

# 一次调频与动态稳定协调优化

徐衍会<sup>1</sup>,王珍珍<sup>1</sup>,翁洪杰<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206;  
2. 广东电网公司电力科学研究院,广东 广州 510080)

**摘要:** 汽轮机调速系统参数设置过于追求一次调频性能会引发电网的低频功率振荡现象,通过调节调速系统参数可实现一次调频性能与动态稳定性的协调优化。运用稳定裕度和上升时间的倒数形成系统动态稳定性与一次调频的综合评价指标,在设置合理参数范围的情况下,引入基于 P 系统的粒子群优化(P-PSO)算法求取最佳评价指标,实现对汽轮机数字电液控制系统的参数优化。时域仿真结果表明,经过协调优化的数字电液控制系统参数既可以保证一次调频性能,又能够确保电力系统动态稳定性。

**关键词:** 一次调频; 稳定性; 汽轮发电机; 调速; 控制; 优化; 数字电液控制系统

**中图分类号:** TM 712

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.07.024

## 0 引言

频率是电力系统安全、优质运行的重要指标之一,我国规定正常运行的电力系统频率应保持在(50±0.2) Hz,有些区域电网甚至要求频率偏差在±0.1 Hz 以内<sup>[1]</sup>。随着 CPS(Control Performance Standard)的实施,电网对发电机组一次调频性能提出了更高的要求。具有间歇特性的新能源发电的不断发展和系统负荷波动的日趋明显,使得电网更加依赖于常规火力发电机组的一次调频能力<sup>[2-4]</sup>。大容量汽轮发电机组广泛采用数字电液 DEH(Digital Electro-Hydraulic)控制器,为了满足电网对发电机组一次调频的要求,有的机组在 DEH 控制器参数整定时过分追求机组的负荷响应速度。

汽轮发电机组 DEH 控制器参数对电力系统动态稳定具有重要影响,不同的调速系统参数可能引入正阻尼也可能导致阻尼恶化<sup>[5-7]</sup>。目前,我国各大区域电网频繁出现低频功率振荡现象,有些机组在有电力系统稳定器投入的情况下依然产生功率振荡<sup>[8]</sup>。研究表明,部分低频功率振荡与汽轮发电机组调速系统密切相关,尤其是 DEH 控制器参数。当过于追求机组一次调频速度时,会导致 DEH 控制器参数设置不当,给机组引入负阻尼,严重时使系统总阻尼由正变负,在扰动下便会发生低频功率振荡。

因此,在整定 DEH 控制器参数时需要将机组一次调频性能与电网动态稳定性进行综合考虑。本文拟研究一次调频与动态稳定协调优化指标,采用基于 P 系统的粒子群优化(P-PSO)算法,对汽轮发电机组 DEH 控制器参数进行协调优化,以同时保证机组

一次调频性能和电网动态稳定性。

## 1 调速系统对动态稳定影响实例分析

由控制理论可知,调速系统 DEH 控制器增益越大,机组一次调频响应速度越快。但是,如果过于追求一次调频速度,可能导致系统动态稳定水平变差。某实际发电机组试验发现,当 DEH 功率回路增益过大时,将会导致系统动态稳定水平变差,如图 1 所示,图中,  $F_x$  为 DEH 功率回路投入状态,0 代表未投入,1 代表投入;  $P_e$  为发电机有功功率。可见,当 DEH 功率控制回路增益较大时,投入 DEH 功率控制回路引起了发电机有功功率低频振荡。

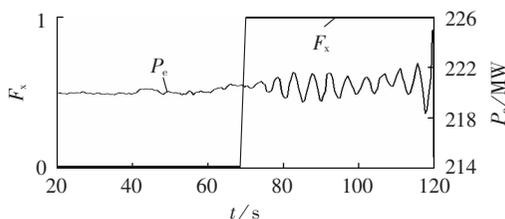


图 1 调速系统引起低频振荡曲线  
Fig.1 Low frequency oscillation curve induced by governing system

## 2 一次调频与动态稳定性指标

### 2.1 动态稳定性指标

电力系统低频振荡属于小扰动稳定范畴,线性化后的系统状态方程表示为:

$$\dot{X} = AX \quad (1)$$

其中,  $X$  为状态变量;  $A$  为系统的状态矩阵。

系统稳定的充分必要条件为状态矩阵  $A$  的特征根实部全部为负。在对系统进行低频振荡分析时,多采用阻尼比的概念,定义为:

$$\zeta = -\alpha / \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \quad (2)$$

