

# Study and Practice of Large Heating Units Deeply Involved in Peak-Load Regulation Capacity of Power Network

Chunguang Tian<sup>1</sup>, Lisen Chu<sup>1</sup>, Xiangyu Lv<sup>1</sup>, Tian Dong<sup>1</sup>, Dexin Li<sup>1</sup>, Xiaojuan Han<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Electric Power Research Institute, Jilin Electric Power Company Limited of State Grid, Changchun

<sup>2</sup>School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing

Email: [xlz5859@sina.com](mailto:xlz5859@sina.com)

Received: Dec. 27<sup>th</sup>, 2013; revised: Jan. 16<sup>th</sup>, 2014; accepted: Jan. 24<sup>th</sup>, 2014

Copyright © 2014 Chunguang Tian et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2014 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Chunguang Tian et al. All Copyright © 2014 are guarded by law and by Hans as a guardian.

**Abstract:** In allusion to the serious capability inadequacy of peak-load regulation of power network during the heating seasons in north China, by making use of the basic theory of equivalent enthalpy drop method, a theoretical model is derived for the peak-load regulation capacity from large units during the heating period. Then based on it, the peak-load regulation capacity minimal load and maximal load of every large heating unit in different heating loads were obtained by field tests and the application models were established by polynomial fitting method which supplied theoretical basis and technical support for the large heating units deeply involved in peak regulation of power network. The accuracy and validity of the method are confirmed by the application in Jilin power grid.

**Keywords:** Large Heating Units; Peak-Load Regulation Capacity; Theory Model; Application Model; Equivalent Enthalpy Drop Method

## 大型供热机组深度参与电网调峰能力的研究与实践

田春光<sup>1</sup>, 初立森<sup>1</sup>, 吕项羽<sup>1</sup>, 董添<sup>1</sup>, 李德鑫<sup>1</sup>, 韩晓娟<sup>2</sup>

<sup>1</sup>国网吉林省电力有限公司电力科学研究院, 长春

<sup>2</sup>华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京

Email: [xlz5859@sina.com](mailto:xlz5859@sina.com)

收稿日期: 2013年12月27日; 修回日期: 2014年1月16日; 录用日期: 2014年1月24日

**摘要:** 针对我国北方寒冷地区冬季供暖期电网调峰能力严重不足的现状, 以研究大型供热机组供暖期调峰能力为目的, 根据等效热降理论得出供热机组调峰能力理论模型; 以此为基础, 本文采用现场试验核定的方法确定电网内每台供热机组不同抽汽供热量时机组所对应的调峰高限负荷和调峰低限负荷, 采用多项式回归方法建立相应的调峰能力实际应用模型, 为大型供热机组深度参与电网消纳风电提供理论依据和技术支持。在吉林省电网的应用也证明了模型的正确性和有效性。

**关键词:** 大型供热机组; 调峰能力; 理论模型; 实际应用模型; 等效热降法

### 1. 吉林省电源结构及电网调峰的现状

吉林省地处我国北方寒冷地区, 随着电力体制改革, 厂网分开, 在吉林省集中投产了一批以国产 200

MW、300 MW 等级供热为主的大型热电联产机组, 再加上原有少量的小型供热机组和原有的纯凝机组通过技术改造成为热电联产机组, 使得热电联产机组的比

重越来越大,到2009年底,吉林省电源结构见表1。

从表1中可知,供热机组装机容量占总装机量的48.61%,而在电网调峰方面,2009年冬季电网出现的最高负荷为6906 MW,还不到火电机组容量的66.6%,最低负荷是3140 MW,仅占火电装机容量的22%。这些数据表明吉林省电网用电负荷的峰谷差很大,特别是在夜间低谷期,全省平均负荷率非常低。而对于供热机组而言,在冬季供热期间“以热定电”政策约束下<sup>[1]</sup>,由于调度中心缺少对供热机组热负荷必要的监测手段和调度依据,采暖期间供热机组始终保持着较高的发电负荷率运行,使得吉林省电网调峰负荷调度陷入困境,甚至发生过为了满足电网调峰的需求,不得不采取风电机组全部停运以及部分供热机组限热调峰的情况。

