



上海发电设备成套设计研究院
SHANGHAI POWER EQUIPMENT RESEARCH INSTITUTE

火电汽轮机参与灵活性深度调峰的风险分析

杨宇

2016-09-22



国家核电 www.snptc.com

知识产权声明

本文件的知识产权属国家电力投资集团公司及其相关产权人所有，并含有其保密信息。对本文件的使用及处置应严格遵循获取本文件的合同及约定的条件和要求。未经国家电力投资集团公司事先书面同意，不得对外披露、复制。

Intellectual Property Rights Statement

This document is the property of and contains proprietary information owned by SPIC and/or its related proprietor. You agree to treat this document in strict accordance with the terms and conditions of the agreement under which it was provided to you. No disclosure or copy of this document is permitted without the prior written permission of SPIC.

- 一、火电汽轮机参与灵活性深度调峰的必然性**
- 二、火电汽轮机参与灵活性深度调峰的能力及要求**
- 三、火电汽轮机参与灵活性深度调峰的风险**
- 四、火电汽轮机参与灵活性深度调峰的关键技术**

一、火电汽轮机参与灵活性深度调峰的必然性

当前问题：

- 产业结构调整，用电负荷峰谷差增大。
- 部分地区热电联产持续增加，供热期调峰困难加剧。
- 调峰电源建设滞后，大规模储能技术尚未成熟。
- 可再生能源(风电、光电、水电)装机容量迅猛发展，电网吸纳困难，部分地区出现了严重的“弃风弃水”问题。

一、火电汽轮机参与灵活性深度调峰的必然性

国际经验：

- 丹麦和德国已通过提升火电机组灵活性深度调峰能力来解决同类问题。

解决办法：

- 提升火电机组灵活性深度调峰能力



二、火电汽轮机参与灵活性深度调峰的能力及要求

最小出力能力

现状：

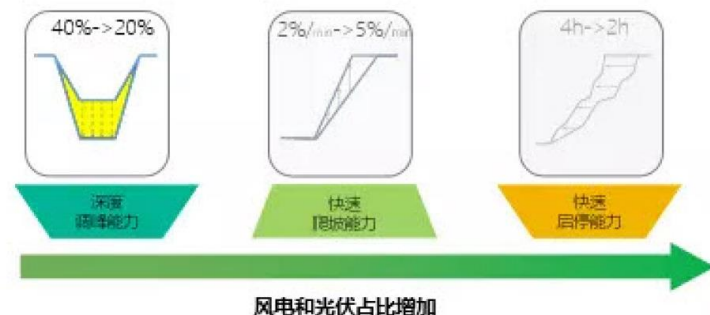
- 热电机组最小技术出力可达到**60% ~ 70%**额定容量。
- 纯凝机组最小技术出力可达到**45% ~ 50%**额定容量。

初步要求：

- 热电机组最小技术出力可达到**40% ~ 50%**额定容量。
- 纯凝机组最小技术出力可达到**30% ~ 35%**额定容量。

国际先进水平要求：

- 机组不投油稳燃时纯凝工况最小技术出力可达到**15% ~ 20%**额定容量。



Flexibility capabilities of coal-fired units (Reischke, 2012)		
	State of the art:	Development (new and existing plants):
Start-up:	2-6 hours depending on starting condition	1-4 hours depending on starting condition
Minimum load (hard coal)	New power plants: 25% Existing power plants: 40%	Conventional firing 15-20% Indirect firing 10-15%
Minimum load (Brown coal)	New power plants: 40% Existing power plants: 50%	Conventional firing 35-40% Indirect firing 10-15%
Load change cycles	Moderate	High to very high
(Primary frequency control)	2-5%/30 s possible to 5%/30 s	10%/10 s
(Secondary frequency control)	2-/min	10%/min
Biomass	10% cofiring	100% biomass