收稿日期:2013-08-12;修回日期:2014-06-09  
基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014-MS05)  
Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2014MS05)

其中,  $\zeta$  为对应特征根  $\lambda = \alpha + j\beta$  的阻尼比。

汽轮机 DEH 控制器参数对某些振荡模式的阻尼比影响较大, 一般要求电网主要振荡模式的阻尼比不小于某一数值  $\zeta_0$ ,  $\zeta_0$  一般取 2.5% 或 3%。

## 2.2 一次调频指标

一次调频中当电网频率变化达到一次调频动作值到机组负荷开始变化所需的时间为一次调频的响应滞后时间<sup>①</sup>。该参数反映了系统的一次调频速度, 是描述一次调频性能的重要参数。对应到经典控制理论中, 反映一次调频响应速度的滞后时间即为控制系统响应曲线的上升时间。在对低频振荡进行分析时, 系统多处于欠阻尼模式, 系统响应曲线的上升时间可通过下式计算:

$$t_r = \frac{\pi - \arctan(\sqrt{1-\zeta^2}/\zeta)}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} \quad (3)$$

其中,  $\omega_n$  为自然振荡角频率。

上升时间主要取决于汽轮机时间常数与 DEH 控制器参数, 一般要求  $t_r \leq 3$  s。

## 2.3 协调优化指标

对上升时间表达式进行分析可知, 当系统的自然振荡角频率一定时, 系统的阻尼比越大, 响应曲线上升时间  $t_r$  越大, 系统一次调频速度越慢。而在对系统稳定性进行分析时, 阻尼比越大, 系统的动态稳定性越好。这说明一次调频性能与系统的动态稳定性相矛盾, 需对二者进行协调优化。目标函数要综合考虑一次调频性能和动态稳定水平, 上升时间是一次调频重要指标, 阻尼比为动态稳定重要指标, 由于稳定性为强约束, 采用实际阻尼比与设定阻尼比之差的形式, 本文给出一次调频与动态稳定性协调优化的目标函数为:

$$F = w_1/t_r + w_2(\zeta - \zeta_0) \quad (4)$$

其中,  $w_1$  和  $w_2$  为权重系数。考虑到上升时间和阻尼比的一般取值范围, 取权重系数比值  $w_2/w_1$  在 20~40 之间比较合适。

通过求取目标函数  $F$  的最大值, 可获得同时满足一次调频与动态稳定性能要求的 DEH 控制器参数值, 这个优化问题可采用下述 P-PSO 算法进行求解。

## 3 P-PSO 算法介绍

标准粒子群优化 PSO (Particle Swarm Optimization) 算法起源于生物种群的行为特性, 并用于优化问题的求解。PSO 算法中, 目标函数确定后, 每个粒子根据个体最优值和全局最优值来调整自身的速度和位置。PSO 算法所需设置参数少, 搜索速度快, 且采用实数编码, 可直接用目标函数作适用度函数<sup>[9]</sup>。但是 PSO 算法在计算过程中, 粒子多样性逐渐减小, 易陷入局部最优, 本文采用 P 系统对该算法进行适当

改进, 称为 P-PSO 算法。P-PSO 算法能够在粒子寻优的过程中保持粒子群的多样性, 使粒子具有全局搜索能力。同时还可以精细化搜索, 最终找到最优解。在增加种群多样性的同时, P-PSO 算法需要辅助膜与主膜之间进行信息交互, 与标准 PSO 算法相比增加了算法的复杂性, 使优化时间有所增加, 但影响较小。

P 系统属于膜计算范畴, 分为细胞型、组织型和神经型 3 类, 是欧洲的学者受生物细胞启发提出的<sup>[10]</sup>。本文采用细胞型 P 系统对 PSO 算法进行改进。对 P 系统运算规则可作如下描述:

$$P = (O, T, \mu, (c_i)_{1 \leq i \leq m}, E, (R_{ij})_{(i,j) \in \mu}) \quad (5)$$