电网调峰运行事关电网安全运行,冬季采暖供热事关民生稳定,吸纳风电负荷事关国家节能减排大政方针的贯彻落实<sup>[2-6]</sup>。从电源结构构成分析,当前能够挖掘调峰潜力的只有火电机组,而火电机组中供热机组比例偏大,因此研究和挖掘大型供热机组参与电网深度调峰潜力,有利于保障电网安全、稳定、高质量运行,同时又能确保全网供热机组供热质量和能源消耗降至最低,为吸纳风电等清洁能源提供必要的容量空间,为节能减排创造必要的客观条件。

因此,研究基于实际热负荷来确定供热机组“以热定电”的电负荷可调整区间,并以此为基础研究供热机组的深度调峰,提高风电等清洁能源设备的利用率,提高全网发电节能经济运行,对实现国家节能减排总体目标具有十分重要的现实意义。

## 2. 大型供热机组类型

目前,在吉林省电网内承担供热任务的大型供热机组主要是200 MW级16台,300 MW级20台,均为单抽供热机组。这些供热机组有两个来源:一是制造厂专门设计制造的机组,二是在原纯凝机组的基础上改造而成的供热机组。根据统计,其供热抽汽位置先后都改为在中低压缸连通管上开孔,安装蝶阀CV在抽汽管道上安装抽汽控制阀(EV阀)以调节对外供热抽汽量的方式供热,机组热力系统如图1所示。

根据热用户的要求提供压范围为0.2~1.15 MPa的采暖用汽。运行控制过程,主要通过控制采暖抽汽压力来保证机组的安全以及供热与发电两种生产的

Table 1. The power source structure in Jilin province (end of 2009)  
表1. 吉林省电源结构(2009年底)

项目	数量(MW)	占比(%)	
总装机	15983.7		
火电	供热机组	7769.5	48.61
	凝气机组	2671.5	16.71
水电	3897.4	24.38	
风电	1526.3	9.55	
其它	119	0.75	

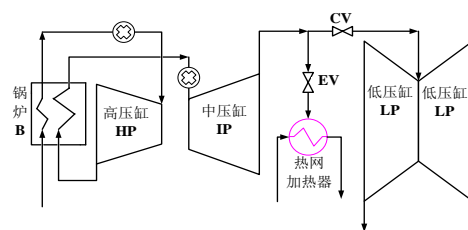


Figure 1. Single-exhaust heating unit thermal system  
图1. 单抽供热机组热力系统

匹配,采暖抽汽压为分缸压力,虽有中低压缸连通流量控制阀(CV)和采暖抽气控制阀(EV阀)可以进行联合调整,但受中压缸末级叶片及低压缸特性的限制,热、电负荷可变范围有限。因此运行过程中,为了保证机组的安全,对主要运行点都进行了安全性限制<sup>[1]</sup>。

## 3. 大型供热机组在风电消纳中的能力模型

不同类型的供热机组,若利用厂家提供的设计“工况图”对其在风电消纳中的能力范围进行核定,由于设计“工况图”是制造厂按照特定参数边界条件如额定主汽参数、额定抽汽压力等制定的,而在实际运行工况中,上述条件是变化的;并且,设计“工况图”的制定尚未系统考虑机组其它限制条件,如锅炉最低稳燃负荷问题,汽动给水泵要求的最低进汽压力等问题。因此,本文为了真实反映大型供热机组在风电消纳中的能力范围,以“等效热降”理论为基础,采用现场试验方法,以试验结果校核修正限制条件,对省内所有大型供热机组在风电消纳中的能力范围开展试验研究,核定深度调峰能力范围指导区间。

### 3.1. 理论模型

无论哪种抽汽供热方式,在机组系统和参数确定后,其参量也随之确定,并通过计算以参数的形式给出。大型供热机组在相应的供热负荷下,利用改进等

效热降法建立相应的数学模型<sup>[6]</sup>，通过改变新蒸汽参数，确定机组的供电负荷。即在相应的供热负荷、不同的新蒸汽参数下，可通过等效热降法<sup>[7]</sup>计算出机组可调出力区间。

### 3.1.1. 单抽大型供热机组等效热降数学模型

$$N_{fd} = (G_{zq} \times H_{zq} - G_{cn} \times H_{cn}) / 3600 \quad (1)$$

式中： $N_{fd}$ ——机组发电功率，MW； $G_{zq}$ ——主蒸汽流量，t/h； $H_{zq}$ ——新蒸汽做功能力，kJ/kg； $G_{cn}$ ——供热抽汽量，t/h； $H_{cn}$ ——供热抽汽做功能力，kJ/kg。

