balanced in every zone. The simulation results indicate that the method is able to search out the optimal allocation of reactive power sources and effective to improve the voltage stability of power systems.

Key words: network partitioning; electrical distance; reactive allocation; voltage stability

量分配和调度任务的不明确,本文采用改进的 Pool 模式,该模式借鉴英国模式和世界上其他国家的改革实践,建立了单独的备用辅助服务市场,在电能市场出清后再进行旋转备用的竞价,实现与电能市场的解耦,以避免传统的 Pool 模式的缺陷^[5]。

2 旋转备用市场需求模型

2.1 旋转备用需求容量的确定

旋转备用市场的出清在电能市场之后,其模式不同于电能市场。电能市场主要是在满足系统约束和机组约束条件下,满足给定负荷容量的需求,其电能需求容量是已定的。而购买旋转备用的主要目的是提高系统的可靠性,满足负荷的随机需求,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,还需要考虑到旋转备用因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,而应该采用根据效益确定最优容量再出清的模式。

本文将旋转备用效益与成本之差定义为旋转备用的社会效益,机组组合调度的目标函数是在满足各类约束的条件下,使社会效益在计算周期内达到最大。

目标函数:

$$\max B = VOLL \times EENS(R_1, R_2, \dots, R_{G_{on,t}}) - p_{r,t} \times R_s \left(\sum_j R_j \right) \quad (1)$$

约束条件:

$$0 \leq R_j \leq R_{j,\max} \quad (2)$$

$$0 \leq R_j \leq 10 \cdot Ramp_j \quad (3)$$

$$\sum_{j \in A(k)} R_j \leq D_{SR,k} \quad k \in NA \quad (4)$$

式中: $G_{on,t}$ 为 t 时段开机机组集合; B 为旋转备用的社会效益; R_j 为第 j 台机组旋转备用容量; $VOLL$ 为系统单位停电损失费用; $EENS(R_1, R_2, \dots, R_{G_{on,t}})$ 为有无旋转备用时系统电量不足期望值的变化量,其值为 $EENS_0 - EENS$; $p_{r,t}$ 为系统旋转备用出清价格; $R_s(\sum_j R_j)$ 为系统旋转备用容量。

式(2)为机组备用容量约束, $R_{j,\max}$ 为第 j 台机组能够提供的最大旋转备用容量。

式(3)为机组爬坡速率约束, $Ramp_j$ 为第 j 台机组的爬坡速度,单位是 MW/min。

式(4)为地区备用容量约束,它考虑了旋转备用的地区分布特性。 NA 为各个地区的集合, $A(k)$ 为地区 k 所有机组的集合, $D_{SR,k}$ 表示各地区需要的最

小备用容量。

以上的优化模型中,目标函数是当系统增加旋转备用后,系统停电损失费用的下降值与旋转备用成本的增加值之差最大,即由旋转备用带来的最大社会效益确定最佳旋转备用容量。决策变量为各机组的旋转备用容量 R_j 。计算确定过程可归纳如下:首先给定旋转备用容量的一个初值,通过旋转备用优化调度把这部分旋转备用容量分配到运行机组中去,运用等效电量函数法^[6]进行两次随机生产模拟,求出 $EENS$,再根据式(1)计算旋转备用社会效益 B ,令旋转备用容量增加,重复上述计算过程,直到所有容量考虑完毕,选择最大的 B 所对应的 $R_1, R_2, \dots, R_{G_{on,t}}$,就是该优化问题的解。

2.2 旋转备用市场的出清

能量市场出清完后,发电商提供备用报价曲线在旋转备用辅助服务市场竞争。在自由竞争的电力市场中,发电商按旋转备用的边际成本报价。在系统运行过程中,旋转备用有投入运行和作为容量储备两种状态,因此其成本包括投运成本和机会成本,但本文所指的电力市场模式是先开辟日前电能市场,电能出清后再开辟旋转备用市场,这种情况下旋转备用容量由在电能市场中未能成功竞标的机组容量提供,其机会成本为零。因此旋转备用可表示为:

$$C(R_j) = LOLP_j \cdot F(R_j) \quad (5)$$

式中 $LOLP_j$ 是系统的电力不足概率,由发电机组和排在机组 j 前的备用机组容量决定,其值可以参考该机组的历史数据; $F(R_j)$ 为旋转备用容量投入前后机组增量成本。

