

TFE-TUR 复合地热发电系统热力学分析

王维 (天津城建学院)

范文伯 (天津大学)

〔摘要〕 本文提出了一种新的地热发电系统, 并对其进行了热力学优化。与闪蒸系统的比较计算表明, 该系统优势明显, 且热源温度愈低、干度愈小优势愈突出, 充分展示了该系统在开发利用中低温地热资源发电方面的巨大潜力。

关键词 地热发电 闪蒸 全流 复合系统 螺杆膨胀机

1 引言

目前, 许多地热电站都采用了闪蒸系统(图1)。这一方法是將地热流体先引入闪蒸器降压扩容, 再利用闪蒸出的干蒸汽去推动汽轮机做功。闪蒸系统的扩容过程是典型的不可逆过程, 加之汽机只能利用闪蒸后蒸汽的热能, 液体能量无法利用, 即存在弃液

损失, 所以系统效率较低。增加闪蒸级数可改善系统性能, 但对于中低温地热资源, 从经济技术角度综合考虑闪蒸级数不宜超过两级。二级闪蒸系统仍存在扩容、弃液损失, 系统效率依然不高。因此, 寻求新途径提高闪蒸系统热能利用率无疑是很有意义的。

美国 Lawrence Livermore 国家实验室在对螺杆膨胀机(Helical Screw Expander)应用于地热水全流发电的研究中指出: 将螺杆膨胀机取代闪蒸系统扩容器, 这可能是它一个较好的应用。但他们对这一方案未作任何深入的研究。笔者在这一思路的启发下, 通过深入探讨, 提出“TFE(全流机, Total Flow Expander)——TUR(汽轮机, Turbine)复合地热发电系统”(图2)。基本思想是: 地热流体先全部引入全流机 TFE, 利用其两相膨胀特性在其中做功。TFE 出口接汽水分离器 SEP, 分离出的蒸汽再去汽机 TUR 做功。这样就消除了扩容过程, 且利用了处于热源温度下的热水能量, 提高了系统的能量利用率。

提出这一系统有一个重要的前提条件,

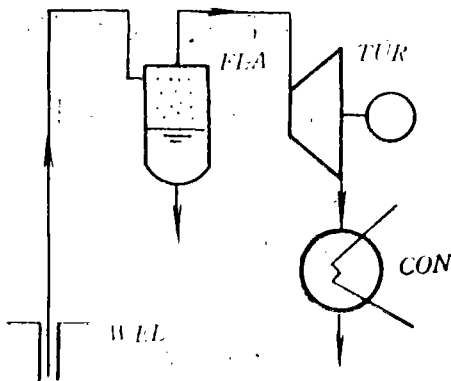


图1 闪蒸地热发电系统

WEL 地热器 TUR 汽轮机 FLA 扩容器 CON 冷凝器

收稿日期 1990-11-06

修改定稿 1991-02-15

本文联系人 王维 男 31

天津市天津城建学院暖通教研室 300151

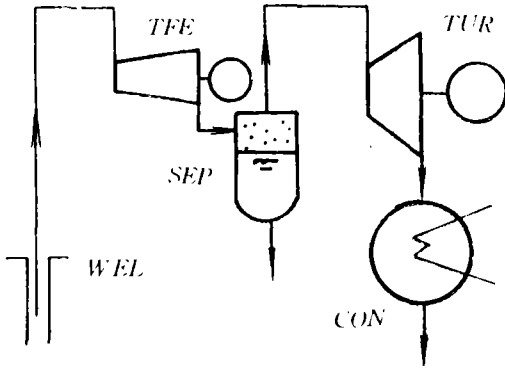


图 2 复合地热发电系统
TFE 全流机 SEP 分离器

即由于目前人们对机内汽液两相膨胀机理还缺乏透彻了解，所以目前出现的全流机，不论是透平式、容积式还是汽液分离式，其内效率都还较低。以螺杆膨胀机为例，当以地热水为工质时，其实验内效率在0.55以下。由于全流地热发电系统的内效率等于全流机的内效率，所以全流系统距离大规模实用阶段尚有一定距离。正是在这样的背景下，笔者提出“TFE-TUR复合系统”，其实质是利用TFE的两相膨胀特性变扩容不可逆的无功过程为有功过程，从而达到较高的热能利用率。