在公式(1)中， $N_{fd}$ 、 $G_{zq}$ 数值通常可通过三种方法确定：一种是选用设计值，计算结果扣除2%机组各项损失；第二种方法是机组性能试验， $N_{fd}$ 、 $G_{zq}$ 修正到额定参数数值；第三种方法是机组凝汽工况运行时，在设计条件下现场实测数值。本文考虑到现场实际应用和表计问题，采取第三种方法确定。

### 3.1.2. 主汽流量 $G_{zq}$ 确定

对于300 MW以下机组，其设计上有主蒸汽流量测量装置，可以利用机组性能试验结果对DCS中主蒸汽流量进行修正，保证所取机组主汽流量的准确。由于300 MW及以上机组在设计上没有主汽流量测量装置，原DCS上显示的主蒸汽流量都是以调节级后压力为准按照弗留格尔简单计算得出的，和按照热力试验标准测量推算值有很大偏差，因此利用热力试验数据对DCS显示主蒸汽流量计算公式进行了必要修正，确保调峰功率计算精度满足需要。

### 3.1.3. 新蒸汽做功能力 $H_{zq}$ 确定

$$H_{zq} = N_{fd} / (G_{zq} \times 3600) \quad (2)$$

### 3.1.4. 供热抽汽量 $G_{cn}$ 确定

供热抽汽量确定通常有二种方法，一是“直接测量方法”——通过测试热网疏水量，等值于汽轮机采暖抽汽量 $G_{cs}$ ；二是间接方法即“热网加热器”热平衡方法：

$$G_{cs} = [G_{gs} (h_2 - h_1)] / [(h_{cn} - h_{ss}) \times \eta_{rw}] \quad (3)$$

公式(3)中， $h_2$ 、 $h_1$ 分别是热网加热器水侧出口焓值和入口焓值(kJ/kg)，根据现场测定的热网加热器压力和进出口温度查水蒸气表确定； $h_{cn}$ ——抽汽焓值(kJ/kg)，通过测定采暖抽汽压力、温度查水蒸气表确定； $G_{gs}$ ——热网加热器供水流量(t/h)，测定； $h_{ss}$ ——

热网加热器疏水焓值，根据抽汽压力或者抽汽压力和疏水冷却器出口水温查水蒸气表确定； $\eta_{rw}$ ——热网加热器效率，通常取值为98%。根据(3)式计算出热网疏水流量 $G_{ss}$ ，即是采暖抽汽量 $G_{cn}$ 。

### 3.1.5. 供热抽汽做功能力 $H_{cn}$ 确定

供热抽汽做功能力确定，一是在不具备现场试验测试条件时，采用制造厂热力特性说明书相应工况数据计算得到。二是通过应用等效热降能量平衡方程式计算得到。

根据公式(1)可知，在机组运行条件不变情况下，单位采暖抽汽量变化影响发电功率的变化量即供热蒸汽做功能力：

$$H_{cn} = \Delta N_{fd} / (3600 \times \Delta G_{cn}) \quad (4)$$

式中： $\Delta N_{fd}$ ——发电功率在线监测数据，MW； $\Delta G_{cn}$ ——供热抽汽量在线监测数据，t/h。

## 3.2. 大型供热机组在风电消纳中的能力 $\Delta N_{df}$ 模型

大型供热机组在风电消纳中的能力是指在同一供热负荷下，机组在风电消纳中的高限负荷 $N_{max}$ (机组调峰高限负荷)与机组在风电消纳中的低限负荷 $N_{min}$ (机组调峰低限负荷)的差值 $\Delta N_{df} = N_{max} - N_{min}$ 。当 $\Delta N_{df} = 0$ 时，此时机组调峰能力为0，即不能参与调峰，也就是此时发电量 $N_{fd} = N_{min}$ 。

### 3.2.1. 机组调峰最高限负荷 $N_{max}$ 的计算

由于供热抽汽量随环境温度改变而产生变化，这样预测的机组高限负荷也将发生变化。计算高限值，有两个限定条件：一是汽轮机允许最大进汽量，通常采用制造厂热力特性说明书给出的最大连续出力工况下主汽流量；也可按夏季机组铭牌出力工况下主汽流量做为冬季汽轮机供暖期间最大进汽量。二是机组高限负荷依据省调中心提供的有关数值为限，计算结果不应超出规定值。

$$N_{max} = (G_{max} \times H_{zq} - G_{cn} \times H_{cn}) / 3600 = f(G_{cn}) \quad (5)$$