根据边际成本理论,机组提供旋转备用的边际成本为

$$f_j(R_j) = \frac{\partial C(R_j)}{\partial R_j} \quad (6)$$

在理想的旋转备用市场,发电厂商按照备用的边际成本报价提交报价曲线。

旋转备用市场的竞价和电能市场竞争类似,其系统出清价由旋转备用机组中标容量的最高报价决定。记

$$\text{clear}_{r,t} = \max_j \{ f_j(R_j) \}, j \in G_{on,t} \quad (7)$$

$f_j(\cdot)$ 为机组 j 的旋转备用报价函数, $f_i(R_j)$ 为机组提供容量 R_j 相应的报价。

以上模型可以采用启发式算法求解,计算过程的核心是找到由旋转备用社会效益最大决定的最优备用容量,然后按照报价由低到高进行选择。算法步骤如图1所示。

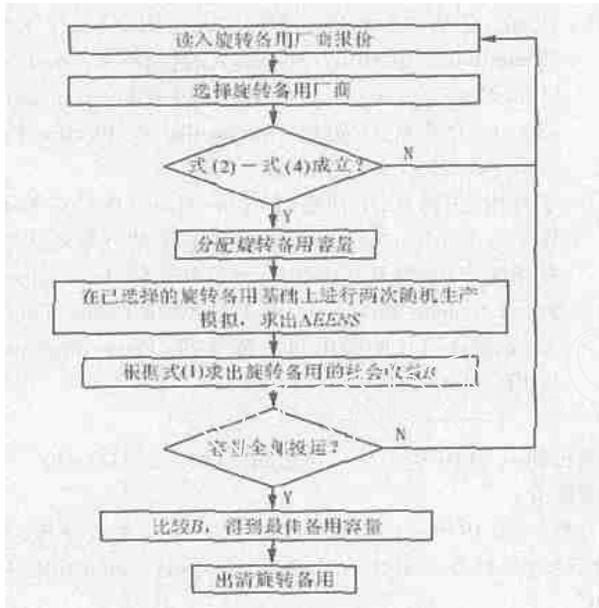


图1 启发式算法框图

Fig. 1 Flow chart of heuristic algorithm

3 算例分析

按照上述计算方法,本文对2000年华中某实际系统进行模拟计算。该系统共有53台火电机组,火电总装机容量915.4万kW;10台水电机组,水电总装机容量130万kW。

旋转备用市场的出清在电能市场之后,在平均负荷(474万kW)时段,在电能市场中,电能的出清电价是234.7元/MW·h。在电能市场出清完后,发电商按照边际成本在旋转备用市场报价。在旋转备用出清计算中,取单位停电损失费用 $VOLL = 12$ 元/kW·h,平均负荷时段旋转备用出清结果如表1所示。

表1 平均负荷时段旋转备用市场出清结果

Tab. 1 Clearing price of the spinning reserve markets at base load

旋转备用容量/MW	出清价/(元/MWh)	$B/(10^3$ 元)
415	85.3	14.3

在算例中,单位损失费用 $VOLL$ 对结果影响较大, $VOLL$ 变化会对旋转备用容量产生影响。表2列出了单位停电费用在 $VOLL$ 取10、20、30、45元/kW·h时旋转备用市场的出清结果。

由表2可以看出由最大社会效益确定的旋转备用容量对单位停电损失费用 $VOLL$ 变化比较敏感,随着 $VOLL$ 增大,为减小停电损失,旋转备用出清容量也增大,相应的出清价格也提高。

表2 $VOLL$ 对市场出清结果的影响Tab. 2 $VOLL$'s effect on the clearing price of the markets

$VOLL$	出清容量 /MW	出清价格 / (元/MWh)	社会效益 B / (10^3 元)
10	455	85.3	43.2
20	559	92.9	65.3
30	609	94.6	77.8
45	637	95.2	82.5

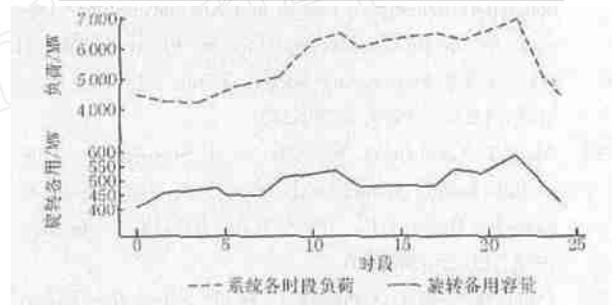


图2 旋转备用市场全天出清结果

Fig. 2 Clearing price of spinning reserve market for whole day

图2给出了某典型日旋转备用市场出清结果,可以看出在不同的时段里旋转备用容量是变化的,其曲线形状和日负荷曲线相关,从而说明在不同的负荷水平下系统所需的旋转备用容量不同。传统系统调度章程规定旋转备用容量不低于最大发电负荷的3%~5%,图2给出的结果显示旋转备用容量均高于这个比例,最高达到负荷容量的11.2%,满足了系统的可靠性要求。相比传统的确定性方法决定旋转备用容量,本文所采用的方法兼顾了系统的可靠性和经济性,满足了系统不同时段的需求,实现资源的有效利用。