2 系统热力学分析及优化

TFE-TUR 复合系统的工质状态变化见图3。1状态略具干度的地热水先全部进TFE膨胀做功至状态2（2s为TFE的定熵膨胀终点），然后进汽水分离器，分离出的2g状态的蒸汽进汽机做功，出口状态为3（3s为TUR等熵膨胀终点）。单位质量工质的作功量（比功）为

$$W = W_E + W_T$$

$$= \eta_E(h_1 - h_{2s}) + \eta_T(h_{2g} - h_{3s})x_2 \quad (1)$$

式(1)中， W_E 、 η_E 和 W_T 、 η_T 分别表示TFE和TUR的作功量及内效率， x_2 是状态2

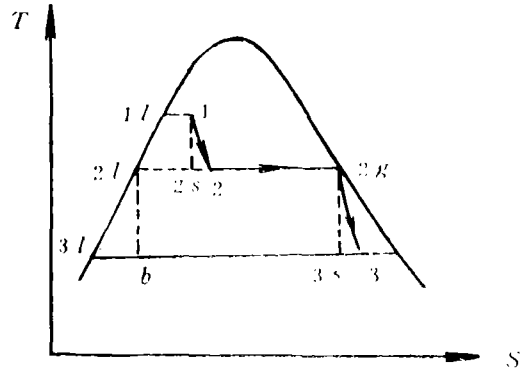


图 3 复合系统工质状态变化

的干度。工质在1状态的比焓

$$h_1 = C_p T_1 + x_1 \Delta h(T_1)$$

$$= C_p \left[T_1 + \frac{x_1 \Delta h(T_1)}{C_p} \right]$$

$$= C_p (T_1 + \Delta T_{e1}) = C_p T_{e1} \quad (2)$$

式(2)中， $\Delta h(T_1)$ 为温度 T_1 时的汽化热， $\Delta T_{e1} = x_1 \Delta h(T_1) / C_p$ 为干度 x_1 的当量温升， $T_{e1} = T_1 + \Delta T_{e1}$ 是1状态的当量温度。
2s点的工质比焓

$$h_{2s} = C_p T_2 + T_2 (S_{2s} - S_{2l})$$

$$= C_p T_2 + T_2 [(S_{1l} - S_{2l}) + (S_1 - S_{1l})]$$

$$= C_p T_2 + T_2 \left[C_p \ln \frac{T_1}{T_2} + \frac{x_1 \Delta h(T_1)}{T_1} \right]$$

$$= C_p T_2 \left[1 + \ln \frac{T_1}{T_2} + \frac{\Delta T_{e1}}{T_1} \right] \quad (3)$$

TFE出口比焓

$$h_2 = h_1 - \eta_E (h_1 - h_{2s})$$

$$= (1 - \eta_E) h_1 + \eta_E h_{2s}$$

将式(2)、(3)代入上式

$$h_2 = C_p \left[(1 - \eta_E) T_{e1} + \eta_E T_2 \left(1 + \ln \frac{T_1}{T_2} + \frac{\Delta T_{e1}}{T_1} \right) \right] \quad (4)$$

TFE出口干度

$$\begin{aligned} x_2 &= \frac{h_2 - h_{2t}}{\Delta h(T_2)} \\ &= \frac{C_p}{\Delta h(T_2)} \left[(1 - \eta_E)(T_{e1} - T_2) \right. \\ &\quad \left. + \eta_E T_2 \left(\ln \frac{T_1}{T_2} + \frac{\Delta T_{e1}}{T_1} \right) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

TUR进口工质焓

$$h_{2g} = C_p T_2 + \Delta h(T_2) \quad (6)$$

3s点比焓

$$\begin{aligned} h_{3s} &= h_{3t} + T_3(S_{3s} - S_{3t}) \\ &= h_{3t} + T_3[(S_{2t} - S_{3t}) \\ &\quad + (S_{2g} - S_{2t})] \\ &= C_p T_3 \left[1 + \ln \frac{T_2}{T_3} + \frac{\Delta h(T_2)}{C_p T_2} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

将式(2) — (7)代入式(1), 并整理

$$\begin{aligned} W &= C_p \eta_E \left[T_{e1} - T_2 \left(1 + \ln \frac{T_1}{T_2} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{\Delta T_{e1}}{T_1} \right) \right] + C_p \eta_T [(1 - \eta_E) \\ &\quad (T_{e1} - T_2) + \eta_E \left(\ln \frac{T_1}{T_2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\Delta T_{e1}}{T_1} \right) T_2] \left[\left(1 - \frac{T_3}{T_2} \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{C_p}{\Delta h(T_2)} \left(T_2 - T_3 - T_3 \ln \frac{T_2}{T_3} \right) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

已知热源、冷源条件 T_1 、 x_1 、 T_3 , 内效率 η_E 、 η_T , 给出全流机与汽轮机的中间匹配温度 T_2 , 可由式(8)求出复合系统的比作功量。

