

Optimization of Operating Pressure for the Steam Condenser in a Geothermal Power Plant

Zhengmin Cai, Jun Liu, Juan Qi, Shen Zheng

CNPC Greatwall Drilling Company, Beijing
Email: shen_zheng_gw@163.com

Received: Oct. 13th, 2014; revised: Oct. 17th, 2014; accepted: Oct. 21st, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Due to the relatively low thermal efficiency of geothermal power plant, the steam condenser in a geothermal power plant is more important than that in a fire power plant. This paper analyzed the effect of operating parameters of steam condenser on the performance of a geothermal power plant. Based on the inlet steam parameters of one wellhead power plant located in Kenya, the net output power was computed and analyzed at different condensation pressures, and the optimum operating pressure for the steam condenser was presented. This investigation will provide a scientific base for the selection of optimum operating pressures of the steam condenser in geothermal power plants.

Keywords

Geothermal Power Plant, Steam Condenser, Operating Pressure, Parameter Optimization

地热电站凝汽器运行压力优选

蔡正敏, 刘俊, 漆娟, 郑申

中国石油集团长城钻探工程有限公司, 北京
Email: shen_zheng_gw@163.com

收稿日期: 2014年10月13日; 修回日期: 2014年10月17日; 录用日期: 2014年10月21日

摘要

地热电站热效率低导致单位发电量所产生的凝汽器排热比火电站大得多，这使得凝汽器的运行参数优选对于地热电站的意义与火电站相比更为重要。本文分析了凝汽器运行参数对地热电站性能的影响规律，并基于肯尼亚某地热井机组进口参数，对不同凝汽器运行压力下的机组输出功进行了计算分析，得出了最优的凝汽器运行压力，本研究将为面向地热电站的凝汽器运行压力优选提供科学依据。

关键词

地热电站，凝汽器，运行压力，参数优选

1. 引言

地热发电系统将地热流体的热能转换为汽轮机的输出功带动发电机转换成电能[1]。根据工程热力学理论，工作于任何高温热源与低温冷源之间的可逆热机，其最大热效率即理想卡诺循环的热效率仅取决于冷热源的溫度。热源通常指携带热能的做功介质，对于地热电站，热源为携带热能的井口地热流体，对于火电机组则为高温压参数的过热水蒸汽，冷源通常指环境，假设热源温度为 T_1 ，冷源温度为 T_2 ，那么根据卡诺定律，理想热机的效率为：

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (1)$$

在实际电力生产中，大部分电厂热力循环基于朗肯循环，提高电厂热效率的根本任务是通过提高电站各部件的性能和系统热力学优化设计，使得朗肯循环的热效率尽量接近理想卡诺循环的热效率。地热电站与火电站相比，大部分的地热电站热效率仅为 5%~15% 左右[2]，假设以平均热效率 10% 计算，对于地热电站每输出 1 MW 的电能，需要向环境排出 9 MW 的热量，也就是说，地热电站效率越低，发出同样的电功率需要向环境的排热也就越多，因此，对于同样容量的火电站与地热电站相比，地热电站的凝汽系统要比火电站大的多，凝汽器的高成本和大体积使得凝汽器性能对于地热电站的影响更为敏感[3]，其优化设计对于地热电站的经济运行具有重要意义。

2. 凝汽器运行参数对地热电站的影响分析

凝汽器本身换热性能影响其本身的体积、造价和长期运行的可靠性，凝汽器性能直接关系到地热发电机组的效率，当凝汽器换热性能下降时，将产生两方面的影响：一方面，导致所需的冷却循环水流量增加从而增加系统的功耗；另一方面，导致凝汽器的工作压力升高，凝汽器直接跟汽轮机的低压排汽端相连，也就导致了汽轮机排汽压力升高，造成汽轮机组的出力减小[4]。图 1 给出了相同进汽条件下，排汽压力对机组等效焓降的影响，其中 ΔH 为焓值， P_c 为排汽压力， P_o 为进气压力，从图中可知排气压力越低，机组的等效焓降越大，输出功也就越大。

凝汽器压力对于地热电站的影响可归纳为[5]：

1) 凝汽器为整个地热电站的主要冷端设备之一，凝汽器压力下降，则汽轮机组输出功增加，反之，则汽轮机输出功下降；

2) 凝汽器运行压力影响冷却系统设计和运行，凝汽器运行压力较低时，虽然汽轮机输出功增大，但低压条件下，蒸汽的汽化潜热较大，并且总体传热温差较小，蒸汽凝结需要更大的传热面积和更多的冷