4 结论

我国电力市场发展过程中,需要引入市场机制引导市场参与者积极提供备用服务,以便有效地提高系统的安全可靠性,同时可以给双方带来经济效益。本文探讨了在改进的Pool市场模式下旋转备用辅助市场的运营问题,建立了以旋转备用社会效益最大来确定最优旋转备用容量的数学模型,把竞争机制引入旋转备用市场。实际系统的仿真结果表明该方法是有效的。

系统备用包括旋转备用、快速启动备用、冷备用等,本文讨论了和电能市场关系密切的旋转备用辅助服务的交易调度,对其他类型的备用服务没有展开讨论。一个完善的备用辅助服务市场应包括调频市场和各种备用市场,各类备用辅助服务市场之间、

备用辅助服务市场与电量市场之间的综合决策较复杂。合理组织并协调市场、量化备用服务并制定合理的价格、优化系统运行将会是我国电力市场实践面临的难点,这些问题将等待我们进一步的探讨。

参考文献:

- [1] Cheung K W, Shamsollahi P, Asteriadis S, et al. Functional Requirements of Energy and Ancillary Service Dispatch for the Interim ISO New England Electricity Market[A]. IEEE Engineering Society Winter Meeting. New York (USA): 1999. 1. 269-273.
- [2] Alvey T, Godwin D, Ma X W, et al. Security constrained Bid-clearing System for the New Zealand Wholesale Electricity Market[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(2): 340-346.
- [3] Danai B, Kim J, Cohen A I, et al. Scheduling Energy and Ancillary Service in the New Ontario Electricity Market[A]. IEEE Power Industry Computer Applications Conference. Sydney (Australia): 2001. 161-165.
- [4] 美国加州电力市场 (California Electricity Market) [EB/OL]. <http://www.caiso.com>.

- [5] 沈瑜, 夏清, 康重庆 (SHEN Yu, XIA Qing, KANG Chongqing). 中国电力市场模式的探讨 (A Novel Model for Restructuring of Electric Power Industry in China) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2000, 24(4): 6-9.
- [6] 李林川, 王锡凡, 王秀丽 (LI Linchuan, WANG Xi-fan, WANG Xi-ri). 基于等效电量函数法的互联电力系统随机生产模拟 (Probabilistic Modeling for Interconnected Power Systems Based on the Equivalent Energy Function Approach) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 1996, 16(3): 181-184.

收稿日期: 2004-02-07; 修回日期: 2004-03-30

作者简介:

曹娜(1979-), 女, 硕士研究生, 从事电力市场、电力系统运行分析与控制方面的研究; E-mail: peekingirl@163.com

曾次玲(1976-), 女, 博士研究生, 从事电力市场方面的研究;

张步涵(1950-), 男, 教授, 硕士生导师, 从事电力系统运行分析与控制、电力市场的研究。

Demand and dispatch of spinning reserve service for power system

CAO Na, ZENG Ci-ling, ZHANG Bu-han

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

Abstract: Power reserve ancillary services(AS) play an important role in maintaining power system security and reliability. Spinning reserve is deeply relevant to energy market, and its demand and dispatch attract much attention. The paper gives a power reserve AS model of decoupling spinning reserve from energy markets. With this model, optimal reserve capacity can be determined by maximizing the social benefits of spinning reserve service. By using a heuristic method, case studies for real power systems demonstrate usefulness and efficiencies of the proposed model.

Key words: power market; ancillary services; spinning reserve; social benefits

(上接第9页 continued from page 9)

- [5] Wanger T P, Chikani A Y, Hackam R. Feeder Reconfiguration for Loss Reduction: An Application of Distribution Automation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1991, 6(4): 1922-1931.
- [6] Vempati N, Shouly R R, Chen M S, et al. Simplified Feeder Modeling for Load Flow Calculations [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1987, 2(1): 168-174.
- [7] Lo K L, Ng H S. Feeder Simplifications for Distribution Sys-

tem Analysis[J]. Electric Power Systems Research, 1997, 42: 201-207.

收稿日期: 2004-03-01; 修回日期: 2004-05-19

作者简介:

武晓朦(1974-), 女, 博士研究生, 研究方向为配电网自动化; E-mail: jessica93@163.com

刘健(1967-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, IEEE 高级会员, 研究兴趣为电力系统分析、配电网自动化。

Equivalent load density models for feeders based on pulse function

WU Xiao-meng¹, LIU Jian²

(1. Xi'an Petroleum University, Xi'an 710065, China; 2. Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: An equivalent load density model based on pulse function for distribution networks is presented. Eight fundamental load distribution patterns are put forward. By solving the voltage drop function and the power loss function of the feeder line, characteristic values together with the corresponding similarity parameters for the eight load distribution patterns are obtained respectively. Consequently, voltage drop and line loss can be acquired without the data from each load on the feeder line. Examples are also given, and the comparison with other analysis results shows the feasibility of the proposed approach.

Key words: distribution network; mathematical model; load density; power flow calculation; pulse function