二、火电汽轮机参与灵活性深度调峰的能力及要求

负荷快速变动能力

现状：

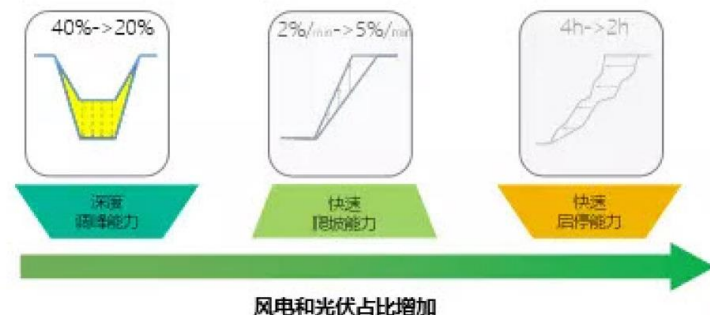
- 负荷快速变动率可达到**2%/min**。

初步要求：

- 负荷快速变动率可达到**5%/min**。

国际先进水平要求：

- 负荷快速变动率可达到**10%/min**。



Flexibility capabilities of coal-fired units (Reischke, 2012)		
	State of the art:	Development (new and existing plants):
Start-up:	2–6 hours depending on starting condition	1–4 hours depending on starting condition
Minimum load (hard coal)	New power plants: 25% Existing power plants: 40%	Conventional firing 15–20% Indirect firing 10–15%
Minimum load (Brown coal)	New power plants: 40% Existing power plants: 50%	Conventional firing 35–40% Indirect firing 10–15%
Load change cycles	Moderate	High to very high
(Primary frequency control)	2–5%/30 s possible to 5%/30 s	10%/10 s
(Secondary frequency control)	2–/min	10%/min
Biomass	10% cofiring	100% biomass

二、火电汽轮机参与灵活性深度调峰的能力及要求

快速启动能力

现状：

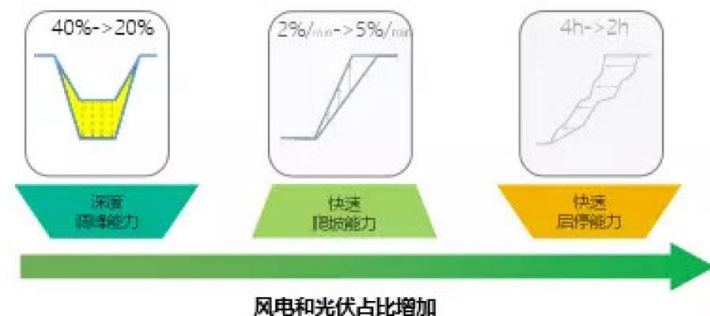
- 快速启动能力可达到 **4~8h**。

初步要求：

- 快速启动能力可达到 **2~6h**。

国际先进水平要求：

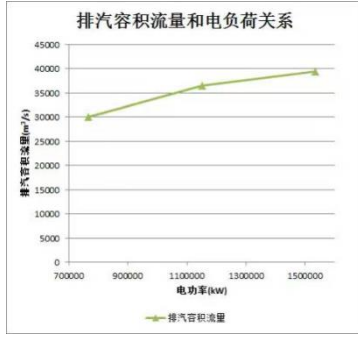
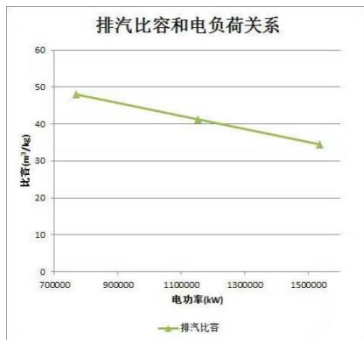
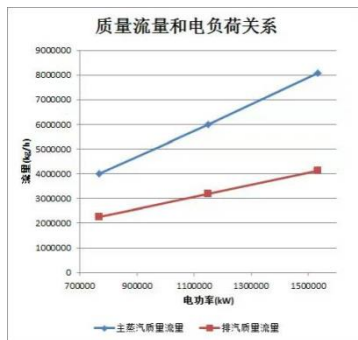
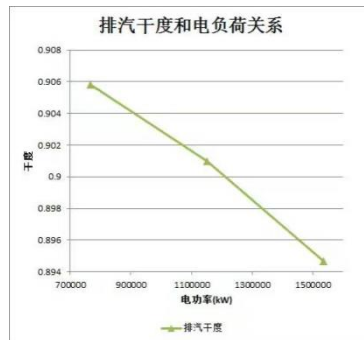
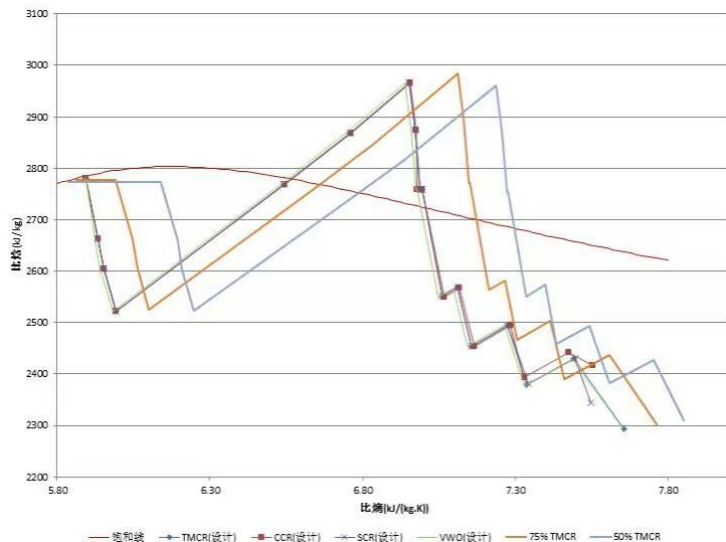
- 快速启动能力可达到 **1~4h**。