其中,  $O$  为对象集, 即字母表;  $T \subseteq O$ , 为输出字母表;  $\mu$  为含有  $m$  个膜的膜结构,  $m$  为系统的度;  $c_i \in O^*$  ( $1 \leq i \leq m$ ) 为各区域中细胞的多重集,  $O^*$  为  $O$  中字符组成的任意字符串的集合;  $R_{ij}$  为进化规则的有限集, 与膜结构  $\mu$  中的区域相关联。

基于 P 系统的分层思想, 将 PSO 算法中的粒子放入生物膜内, 并按功能将膜分主膜和辅助膜<sup>[11]</sup>。其中, 辅助膜有若干个, 负责寻找最优解所在区域; 主膜有 1 个, 负责在所得最优区域内寻找最优解。由 P 系统知, 不同膜内有不同的进化规则。辅助膜内的粒子应尽量扩大搜索范围, 以保持种群的多样性; 主膜内的粒子接收辅助膜的搜索结果, 进行精细化寻优。

本文将 PSO 算法中的粒子分别放入 5 个生物膜内, 其中膜 3、膜 4 和膜 5 为辅助膜, 膜 2 为主膜, 膜 1 用于存放主膜淘汰的粒子。各膜的具体进化规则如下。

a. 膜 3 内粒子执行标准 PSO 算法, 按照式 (6) 和式 (7) 进行速度和位置更新。每进行一次迭代, 膜内的粒子按照适应度进行排序, 将适应度最好的前  $k$  个粒子送到主膜内。

$$v_{ij}^{d+1} = wv_{ij}^d + w_{c1}r_1(p_i^d - x_{ij}^d) + w_{c2}r_2(g_i^d - x_{ij}^d) \quad (6)$$

$$x_{ij}^{d+1} = x_{ij}^d + v_{ij}^{d+1} \quad (7)$$

其中,  $v_{ij}^{d+1}$  和  $x_{ij}^{d+1}$  分别为膜  $i$  内的第  $j$  个粒子在  $d+1$  代的速度和位置;  $w$  为粒子的惯性权重, 取 [0.1, 0.9] 内的常数;  $w_{c1}$  和  $w_{c2}$  分别为粒子跟踪自身历史最优和膜  $i$  内全局最优的权重系数, 通常取 2;  $r_1$  和  $r_2$  为随机函数, 服从 (0, 1) 内的均匀分布。

b. 膜 4 内的粒子按标准 PSO 算法进行迭代, 并按适应度排序, 为找到更好的解, 将适应度最差的  $s$  个粒子重新初始化。然后将所有粒子按适应度重排, 并把前  $k$  个优势粒子送入主膜。

c. 为保证算法的全局搜索能力, 膜 5 引入多样性判别函数:

$$f_{div} = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^M |x_{ij}^d - \bar{x}_i^d| \quad (8)$$

其中,  $M$  为膜内粒子数;  $N$  为粒子维数;  $\bar{x}_i^d$  为膜 5 内

① 南方电监局. 南方电网区域发电厂并网运行管理实施细则. 2008.

粒子的平均值。

$$v_{ij}^{d+1} = w v_{ij}^d - w_{c1} r_1 (p_i^d - x_{ij}^d) - w_{c2} r_2 (g_i^d - x_{ij}^d) \quad (9)$$

膜 5 内的粒子每进行一次迭代,需进行多样性测试,若多样性满足要求,则膜内粒子按式(6)和式(7)进行速度和位置更新。若多样性太小,则按式(9)和式(7)进行更新。与主膜的信息交流和膜 3 相同。

**d.** 膜 2 中的粒子按式(6)和(7)进行速度和位置更新。迭代后,接受辅助膜传来的  $3k$  个粒子。将膜 2 内的所有粒子进行排序,淘汰适应度最差的  $3k$  个粒子送至膜 1,在保证种群的优势粒子数量的同时保持种群规模不变。

