

# LNG调峰电厂负荷优化分配的应用探讨

彭显刚<sup>1</sup>, 张聪慧<sup>1</sup>, 王星华<sup>1</sup>, 周科<sup>2</sup>, 叶胜<sup>1</sup>

(1. 广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006; 2. 广东惠州天然气发电有限公司, 广东 惠州 516082)

**摘要:** 对于多机组的燃气—蒸汽联合循环调峰电厂, 机组间负荷的合理分配直接关系到电厂运行的经济性。通过对惠州天然气电厂 3×390 MW 机组 DCS 运行数据进行分析, 拟合构建了各机组燃耗特性函数, 提出了在 AGC 指令下结合等微增率法进行机组负荷优化分配方法。计算结果表明, 在机组非额定工况下采用该方法分配负荷的燃耗较单纯采用 AGC 指令分配有一定降低, 可得出更经济的运行组合方式。

**关键词:** 负荷优化分配; 等微增率; AGC; 联合循环电厂

## Application research of optimal load distribution on LNG power plant

PENG Xian-gang<sup>1</sup>, ZHANG Cong-hui<sup>1</sup>, WANG Xing-hua<sup>1</sup>, ZHOU Ke<sup>2</sup>, YE Sheng<sup>1</sup>

(1. Faculty of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;  
2. Guangdong Huizhou LNG Power Co.Ltd, Huizhou 516082, China)

**Abstract:** The optimal load distribution among the LNG combined-cycle power units is directly related to the economy of power plants. On the basis of analyzing the data acquired from the DCS of 3×390 MW power units of Huizhou LNG plant, the real-time characteristic function of each unit's fuel consumption is constructed by curve-fitting, and the distribution strategy that combines AGC with equal incremental method for optimal load distribution is proposed. The calculating results show that the fuel wastage in this mode is decreased compared with AGC mode in the non-rated operating state, and the more economical operation mode can be obtained.

**Key words:** optimal load distribution; equal incremental method; AGC; combined-cycle plant

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)14-0084-04

## 0 引言

随着电力建设速度的加快和国民经济产业结构的调整, 电网的用电负荷峰谷差日益增大。燃气—蒸汽联合循环机组以启停快、安全可靠及调峰能力强等特点, 在电力系统中得到认可并快速发展, 尤其作为两班制调峰运行极大地缓解了电网调峰容量问题。但联合循环机组出力受诸如大气温度、湿度及压比等外界环境的影响较大; 同时作为承担两班制调峰运行的电厂, 机组启停次数多、负荷升降次数频繁、运行不够稳定; 联合循环机组的燃耗特性的离散性较燃煤机组大, 如惠州天然气电厂的三台同型号机组在调峰运行中其燃耗特性存在一定差异。在节能调度要求中, 如何进一步提高燃气联合循环机组的热效率、减少燃气消耗和废气排放, 如

何调整机组运行策略、实现厂级负荷优化分配问题的研究尤为迫切。本文以惠州天然气电厂 3×390 MW 机组运行数据进行分析, 提出在自动发电控制 (AGC) 指令下结合等微增率法进行厂级负荷优化分配, 以解决机组在不同负荷下的组合方案问题。

## 1 LNG 电厂调峰运行时负荷分配

### 1.1 负荷分配方法概述

目前调峰电厂机组出力是由电网调度直接把负荷指令发至电厂机组, 大多采用自动发电控制 (AGC) 方式控制。在这种方式下, 调峰电厂内相同型号的机组出力通常平均分配, 在调度端无法根据各台机组的实际运行情况进行负荷经济分配。为此很有必要对类似于惠州 LNG 调峰电厂只在单机 AGC 指令控制下的厂级负荷优化分配的合理性和经济性作以研究。文献[1-3]提出动态规划法和拉格朗日松弛法, 而这些方法在机组数目较多的情况下无法避免产生“维灾难”问题, 并且在实际中很难