考虑到 $C_p(T_2 - T_3 - T_3 \ln \frac{T_2}{T_3}) / \Delta h(T_2)$

与 $(1 - T_3/T_2)$ 相比甚小, 可以略去, 于是得到复合系统比功量的简化计算式

$$W = C_p \eta_E \left[T_{e1} - T_2 \left(1 + \ln \frac{T_1}{T_2} \right. \right.$$

$$\left. \left. + \frac{\Delta T_{e1}}{T_1} \right) \right] + C_p \eta_T \left[(1 - \eta_E)(T_{e1} - T_2) + \eta_E T_2 \left(\ln \frac{T_1}{T_2} + \frac{\Delta T_{e1}}{T_1} \right) \right] \left(1 - \frac{T_3}{T_2} \right) \quad (9)$$

上述简化的实质是将循环 $2g-3s-3l-2l-2g$ 简化为蒸汽卡诺循环 $2g-3s-b-2l-2g$ 。

显然, 对于不同的中间温度 T_2 , 由式(9)求得的作功量也不同。为求出 TFE、TUR的最佳中间匹配温度 $T_{2,op}$, 对式(9)求导并整理后得到

$$\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial T_2} &= C_p \left\{ \eta_E' \eta_T \frac{T_{e1} T_3}{T_2^2} + \eta_E \eta_T \frac{T_3}{T_2} \right. \\ &\quad \left. - \eta_E \eta_T' \ln \frac{T_1}{T_2} - \left(\eta_T \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \eta_T' \eta_E \frac{\Delta T_{e1}}{T_1} \right) \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

式中 $\eta_E' = 1 - \eta_E$, $\eta_T' = 1 - \eta_T$ 。令 $\partial W / \partial T_2 = 0$, 并乘以 $1/\eta_E \eta_T' C_p$

$$\begin{aligned} \text{则} \quad \frac{\eta_E' \eta_T}{\eta_E \eta_T'} \frac{T_{e1} T_3}{T_2^2} + \frac{\eta_T}{\eta_T'} \frac{T_3}{T_2} - \ln \frac{T_1}{T_2} \\ - \left(\frac{\eta_T}{\eta_E \eta_T'} + \frac{\Delta T_{e1}}{T_1} \right) = 0 \end{aligned}$$

因为 $\ln \frac{T_1}{T_2} = \ln \left(1 + \frac{T_1 - T_2}{T_2} \right) \approx \frac{T_1 - T_2}{T_2} - \frac{1}{2} \left(\frac{T_1 - T_2}{T_2} \right)^2$, 代入上式并整理

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta T_{e1}}{T_1} + \frac{\eta_T}{\eta_T' \eta_E} - \frac{3}{2} \right) T_2^2 + \left(2T_1 \right. \\ \left. - \frac{\eta_T}{\eta_T'} T_3 \right) T_2 - \left(\frac{\eta_E' \eta_T}{\eta_E \eta_T'} T_{e1} T_3 \right. \\ \left. + \frac{1}{2} T_1^2 \right) = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)为求取 $T_{2,op}$ 的方程, 适用于略具干度的热源。若热源为热水, 则式(11)中的 $\Delta T_{e1} = 0$, $T_{e1} = T_1$, 式(11)简化为

$$\left(\frac{\eta_T}{\eta_T' \eta_E} - \frac{3}{2}\right) T_2^2 + \left(2T_1 - \frac{\eta_T}{\eta_T'} T_3\right) T_2 - \left(\frac{\eta_E' \eta_T}{\eta_E \eta_T'} T_1 T_3 + \frac{1}{2} T_1^2\right) = 0 \quad (12)$$