Flexibility capabilities of coal-fired units (Reischke, 2012)		
	State of the art:	Development (new and existing plants):
Start-up:	2-6 hours depending on starting condition	1-4 hours depending on starting condition
Minimum load (hard coal)	New power plants: 25% Existing power plants: 40%	Conventional firing 15-20% Indirect firing 10-15%
Minimum load (Brown coal)	New power plants: 40% Existing power plants: 50%	Conventional firing 35-40% Indirect firing 10-15%
Load change cycles	Moderate	High to very high
(Primary frequency control)	2-5%/30 s possible to 5%/30 s	10%/10 s
(Secondary frequency control)	2-/min	10%/min
Biomass	10% cofiring	100% biomass

三、火电汽轮机参与灵活性深度调峰的风险

3.1 低负荷运行的特点



三、火电汽轮机参与灵活性深度调峰的风险

3.1 低负荷运行的特点

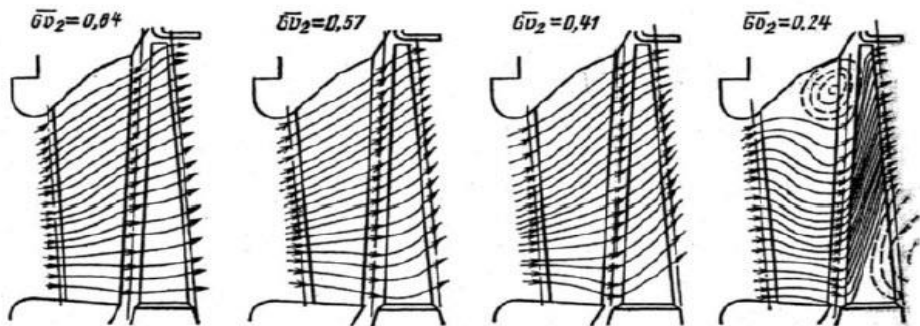


Fig. 3-51. Changes in a streamline pattern with variations in volumetric steam flow amount through the last stage

Source: Y. I. Shnee, Y. F. Kosyak, V. N. Ponomarev, et al.⁸⁰

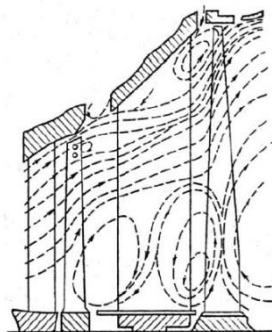


Fig. 3-52. Appearance of reverse vortex motion in the last two LP stages at low (14%) volumetric steam flow amount

Source: A. V. Shcheglyayev⁸⁰

三、火电汽轮机参与灵活性深度调峰的风险

3.2 低负荷运行的安全风险

(1) 火电深度调峰(20%~30%负荷)，汽轮本体可能存在的安全风险包括：

- (a) 汽流激振+叶片颤振，叶片动应力风险增加；
- (b) 容积流量和蒸汽湿度变化，末级叶片水蚀风险增加；
- (c) 鼓风、摩擦热量+低压转子膨胀量增大+低压缸热膨胀增加。
(对于坐缸轴承来说，可能引起标高变化，轴系振动风险增加)
- (d) 鼓风、摩擦热量+雾化喷水降温+叶片水蚀风险进一步增加；
- (e) 负荷变动率大，负荷频繁变动引起的部件寿命损耗增加。