**基金项目:** 广东省教育厅电力节能与新能源技术重点实验室资助项目 (IDSYS200701)

满足严格数学意义上的对偶问题,存在对偶间隙。本文采用的是在工程中比较成熟、经典的等微增率法。

### 1.2 等微增率法基本原理

等微增率法基本原理是:为了使全厂总燃料耗量取极小值,各机组必须以相等的耗量微增率运行,且各机组负荷之和与系统总负荷相等。等微增率法是通过寻找各机组燃耗微增率相等的负荷点,并将该点确定为负荷分配的最优方案。因此,当机组的燃耗微增率不完全相等时,运行人员应减少燃耗微增率大的机组的负荷,增加燃耗微增率小的机组的负荷,这样才能在总的负荷不变的前提下减少总的燃料消耗量,直至所有机组的微增率相等时调整才能结束。它是解决负荷优化分配问题的一种经典方法,它的原理简单,实现方便可靠,当今一直被工程技术人员作为负荷优化分配的首选方法。

### 1.3 基于燃耗特性的等微增率应用流程

设在一电厂内有  $G$  台机组投入并联运行,系统的总负荷有功功率为  $P_D$ ,所谓负荷经济分配就是把此负荷有功功率  $P_D$  合理地分配在  $G$  台运行的发电机组之间而使整个系统的总燃料消耗最小。由于电厂内各机组间的调峰负荷优化分配起主导作用的是微增燃耗率,而不是燃耗率,所以等微增原理可为机组间的负荷优化分配提供可靠的科学依据。而在函数的拟合上,本文采用的二次多项式比幂函数及双曲线型等函数相对简单,主要计算集中在对数据的线性拟合,在工程应用中较为成熟。

总体思路及流程:首先,根据厂方提供的离散的燃耗—负荷之间的数据,用最小二乘法理论来拟合二次多项式的燃耗函数,求解并确切得出函数中各项系数。利用负荷优化模型中的函数关系和约束条件,借助数学中的条件约束下的极值问题的求解,构造 Lagrange 函数,最终得出每台机组的等耗量微增率,即问题的最优解。

## 2 等微增率法在机组间负荷优化分配的实现

### 2.1 LNG 电厂应用负荷分配算法时的基本思路

机组负荷的优化分配,最基本的是对其燃耗特性的拟合。传统的负荷分配所依据的机组燃耗特性曲线,一般由机组制造厂家提供或定期热力试验获得。但对于燃机电厂,随着外部大气压力、湿度等环境、运行方式、设备状态及燃料种类等因素的变化,机组的燃耗特性是不断变化的。为准确获得机组燃耗特性,本文对惠州燃气电厂 3 台机组进行运行数据的实时取样,测点采用电厂分散控制系统

(distributed control system, DCS) 及装置信息系统中现有的测点,在选定工况下(60%~100%出力范围)在线实时地 3 min 提取一次数据,在试验中发现机组燃耗率特征随时间瞬时变化,而机组调峰和运行不可能按照瞬时变化特征不停地调整。

### 2.2 LNG 电厂应用负荷分配算法时的基本做法

a) 运行工况的选择:由于燃气轮机电厂的负荷特性受外界环境因素(如:大气压力、温度、湿度等)影响较大,在不同工况下负荷特性有所不同,所以在比较机组性能时要采样同一条件下的工作状态。

b) 测点数据的选择:燃机电厂多参与电网的调峰任务,实行早启晚停的两班制运行方式,机组在升降负荷功率时燃耗与平稳负荷下燃耗差异较大,如选取 2007 年 7 月 25 日 2# 机组运行数据如表 1 所示。由于气体体积随温度、压强变化而变化,所以必须规定一个标准的温度和压强,才能有可比性地测量气体的体积。这里环境温度 15℃、大气压力  $1.013 \times 10^5$  Pa、空气相对湿度 60%。所以在拟合机组运行的特性函数中,要选取负荷在平稳运行下的采样数据点作为测点。