由式(12)可求出复合系统用于热水资源时的最佳中间匹配温度 $T_{2, \text{opt}}$ 。

3 复合系统与闪蒸系统的比较

图4给出了两系统的比功比较(相对比功增率 = $(W_{\text{复合}} - W_{\text{闪蒸}}) / W_{\text{闪蒸}}$)。

由图4(a)、(b)可见,与闪蒸系统相比,复合系统的优势是明显的。例如,当地热水温度为150℃时,其比功相对增率可达41%。

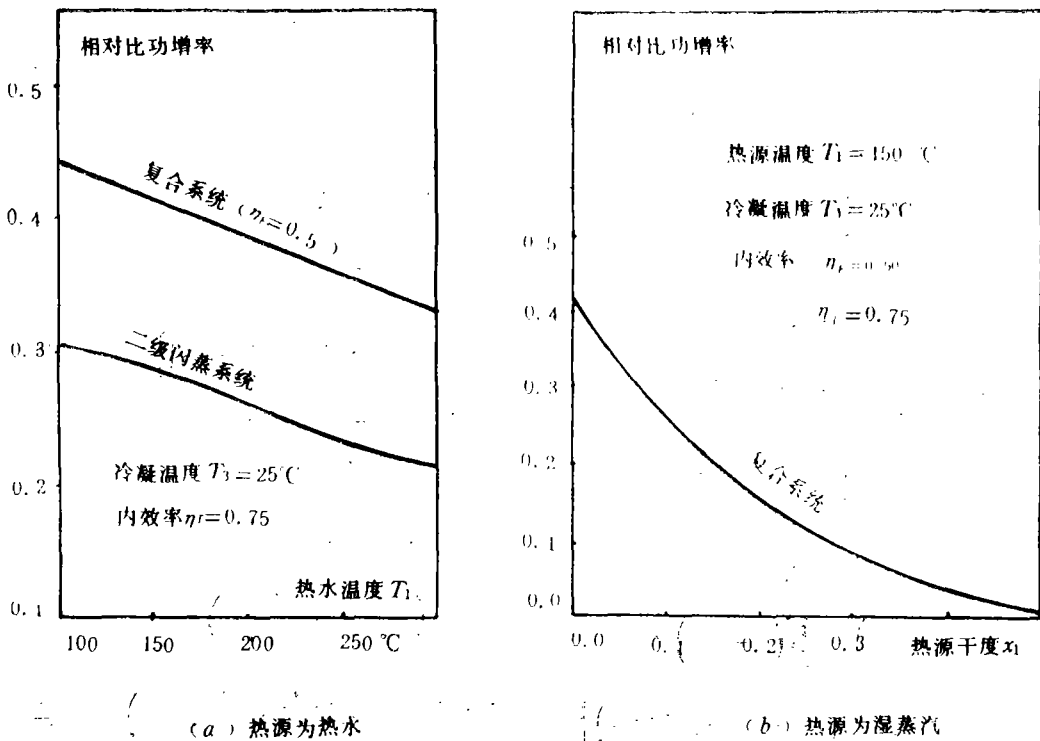


图4 复合系统与闪蒸系统比较

而且,热源温度、干度愈低,复合系统优势愈显著。特别值得注意的是,对于热水资源,复合系统不仅优于闪蒸系统,而且优于二级闪蒸系统。这使得复合系统在开发低品位地热能发电方面具有特殊重要的地位。

4 结束语

复合系统的优势是明显的,实现复合系

统的关键是配备合适的全流机。目前,螺杆膨胀机是国内外研究较多的一种地热全流机,所以将其应用于复合系统是一个很有意义的课题。另外,复合系统作为全流系统与闪蒸系统的中介物,其存在是有条件的。因此,对于一定的地热源、全流机和汽轮机条件,是用复合系统,还是闪蒸系统,抑或全流系统应该有一套判别方法,这些都需进一步探讨。

参 考 文 献

- 1 王维. 全流螺杆膨胀机—汽轮机复合地热发电系统研究. 天津大学研究生论文, 1988
- 2 胡亮光, 王之安, 范文伯. 热水发电螺杆膨胀机全流热力系统. 中国电机工程学会地热发电学术会议论文, 1982
- 3 顾肇军, 胡亮光, 范文伯, 张凤山, 王维. 汽水全流及闪蒸发电系统能量利用率比较. 热能动力工程, 1989 (4)
- 4 Austin A L, etc. The Lawrence Livermore laboratory geothermal program. A status report on the development of total flow concept. UCRL—500046, 1977
- 5 Euiott G, Hays G. Two phase turbine engines. 11th IECEC, 1976
- 6 Austin A L, House P A. New concept for converting the energy in low-to-medium temperature liquids with emphasis on geothermal applications. UCRL—52583, 1978
- 7 Carey B. Total flow power generation from geothermal resources using helical screw expander. Proc. 5th NZ Geothermal workshop, 1983

Thermodynamic Analysis of TFE-TUR Combined Geothermal Power Generating System

Wang Wei

(Tianjin Urban Construction Institute)

Fan Wenbo

(Tianjin University)

Abstract

This paper presents a new geothermal power generating system and its thermodynamic optimization. Calculation results show that the said system as compared with flash steam power system has some significant merits. Moreover, the advantages of the system are the more pronounced in case of a lower temperature and dryness of the geothermal fluids, which fully demonstrates the great potentialities of the system in the development and utilization of low quality geothermal energy resources.

Key words: geothermal power generation, total flow, flash steam, combined system, helical screw expander