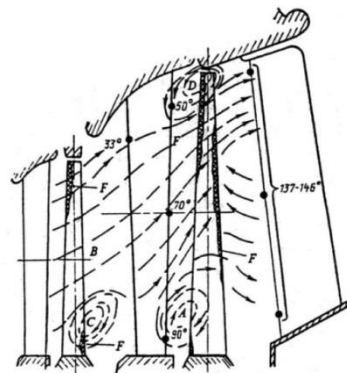


Fig. 4-17. Pattern of steam flows and steam temperatures and zones of increased erosion wear of blades in last stages of the LP steam path at a low-flow steam rate
Source: V.A. Khaimov, P.V. Khrabrov, Y.A. Voropaev, and O. E. Kotlyar²⁷

三、火电汽轮机参与灵活性深度调峰的风险

3.2 低负荷运行的安全风险

(2) 末级叶片动应力变化风险分析

当相对容积流量 >0.2 时，汽轮机的末级动叶的动应力随排汽容积流量的变化较为平缓，基本可以认为长期低负荷工况运行因为动应力增大造成末级叶片损伤的风险较小。

对于空冷机组汽轮机的末级动叶的动应力随排汽容积流量的变化情况，需要做进一步的研究。

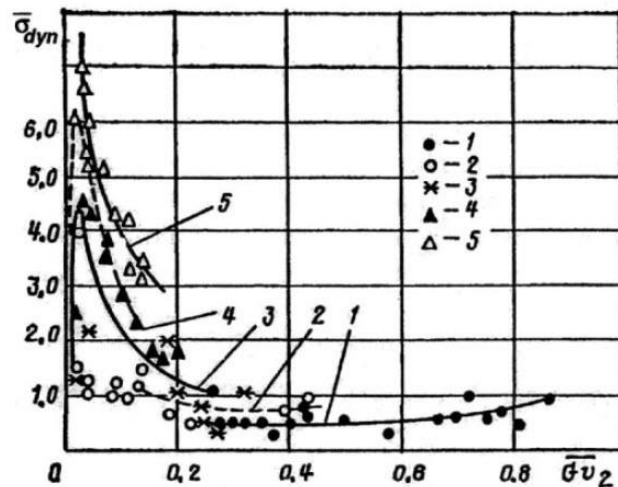


Fig. 4-16. Change of relative dynamic stresses in LP LSBs with back pressure and volumetric steam flow in the condenser (Pressure in condenser of: 1: 3-7 kPa [0.435-1.015 psia]; 2: 10-12 kPa [1.45-1.74 psia]; 3: 14-16 kPa [2.03-2.32 psia]; 4: 24-26 kPa [3.48-3.77 psia]; 5: 34-37 kPa [4.93-5.37 psia])

Source: N. N. Gribov, A. S. Shemonaev, and E. S. Mandryka²⁶

三、火电汽轮机参与灵活性深度调峰的风险

3.2 低负荷运行的安全风险

(3) 末级叶片水蚀变化风险分析

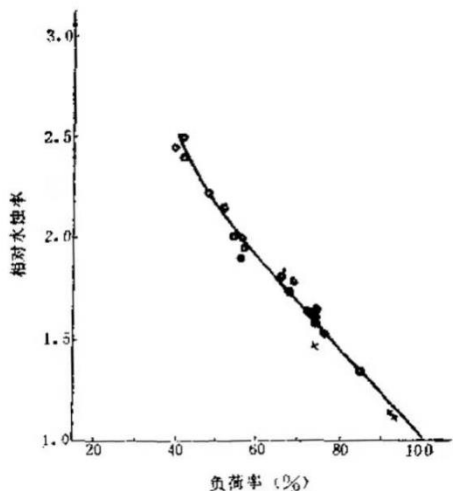


图4-12 汽轮机负荷与叶片水蚀率的关系

美国西屋公司计算方法

美国西屋公司也是通过对叶片材料水蚀系数E大小的判断来评价叶片水蚀危险性的,不过与德国KWU公司水蚀系数E的计算方法和评价标准相异,需要考虑的变量较多,准确性相对较高。

$$E = 3.31 \times 10^{25} \times \frac{y_1}{p_1^{3.15}} \times \frac{1}{V_1^{14}} \times \left(\frac{D \cdot n}{3600} \right)^{10.7} \times \frac{L_c^{1.8}}{A_1^{1.62}} \times \lambda$$