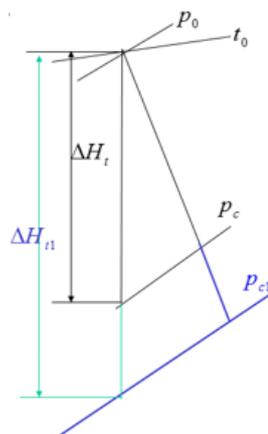


Figure 1. The equivalent enthalpy drop of steam turbine at different discharge pressures

图 1. 汽轮机组不同排气压力下的等效焓降

却水量，增大了凝汽器的成本、体积和冷却循环水泵的功耗；

3) 凝汽器运行压力影响抽气器的功耗，凝汽器压力越低，抽气器的能耗就越大，同时，凝汽器运行压力影响到抽气器的负荷，当凝汽器压力降低导致不凝性气体分压力降低时，便会导致凝结水中不凝性气体的溶解度减小而析出，使得抽气器负荷增大；

4) 凝汽器压力变化所引起的不凝性气体分压力的变化会导致 H_2S 、 CO_2 等酸性气体在水中的溶解度变化，从而引起凝结水酸度的变化，进而影响金属材料的腐蚀特性。

3. 凝汽器运行压力优选

凝汽器的设计和运行需综合考虑上述影响因素，确定最佳的凝汽器压力。假设汽轮机组的进汽参数和冷却水的温度不变，在常规火电厂中，凝汽器运行压力的优化就是使凝汽器压力下降引起的汽轮机输出功率增加与冷却水流量增大所引起的泵功消耗增加之间差值的最小化。由于火电厂中，抽气系统的工作负荷小，在获取凝汽器最优运行压力时，通常不予考虑其能耗对机组性能的影响。对于地热电站，由于蒸汽中含有大量不凝性气体，真空维持系统的能耗也很大，因此，对于地热电站，需综合考虑凝汽器真空下降带来的汽轮机输出功率收益与冷却水循环水泵及真空泵功耗增加之间的关系来确定凝汽器的最优运行压力，凝汽器运行压力改变导致的机组输出功率增加和功耗增加之间的差值可表示为：

$$f(p) = W_{\text{turbine}}(p) - W_{\text{cw}}(p) - W_{\text{irvp}}(p) \quad (2)$$

其中， $W_{\text{turbine}}(p)$ 为凝汽压力为 p 时，汽轮机的输出功率，可根据汽轮机的进出口蒸汽焓差及汽轮机效率求得，即：

$$W_{\text{turbine}}(p) = \eta m [h_{\text{out}}(p) - h_{\text{in}}] \quad (3)$$

$W_{\text{cw}}(p)$ 为冷却循环水的泵功，即：

$$W_{\text{cw}}(p) = \frac{m_{\text{cw}} g H}{\eta} \quad (4)$$

其中 m_{cw} 为冷却循环水的流量， H 为循环水泵的扬程

真空泵的耗功按照公式(5)计算：

$$W_{\text{irvp}}(p) = \left[\frac{\gamma}{\gamma - 1} \right] * \frac{m_g * R * T_{\text{cond}}}{\eta_{\text{vpump}} * M_{\text{gas}}} * \left[\left(\frac{P_{\text{atm}}}{p} \right)^{\left(\frac{\gamma - 1}{\gamma} \right)} - 1 \right] \quad (5)$$

其中 γ 为不凝性气体的比热比, m_g 为不凝性气体的质量流速, R 为气体常数 $8.314 \text{ kJ}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$, T_{cond} 为凝汽器内的温度, η_{vpump} 为真空泵的效率, M_{gas} 为不凝性气体的摩尔质量, P_{atm} 和 P_{cond} 分别为大气压力及凝汽器工作压力。由于地热蒸汽所含不凝性气体中大部分为 CO_2 , 为了便于计算, 采用 CO_2 的物性对凝汽器压力变化引起的抽气系统功耗进行计算。肯尼亚当地冷却水温度为 25°C , 对应的蒸汽压力为 3.1 kPa , 考虑到冷却水温升 Δt 以及凝汽器端差 δt , 在 $\Delta t + \delta t < 25^\circ\text{C}$ 的区域内进行计算(相应的运行压力小于 12 kPa), 通过计算汽轮机输出总功, 凝结水泵功耗以及真空泵功耗, 并综合考虑系统体积, 冷却水消耗等因素得出最优的凝汽器运行压力[6]。