公式(5)中： $N_{max}$ ——机组调峰高限负荷，MW； $G_{max}$ ——机组铭牌出力主汽流量，t/h；其它符号意义及单位同上文。

### 3.2.2. 机组调峰最低限负荷 $N_{min}$ 的计算

根据供热机组热力特性得知，在一定供热量的情

况下,最低电负荷出现在低压缸满足最小冷却流量,主蒸汽流量最低的条件下的运行工况,这时抽汽调节蝶阀开度应该在最小开度位置,低压缸排汽温度略有回升迹象,此外,还应考虑最低主蒸汽流量不应低于锅炉不投油最低稳燃负荷蒸发量。

$$N_{\min} = (G_{\min} \times H_{zq} - G_{cn} \times H_{cn}) / 3600 = f(G_{cn}) \quad (6)$$

公式(6)中:  $N_{\min}$ ——机组调峰低限负荷, MW;

$G_{\min}$ ——满足供热条件最低主汽流量, t/h。

#### 4. $N_{\max}$ 、 $N_{\min}$ 和 $\Delta N_{\text{f}}$ 试验核定案例

供热机组高、低限负荷方程的建立,给大型供热机组在风电消纳中的能力试验提供了理论基础。

##### 4.1. 核定试验原则及步骤<sup>[8]</sup>

1) 保证机组供热量不变,逐渐增加机组进汽量直至锅炉最大连续蒸发量,同时调整中低压缸联通管蝶阀开度保持机组供热量不变,此时负荷即为机组高限负荷。

2) 保证机组供热量不变,逐渐减少机组进汽量直至锅炉最低稳燃蒸发量(或达到低压缸排汽温度略有回升),此时负荷即为机组低限负荷。

3) 在试验调整过程中,如机组负荷已经达到电网核准容量,就不再增加汽轮机进汽量,此时负荷即为机组高限负荷;出于对机组安全方面考虑,如机组中、低压缸联通管蝶阀开度已关至 20% 时,或负荷已经降至 100 MW 时,就不再对机组进汽和采暖抽汽进行调整,此时负荷即为机组低限负荷。

4) 改变机组供热量,重复上述试验测试步骤,分别对机组不同抽汽工况高、低限负荷进行测试。

##### 4.2. 案例

某热电厂 1# 国产 C300—16.67/0.379/538/538 供热机组,按 4.1 的原则及步骤进行了现场核定,主要结果详见表 2,根据表 2 数据绘制了图 2。

采用多项式进行回归,得到该机组的调峰能力实际应用模型:最低限负荷:

$$N_{\min} = 178.09 - 0.533G_{cn} + 0.00343G_{cn}^2 - 3.91 \times 10^{-6}G_{cn}^3 \quad (7)$$

最高限负荷:

$$N_{\max} = 329.27 - 0.0772G_{cn} + 0.00041G_{cn}^2 + 4.764 \times 10^{-7}G_{cn}^3 \quad (8)$$

Table 2. The extraction capacity and load relationship of a thermal power plant unit 1

表 2. 某热电厂 1 号机组抽汽量与负荷关系

序号	抽汽量 $G_{cn}$ (t/h)	最低限负荷 $N_{\min}$ (MW)	最高限负荷 $N_{\max}$ (MW)	$\Delta N_{\text{f}}$ (MW)
1	0	178.57	329.29	150.72
2	100	155.71	317.86	162.15
3	114.3	152.86	315.82	162.96
4	200	181.43	301.43	120
5	300	218.57	282.14	63.57
6	400	263.57	263.57	0

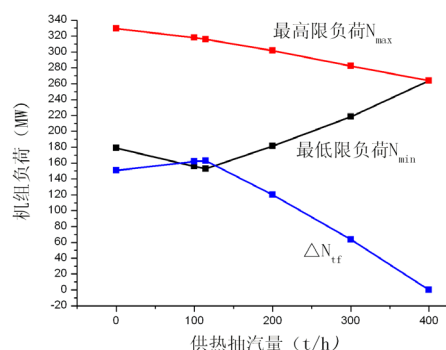


Figure 2. The relationship between  $N_{\min}$ ,  $N_{\max}$  and  $\Delta N_{\text{f}}$  with  $G_{cn}$