上式中: y_1 — 静叶片出口湿度; p_1 — 静叶出口静压; V_1 — 静叶片出口速度; D — 计算动叶片工作部分高度截面处直径; n — 转速; L_c — 沿流线弦长; A_1 — 静动叶轴向间隙; λ — 喉节比。

汽轮机叶片水蚀率和负荷率的关系为:随着负荷率的降低(100%→75%),汽轮机叶片相对水蚀率基本成线性增加(1.0→1.5)。

(1)随着汽轮机负荷降低,汽轮机进汽质量流量降低,排汽质量流量降低,排汽的蒸汽干度将增大。

(2)如背压保持不变,随着排汽的蒸汽干度增大,湿蒸汽的比容增大,但增大的百分数不及流量减小的百分数,因此总体而言,排汽容积流量降低。

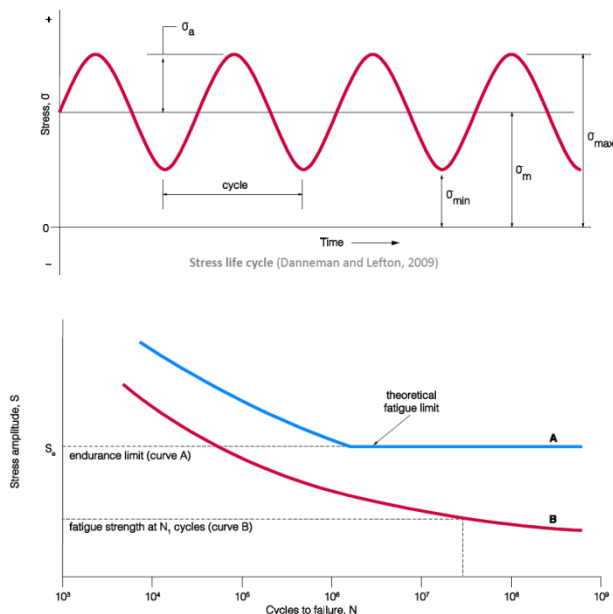
(3)如排汽的蒸汽干度保持相对不变,背压适当降低,湿蒸汽的比容增大,但增大的百分数仍不及流量减小的百分数,因此总体而言,排汽容积流量降低。

(4)排汽的蒸汽干度将增大(指数为1),排汽容积流量降低(指数为14),水蚀系数将增大。

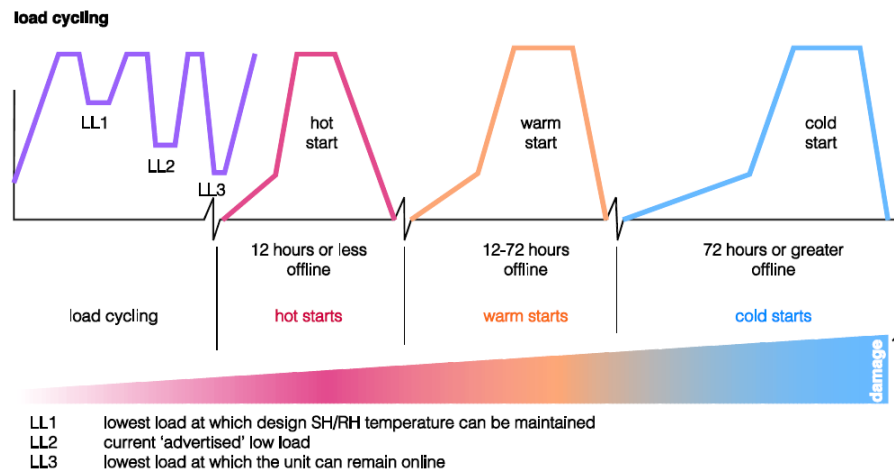
三、火电汽轮机参与灵活性深度调峰的风险

3.2 低负荷运行的安全风险

(4) 关键部件寿命损耗风险分析



Typical S-N curve of stress amplitude versus number of cycles to failure for two materials (Danneman and Lefton, 2009)



Types of load cycles that a unit can experience and potential relative damage levels (Danneman and Lefton, 2009)