表 1 机组升降功率燃耗及平稳段负荷的燃耗

Tab.1 Fuel consumption of up-down power and smooth segment load

升功率		平稳段		降功率	
燃耗/ (m <sup>3</sup> n/h)	负荷/ MW	燃耗/ (m <sup>3</sup> n/h)	负荷/ MW	燃耗/ (m <sup>3</sup> n/h)	负荷/ MW
44 144.01	241.31	43 029.92	241.13	43 848.01	241.31
52 961.7	282.63	47 964.34	279.25	48 646.98	287.13
58 726.58	323.38	56 297.55	321.12	56 297.55	321.12
60 167.89	338.38	59 519.69	348.56	56 094.93	332.94
62 067.96	350.56	60 103.35	351	60 413.34	349.69

注: m<sup>3</sup>n/h 为标准立方米每小时的燃气体积

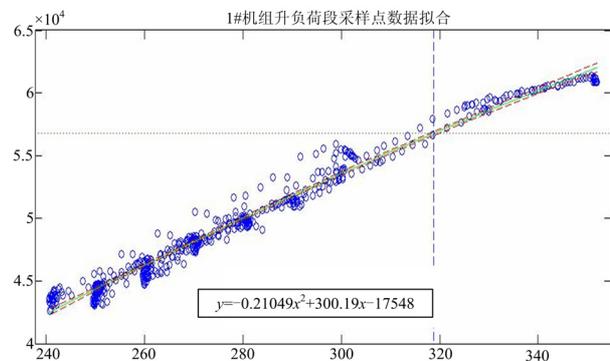


图 1 机组升负荷段采样点数据拟合

Fig.1 Curve-fitting of unit up-load power segment samples point

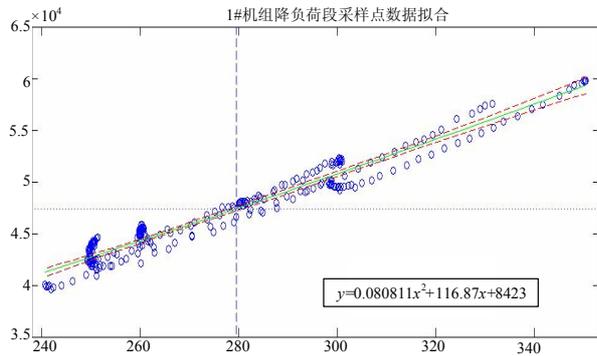


图2 机组降负荷段采样点数据拟合

Fig.2 Curve-fitting of unit down-load power segment samples point

c) 升降功率速率及燃耗: 在燃机电厂中, 机组的升降功率速率对燃耗也有一定影响。如下选择 1# 机在 2008 年 8 月 11 日的日运行数据。在对其升降功率以每 10 s 进行采样拟合后得出如图 1、图 2 所示。

从拟合曲线可以看出, 燃机电厂作为调峰电厂, 实行早开晚停运行方式, 其开机启动后的升负荷相对较为缓慢, 燃耗相对较高; 而降负荷速度较快, 燃耗相对低。

因此, 在一段运行时间内, 本文对机组实时燃耗率特征进行统计, 剔除一些在升降功率时燃耗的不合理测点, 根据经验数据, 利用最小二乘法拟合在不同工况下的机组燃耗和负荷之间的关系。

### 3 等微增率法在机组间负荷优化分配实例分析

对惠州电厂 3 台机组进行实时数据采样, 得出机组燃耗特性函数。根据前面提出方法对机组负荷在不同工况下进行优化分配, 得出机组燃耗量并与电厂 AGC 指令下负荷的燃耗量做比较, 从而得出最优的机组组合及最佳负荷出力。

#### 3.1 实际负荷-燃耗函数拟合

经数据处理后, 对 3 台机组进行组合分配。分别选取两台机组同时开机运行的典型日, 得出机组在不同时期, 即不同外界环境工况下的燃耗特性函数如下:

1#、2#机组在 2007 年 7 月 25 日燃耗函数为:

$$1\#y = 0.11837x^2 + 84.002x + 16725 \quad (1)$$

$$2\#y = 0.12583x^2 + 75.695x + 18274 \quad (2)$$

1#、3#机组在 2007 年 10 月 26 日燃耗函数为:

$$1\#y = 0.058427x^2 + 117.29x + 11904 \quad (3)$$

$$3\#y = 0.12681x^2 + 71.863x + 17860 \quad (4)$$

2#、3#机组在 2007 年 8 月 15 日燃耗函数为:

$$2\#y = 0.0392x^2 + 126.32x + 10331 \quad (5)$$

$$3\#y = 0.084285x^2 + 95.915x + 14071 \quad (6)$$

(注:  $x$  表示机组负荷,  $y$  表示机组燃耗)

#### 3.2 基于等微增率法的负荷分配

由等微增率法可以得出机组在不同负荷工况下的机组负荷分配及燃耗量, 并将其与机组在平稳运行 AGC 指令下的实时燃耗量做比较, 分别如表 2~表 4 所示。

表 2 2007 年 7 月 25 日 1#、2#机组组合等微增率法负荷分配表

Tab.2 1#、2# optimal load distribution with equal incremental method in 25<sup>th</sup> July,2007

负荷/ MW	P1 / MW	P2 / MW	P1 燃耗/ (M3n/h)	P2 燃耗/ (M3n/h)	总耗量/ (M3n/h)	AGC 指令下/ (M3n/h)
480	230.32	249.68	42 351.98	45 017.35	87 369.33	97 011.84
505	243.21	261.80	44 156.13	46 714.54	90 870.67	98 274.51
542	262.27	279.73	46 898.37	49 294.20	96 192.57	98 427.58
600	292.16	307.84	51 370.18	53 500.90	104 871.10	104 935.59
660	323.07	336.93	56 218.70	58 061.97	114 280.70	117 339.50
700	343.68	356.32	59 576.76	61 220.94	120 797.70	122 443.95

表 3 2007 年 10 月 26 日 1#、3#机组组合等微增率法负荷分配表

Tab.3 1# and 3# optimal load distribution with equal incremental method in 20<sup>th</sup> Oct,2007

负荷/ MW	P1 / MW	P2 / MW	P1 燃耗/ (M3n/h)	P2 燃耗/ (M3n/h)	总耗量/ (M3n/h)	AGC 指令下/ (M3n/h)
480	206.31	274.17	38 589.16	47 095.05	85 684.21	85 518.81
491	213.21	277.35	39 568.08	47 546.09	87 114.16	88 041.39
500	219.90	280.43	40 521.81	47 985.51	88 507.33	87 778.98
600	288.47	312.02	50 600.09	52 629.02	103 229.10	103 538.45
651	323.27	328.06	55 926.24	55 083.02	111 009.30	111 040.91
701	356.96	343.58	61 217.06	57 520.73	118 737.80	119 029.83

表 4 2007 年 8 月 15 日 2#、3#机组组合等微增率法负荷分配表

Tab.4 2# and 3# optimal load distribution with equal incremental method in 15<sup>th</sup> Aug,2007

负荷/ MW	P1 / MW	P2 / MW	P1 燃耗/ (M3n/h)	P2 燃耗/ (M3n/h)	总耗量/ (M3n/h)	AGC 指令下/ (M3n/h)
480	204.81	275.63	37 847.09	46 910.70	84 757.80	85 095.22
522	233.01	288.74	41 893.58	48 792.68	90 686.26	90 542.94
601	287.13	313.91	49 833.28	52 485.35	102 318.60	102 528.50
649	320.12	329.26	54 786.23	54 788.91	109 575.10	109 568.58
699	354.14	345.08	59 981.89	57 205.35	117 187.20	117 223.64

优化组合结果表明:

(1) 由表 2 可以看出,当 1#、2#机组稳定运行在 240 MW 以上的组合运行,在不同负荷工况下用等微增率法的燃耗量都明显优于电厂 AGC 控制下的燃耗量,这将对电厂的经济运行有参考价值。