机组计算参数如表 1 所示, 具体计算过程为:

- 1) 根据机组进汽参数, 计算不同汽轮机排汽压力下的汽轮机输出总功;
- 2) 给定凝汽器压力, 计算凝汽器工作温度, 并根据凝汽器端差得出冷却循环水温升, 继而计算得出冷却循环水量及凝结水泵的功率;
- 3) 在给定凝汽器压力下, 计算抽气真空泵的功耗;
- 4) 根据上述计算结果, 求得汽轮机输出功与水泵功率及真空泵功率的差值, 差值最大时对应的凝汽器压力即为最优压力。

由表 2 可知, 凝汽器运行压力为 4 kPa 时机组输出净功最大值为 2993.39 kW , 此时消耗的冷却水量为 2897 t/h ; 当凝汽器压力为 6 kPa 工况时, 其输出净功为 2926 kW , 仅比凝汽器工作压力为 4 kPa 时的净功低 2.3% , 但 6 kPa 条件下消耗的冷却水量为 1034 t/h , 仅为 4 kPa 时所消耗冷却水量的三分之一左右; 除消耗水量之外, 综合考虑到系统体积和投资成本, 由于 4 kPa 凝汽压力时需要用体积更大的冷却塔、凝汽器及水泵, 虽然其输出净功最大, 但考虑到系统成本时的综合技术经济性并不高, 因此, 选取 6 kPa 作为凝汽器工作压力具有更好的综合技术经济性。

4. 结论

本文对比分析了地热电站和火电站中凝汽器对于整个机组的影响, 阐述了凝汽器运行压力对于机组高效运行的影响机理, 并基于肯尼亚某地热井口机组进汽参数和环境参数, 对不同凝汽器运行压力条件下的机组输出总功、循环水泵功耗以及抽气器功耗进行了计算分析, 指出凝汽器运行压力优选需综合考

Table 1. The parameter list for calculation of steam turbine performance

表 1. 机组计算参数表

进汽流量 (t/h)	进汽焓 (kJ/kg)	NCG 含量	冷却水温 ($^\circ\text{C}$)	凝汽器端差 ($^\circ\text{C}$)	扬程 (m)	真空泵排气压力(bar)	凝汽器压力 (kPa)
25.4	2758.6	0.5%	25	0	20	1.1	2~12

Table 2. The calculated parameters of steam turbine performance

表 2. 机组计算输出参数

凝汽器压力(kPa)	排汽温度($^\circ\text{C}$)	冷却水流量 (t/h)	汽轮机输出功 (kW)	循环泵功率 (kW)	真空泵功率 (kW)	差值 (kW)
4	28.95	2897	3253	201.18	58.43	2993.39
6	36.16	1034	3048	71.81	49.79	2926.40
8	41.5	703	2899	48.82	44.01	2806.17
10	45.8	560.1	2779	38.89	39.70	2700.41
12	49.42	478.8	2680	33.25	36.28	2610.47

虑机组净输出功、冷却水消耗以及设备体积等因素，并通过计算得出了对应于不同环境参数和机组进汽参数条件下的凝汽器最优压力，为地热电站凝汽器的设计和运行提供了科学参考。

基金项目

该项目为中国石油集团“可再生能源技术开发与应用研究”科研项目，课题名称：“肯尼亚地热开发技术研究与现场试验”，项目号：2012A-4906。

参考文献 (References)

- [1] 西藏地热工程处, 译 (1988) 地热和地热发电技术指南. 水利电力出版社, 北京.
- [2] 周大吉 (2003) 西藏羊八井地热发电站的运行、问题及对策. *电力建设*, **10**, 1-9.
- [3] Weres, O. (1984) Numerical evaluation of contact and hybrid condensers for geothermal power plants. *Geothermics*, **13**, 305-318.
- [4] Coskun, C., Oktay, Z. and Dincer, I. (2011) Performance evaluations of a geothermal power plant. *Applied Thermal Engineering*, **31**, 4074-4082.
- [5] DiPippo, R. (2012) Geothermal power plant: Principles, applications, case studies and environmental impact. 3rd Edition, Elsevier, Amsterdam.
- [6] Yildirim, D. and Ozgener, L. (2012) Thermodynamics and exergoeconomic analysis of geothermal power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **16**, 6438-6454.