四、火电汽轮机参与灵活性深度调峰的关键技术

4.1 纯凝机组汽轮机低负荷运行的关键技术

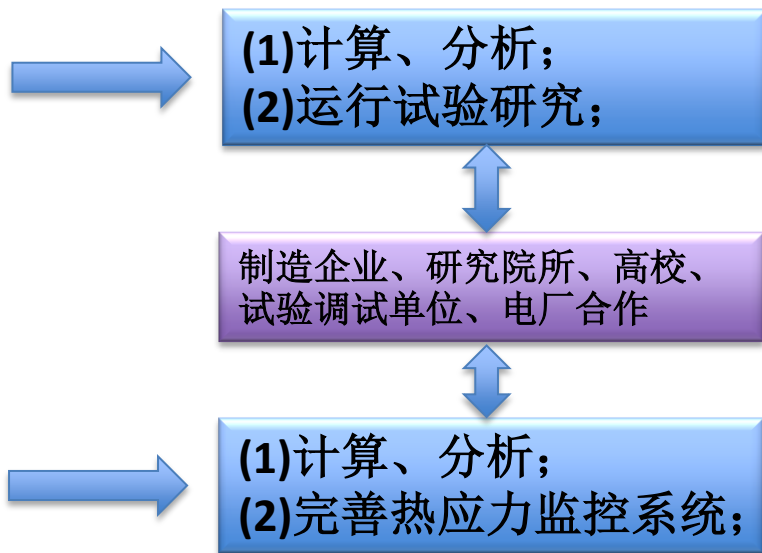
(1) 最小负荷的确定

综合考虑低压缸小流量工况的流场分布、叶片颤振、动应力、水蚀等情况，确定汽轮机低压缸容许的最小冷却排汽流量的准确值。

(单个排汽口70t/h? 50t/h? 10%TMCR单排汽口流量?)