(2) 从表 3 和表 4 可以看出,1#、3#机组组合,2#、3#机组组合时,在不同负荷工况下,同样得出了用等微增率法较 AGC 控制模式在部分负荷下节约燃耗量。1#、3#机组在低负荷运行时,不产生优化效果,当负荷稳定运行在高负荷时较 AGC 控制模式下将有不同程度的燃耗节约。2#、3#机组也同样在高负荷稳定运行时有优化效果。所以,对燃机电厂的负荷优化分配,不仅要采取合理的算法,更要尽量提高机组稳定运行基准值,才能更好地实行电厂的负荷经济优化运行。

#### 4 结论

本文详细论述了惠州燃气电厂应用等微增率法的负荷优化分配模型并进行了实例分析,为燃气电厂在满足电网需求的同时能以较低的燃耗量运行提供了一种可行的参考方法,建议燃气电厂建立厂级监控信息系统(SIS),利用 SIS 平台下的实时负荷优化分配功能,对其进行实时负荷燃耗计算,选取最优分配算法,可进一步降低全厂燃耗。在机组间的组合运行时,尽量提高机组稳定运行总功率值,由本文分析可知,机组在高负荷运行时采用等微增率法分配负荷较之电网 AGC 单机控制运行分配负荷,将在不同程度上达到了节约燃耗的优化效果。

#### 参考文献

- [1] 万文军,周克毅,胥建群,等.动态系统实现火电厂机组负荷优化分配[J].中国电机工程学报,2005,25(2):128-132.  
WAN Wen-jun, ZHOU Ke-yi, XU Jian-qun, et al. Dynamic system on economic dispatch among thermal power units[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(2): 128-132.
- [2] Guan X, Luh P B, Zhang L. Nonlinear approximation method in Lagrangian relaxation-based algorithms for hydrothermal scheduling[J]. IEEE Trans on PWRS, 1995, 10(2): 245-252.
- [3] 曹文亮.热力发电厂机组负荷优化分配的研究(硕士学位论文)[D].保定:华北电力大学,2003.
- CAO Wen-liang. Study on the optimized load distributed of power plant unit, thesis[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2003.
- [4] 王治国,刘吉臻,谭文,等.基于快速性与经济性多目标优化的火电厂厂级负荷分配研究[J].中国电机工程学报,2006,26(19):88-94.  
WANG Zhi-guo, LIU Ji-zhen, TAN wen, et al. Multi-objective optimal load distribution based on speediness and economy in power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19): 88-94.
- [5] 叶剑斌.电力市场环境计及 AGC 的机组组合问题[D].杭州:浙江大学,2003.  
YE Jian-bin. Take into accounting the problems of AGC unit combination in ancillary market [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.
- [6] 吴海波.电力市场下 AGC 机组调配理论研究[D].大连:大连理工大学,2003.  
WU Hai-bo. Research on allocation of AGC unit in auxiliary market[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003.
- [7] 马晓茜,王毅,廖艳芬.火电厂机组负荷优化调度软件系统的设计与实现[J].华南理工大学学报,2006,34(6):116-120.  
MA Xiao-qian, WANG Yi, LIAO Yan-fen. Design and implementation of optimized dispatching software system for unit load in thermal power plant[J]. Journal of South China University of Technology, 2006, 34(6):116-120.
- [8] 诸纪新,叶青.引进型 300 MW 机组参与两班制运行的可行性[J].华东电力,2004(2):8-10.  
ZHU Ji-xin, YE Qing. Analysis of 300 MW units adaptability to two-shift operation[J]. East China Electric Power, 2004(2): 8-10.
- [9] 韩中合,田松峰,马晓芳.火电厂汽机设备及运行[M].北京:中国电力出版社,2002.
- [10] 张保衡.大容量火电机组调峰运行的寿命管理[M].北京:水利电力出版社,1998.

收稿日期:2009-08-13; 修回日期:2009-09-25

作者简介:

彭显刚(1964-),男,副教授,主要从事电力系统优化运行方面的研究;E-mail: epxg@gdut.edu.cn

张聪慧(1984-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统运行分析与控制;

王星华(1972-),男,讲师,主要从事电力系统优化运行方面的研究。