图 2. 机组  $N_{\min}$ 、 $N_{\max}$  和  $\Delta N_{\text{f}}$  与  $G_{cn}$  间关系

因此,在已知机组供热抽汽流量  $G_{cn}$  的情况下,由式(7)和式(8)可以得出该机组科学的电负荷可调整区间。

#### 5. 实际应用

在 2009 年 2 月至 4 月初,分别对省内部分不同类型供热机组采用案例的原则和数据处理模式,在不同的  $G_{cn}$  下核定了  $N_{\max}$  和  $N_{\min}$  (不能为试验提供更多供热抽汽工况的机组,利用供热机组调峰特性方程进行推算,待机组供热量增加后再进行必要的试验验证),得到每台机组的调峰负荷实用模型,以此开发了“吉林省供热机组在线实时监测及辅助决策系统”并在吉林电力调度通信公司使用。系统的投入满足了供热机组监测及调度工作的需要,在缓解电网调峰压力、提高电网稳定性、增强电网接纳风电容量等方面发挥了应有的作用。以 2010 年 1 月中旬为例,现调度方式与相同供热量条件下原调度方式低谷负荷对比如表 3 所示。由表 3 数据可知,供热机组现调度方式与以往调度方式相比,能够挖掘出约 411 MW 的负荷用于



**Table 3. The comparison table of unit load limit between old power grid scheduling and new power grid scheduling (section)**  
**表 3. 原调度方式与现调度方式调度下限对比表(部分)**

序号	机组名称	采暖抽汽量(t/h)	原运行负荷(MW)	现运行负荷(MW)	可再分配负荷(MW)
1	A厂1#机	300-310	155.83	144.31	11.52
2	A厂2#机	300-310	155.01	144.31	10.7
3	A厂3#机	190-200	150.00	100.98	49.02
4	A厂4#机	300-310	151.25	144.36	6.89
5	A厂5#机	280-290	157.92	148.01	9.91
6	B厂1#机	180-190	224.03	186.17	37.86
7	C厂1#机	190	253.44	202.73	50.71
...	...	...	...	...	...
	合计				411.55

再分配, 供热机组为电网消纳风电创造了容量空间, 达到了供热机组深度参与电网调峰的目的, 同时也达到了节能减排的目的。

## 6. 结论

1) 本文采用的大型供热机组的调峰能力模型的方法适用于核定其它大型供热机组深度参与电网调

峰的机组。

2) 根据本文所述的方法得到的供热机组  $N_{\max}$  和  $N_{\min}$  与实际相符, 也具有极强的简单实用性, 同时为电网对机组负荷调度, 机组参与电网消纳风电提供了技术支撑。

3) 在  $N_{\max}$  和  $N_{\min}$  确定的基础上开发了“吉林省供热机组在线实时监测及辅助决策系统”, 在实际应用中验证了模型的正确性和有效性。

## 参考文献 (References)

- [1] 张宇, 鄂志, 刘卫平等 (2013) 热电联产机组调峰能力的研究与应用. *电力系统及其自动化学报*, **25**, 115-118.
- [2] 李俊涛, 冯霄 (2006) 供热机组的热电负荷分配. *西安交通大学学报*, **40**, 311-314, 323.
- [3] 马呈霞, 张丽娟, 张世才等 (2009) 300MW 纯凝机组改造为供热机组的控制研究及应用. *中国电力*, **42**, 64-66.
- [4] 王学栋, 魏东, 孙书耀等 (2010) 不同类型供热机组的电热负荷优化分配和调峰性能. *汽轮机技术*, **52**, 328, 387-390.
- [5] 王兴国, 何燕玲, 张海良 (2006) 供热机组调峰运行中的最小出力分析. *河北电力技术*, **25**, 46-48.
- [6] 李俊峰等 (2012) 中国风电发展报告 2012. 中国环境科学出版社, 北京.
- [7] 林万超 (1991) 火电厂热力系统定量分析. 西安交通大学出版社, 西安.
- [8] 吴季兰 (1996) 汽轮机试验技术. 水利电力出版社, 北京.