(2) 最大负荷变化率和最短启动时间

综合考虑关键耐用部件的热应力变化值和寿命经济损耗率，确定汽轮机最大负荷变化率和最短启动时间。

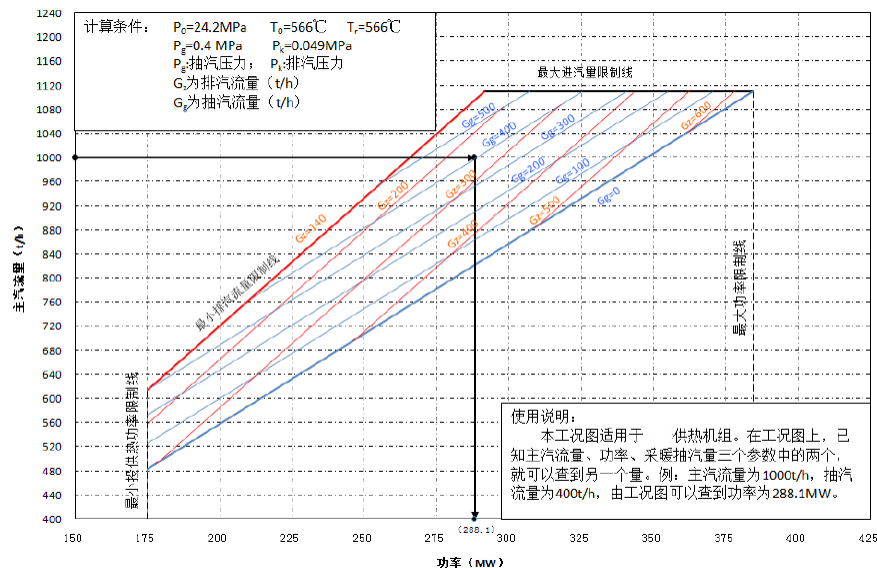


四、火电汽轮机参与灵活性深度调峰的关键技术

4.2 供热机组汽轮机低负荷运行的关键技术

(1) 获得供热机组热电耦合的特性

通过计算、分析、试验验证等手段，根据供热抽汽流量，最小排汽流量，最小电功率的关系，获得耦合的供热机组最小电功率、电功率负荷变化率。

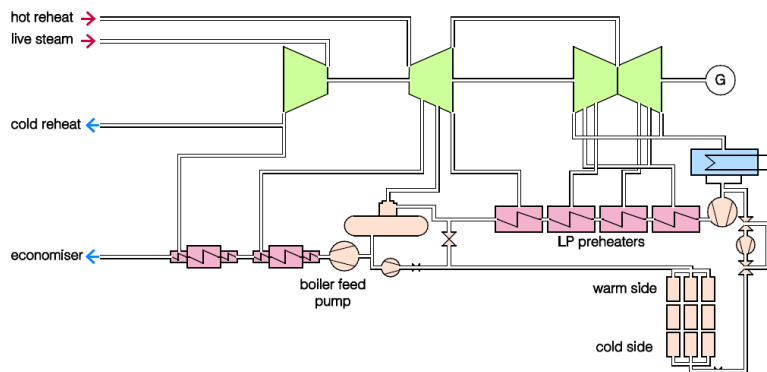


四、火电汽轮机参与灵活性深度调峰的关键技术

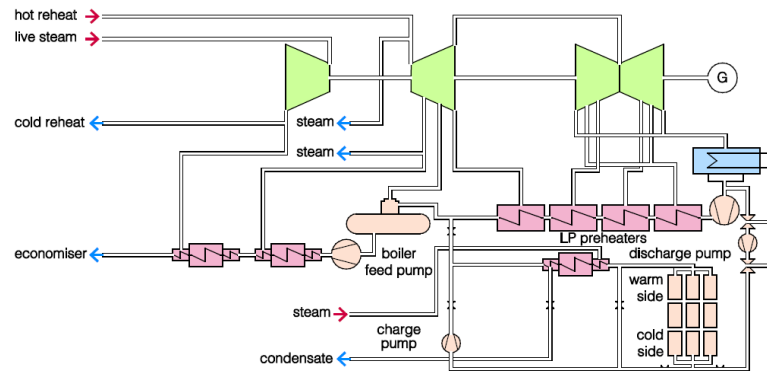
4.2 供热机组汽轮机低负荷运行的关键技术

(2) 供热机组热电解耦

采用增设储热系统，将热电联供机组的供热和供电关系由强耦合转换成弱耦合。



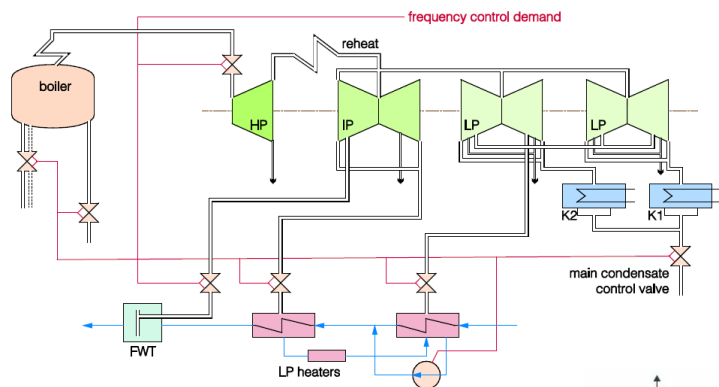
Thermal storage system for increasing plant flexibility (Schuele and others, 2012)



Thermal storage system for increasing plant flexibility (variant) (Schuele and others, 2012)

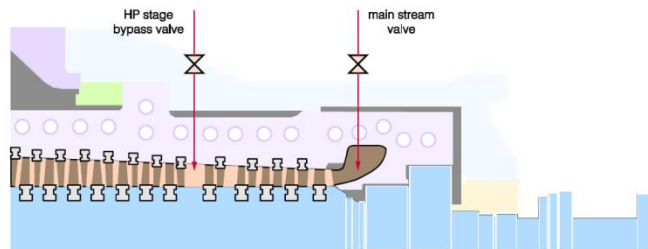
四、火电汽轮机参与灵活性深度调峰的关键技术

4.3 汽轮机快速升负荷的技术



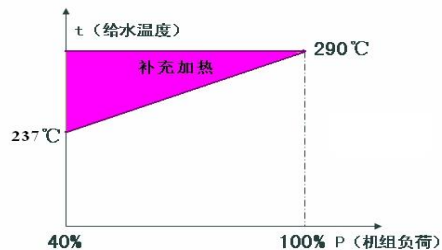
Condensate throttling for rapid response (Cziesla and others, 2009)

凝结水节流调频

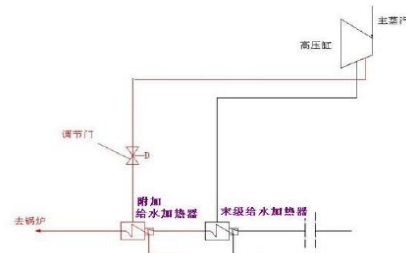


HP stage bypass system for very rapid response (Almstedt and others, 2007)

高压缸补汽调频



0号高加节流调频





上海发电设备成套设计研究院
SHANGHAI POWER EQUIPMENT RESEARCH INSTITUTE

谢谢！
THANK YOU !



国家核电 www.snptc.com