P-PSO 算法流程图如图 2 所示。

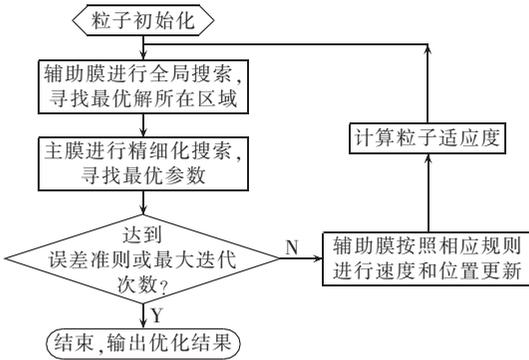


图 2 P-PSO 算法流程图

Fig.2 Flowchart of P-PSO algorithm

### 4 算例分析

以某 600 MW 汽轮发电机为例,系统结构见图 3。

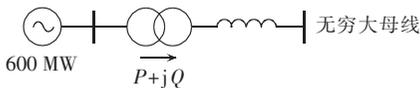


图 3 系统结构图

Fig.3 Structure of grid

汽轮机采用三缸排气、单个再热器,其传递函数模型如图 4 所示。图中,  $\mu_T$  为调节汽门开度;  $p_0$  为主蒸汽压力,一般情况下,  $p_0$  为一定值;  $T_{CH}$  为汽室的时间常数,约为 0.2~0.3 s;  $T_{RH}$  为再热器时间常数,取值为 5~10 s;  $T_{CO}$  为交换器时间常数,约为 0.5 s;  $F_{HP} + F_{IP} + F_{LP} = 1$ ;  $P_m$  为汽轮机输出功率。

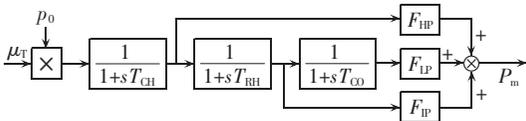


图 4 汽轮机模型

Fig.4 Steam turbine model

DEH 控制系统传递函数如图 5 所示。图中,  $\omega_{ref}$  为转速参考值;  $\omega$  为发电机运行转速; DB 为死区带,取值 0.05%~0.1%;  $\delta$  为调差系数,取 0.03~0.06;  $P_{ref}$  为功率参考值;  $P_e$  为实测功率;  $T_e$  为电液转换器时

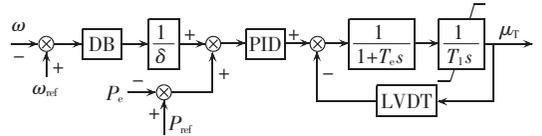


图 5 DEH 控制系统

Fig.5 DEH control system

间常数,约为 0.05 s;  $T_1$  为油动机时间常数,一般取 0.1~0.5 s; LVDT 为线性位移传感器,简化计算时可取为 1;  $\mu_T$  为汽门开度,考虑到汽轮机出力,限幅为 0~1 p.u.。

发电机采用经典二阶模型。包含汽轮机调速系统的单机无穷大系统如图 6 所示。图中,  $H$  为机组惯性时间常数;  $K_s$  为发电机同步转矩系数;  $K_D$  为系统阻尼系数;  $\omega_0$  为同步角速度;  $\Delta\omega$  为角速度变化量;  $\Delta\delta$  为功角变化量;  $\Delta P_m$  为汽轮机输出机械功率变化量;  $\Delta P_e$  为系统有功功率变化量。

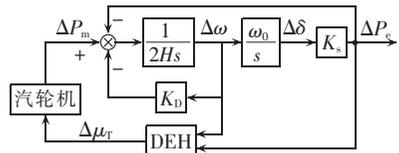
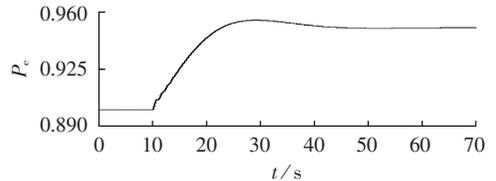


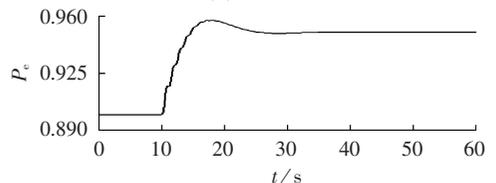
图 6 单机无穷大系统框图

Fig.6 Block diagram of OMIB system

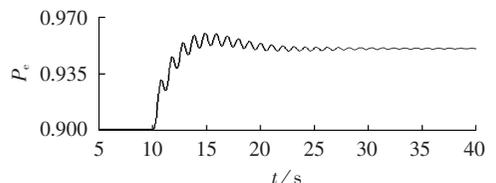
系统的初始输出功率为 0.9 p.u., 在 10 s 时一次调频指令阶跃为 0.95 p.u., 不同 DEH 控制器参数下的发电机有功功率(标么值)曲线如图 7 所示。



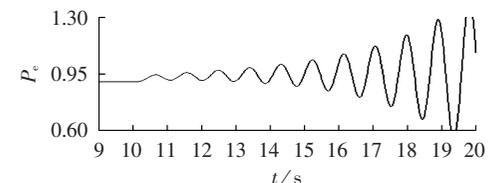
(a) 第 1 组参数下



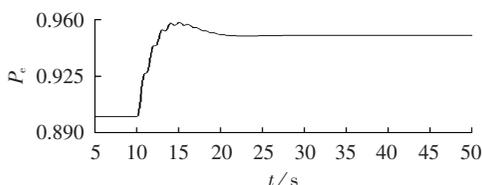
(b) 第 2 组参数下



(c) 第 3 组参数下



(d) 第 4 组参数下



(e) 第5组参数下

图7 不同参数下有功率曲线

Fig.7 Active power curves for different parameter settings

图7所对应的系统一次调频性能与动态稳定性如表1所示。

表1 不同参数下的系统性能

Tab.1 System performance for different parameter settings

组别	$t_r/s$	$\zeta$	组别	$t_r/s$	$\zeta$
1	13.030	0.102	4	失稳	失稳
2	4.710	0.070	5	2.850	0.058
3	2.670	0.018			

表中第1—4组数据为逐渐增大一次调频速度时系统性能,可知一次调频性能的提高是以牺牲系统的动态稳定性为代价的。当过度追求一次调频速度时,甚至会破坏系统动态稳定性,当系统遭受微小扰动时便会引发低频振荡。第1组数据虽然有较大的阻尼比,但一次调频速度过慢,不满足调频要求;第3组数据的一次调频时间小于3s,但是稳定裕度明显低于要求的3%。因此需通过优化汽轮机调节系统参数协调一次调频性能与动态稳定性之间的关系。第5组数据是采用P-PSO算法后所得系统响应值,易见系统总体性能得到了极大的提高。

## 5 结论

一次调频速度与系统动态稳定性是系统正常运行的基本条件。系统的一次调频性能与动态稳定性相矛盾,针对该问题本文提出了汽轮发电机组一次调频与动态稳定协调优化目标函数,并应用P-PSO算法对DEH控制器参数进行了优化。仿真结果表明,DEH控制器参数对一次调频和动态稳定性具有重要影响,经过P-PSO算法协调优化后的DEH控制器参数既能保证电力系统动态稳定性,又能满足一次调频要求。

## 参考文献:

- [1] 郑宝森,郭日彩. 中国互联电网的发展[J]. 电网技术,2003,27(2): 1-3.  
ZHENG Baosen, GUO Ricai. On development of interconnection of power networks in China[J]. Power System Technology, 2003, 27(2): 1-3.
- [2] 马覃峰. 发电机组一次调节性能评价指标的研究[D]. 大连:大连理工大学,2007.  
MA Qinfeng. Research on the index for evaluating the performance of generator unit primary frequency regulation[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007.

- [3] 高林,戴义平,王江峰,等. 机组一次调频参数指标在线估计方法[J]. 中国电机工程学报,2012,32(16):62-69.  
GAO Lin, DAI Yiping, WANG Jiangfeng, et al. An online estimation method of primary frequency regulation parameters of generation units[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 62-69.
- [4] 王蕊,刘肇旭,宋新立,等. 基于Matlab的大型火电机组一次调频特性仿真[J]. 电网技术,2009,33(14):42-46.  
WANG Rui, LIU Zhaoxu, SONG Xinli, et al. Matlab-based simulations of primary frequency control for large thermal generating unit[J]. Power System Technology, 2009, 33(14): 42-46.
- [5] 王官宏,陶向宇,李文峰,等. 原动机调节系统对电力系统动态稳定的影响[J]. 中国电机工程学报,2008,28(34):80-86.  
WANG Guanhong, TAO Xiangyu, LI Wenfeng, et al. Influence of turbine governor on power system dynamic stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(34): 80-86.
- [6] 王官宏,黄兴. 汽轮机调速系统参数对电力系统阻尼特性的影响[J]. 电力自动化设备,2011,31(4):87-90.  
WANG Guanhong, HUANG Xing. Influence of turbine governor parameter on power system damping characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(4): 87-90.
- [7] 张利娟,陈庆国,陈海焱,等. 调速系统恶化阻尼的机理分析及改进措施[J]. 水电能源科学,2005,23(3):9-12.  
ZHANG Lijuan, CHEN Qingguo, CHEN Haiyan, et al. Study on mechanism of damping deterioration induced by turbine governor and the innovative approach[J]. Water Resources and Power, 2005, 23(3): 9-12.
- [8] 王铁强,贺仁睦,王卫国,等. 电力系统低频振荡机理的研究[J]. 中国电机工程学报,2002,22(2):21-25.  
WANG Tieqiang, HE Renmu, WANG Weiguo, et al. The mechanism study of low frequency oscillation in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(2): 21-25.
- [9] 吴峰,陈维荣,李奇,等. 基于粒子群优化算法的PSS参数优化[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(10):53-58.  
WU Feng, CHEN Weirong, LI Qi, et al. Parameter optimization of power system stabilizer on particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(10): 53-58.
- [10] 徐贤,董笑菊. 一种新的组织P系统变体的研究[J]. 计算机科学,2008,35(12):16-19.  
XU Xian, DONG Xiaojie. Analysis on a new variant of tissue P systems[J]. Computer Science, 2008, 35(12): 16-19.
- [11] 杜强,向来生,刘希玉. 基于P系统的粒子群优化算法[J]. 计算机应用研究,2013,30(8):2269-2272.  
DU Qiang, XIANG Laisheng, LIU Xiyu. P system based particle swarm optimization algorithm[J]. Computer Applications, 2013, 30(8): 2269-2272.

## 作者简介:



徐衍会

徐衍会(1978-),男,黑龙江海林人,副教授,博士,主要研究方向为动态电力系统分析与负荷建模(E-mail: xuyanhui23@sohu.com);

王珍珍(1988-),女,河北保定人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统低频振荡;

翁洪杰(1978-),男,福建福州人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统分析与控制。

## Optimal coordination between primary frequency regulation and dynamic stability

XU Yanhui<sup>1</sup>, WANG Zhenzhen<sup>1</sup>, WENG Hongjie<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Source, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080, China)

**Abstract:** The improper parameter setting of steam turbine governing system for emphasizing the performance of primary frequency regulation may cause low frequency oscillation of power grid while the optimal coordination between primary frequency regulation and dynamic stability can be achieved by the proper parameter adjustment. The comprehensive evaluation index of system dynamic stability and primary frequency regulation is formed by the stability margin and the reciprocal of rise time and the P-PSO (Particle Swarm Optimization algorithm based on P system) is applied to obtain the optimal evaluation index within the rational parameter range for the parameter optimization of steam turbine DEH (Digital Electro-Hydraulic) control system. The results of time-domain simulation show that, the optimized DEH parameters ensure both the performance of primary frequency regulation and the dynamic stability of power system.

**Key words:** primary frequency regulation; stability; steam turbine generator; speed governing; control; optimization; digital electro-hydraulic control system

(上接第 138 页 continued from page 138)

## Bidding model considering constraints of water head for pumped storage plant in power market

ZENG Ming, WANG Ruichun, WANG Liang, XUE Song

(Research Advisor Center of Energy and Electricity Economics, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** The optimal unit power output of pumped storage plant for bidding is determined according to the relationship between its water head and energy storage, as well as the maximum and minimum output limits. Based on the assumption that the market clearing price can be forecast, the constraints of the unit participating in power market competition are constructed for the combined mode of day-ahead market, bilateral contract market and ancillary service market. The bidding model of pumped storage unit in the combined market mode is built with the consideration of market risk factors. A chaotic variable is introduced into the ant colony algorithm to improve its local search for solving the bidding model. Case analysis shows that, the pumped storage plant with proper generation schedule and bidding strategy can obtain greater economic benefits in electric power market.

**Key words:** pumped storage; combined market; ancillary service; ant colony algorithm; bidding; electric power market; risks; chaos theory