

低温回水热电联产供热技术和运行特性研究综述

赵耀华^{1,2}, 吕俊复^{1*}, 李少华³

(1.清华大学能源与动力工程系, 北京 100084; 2. 中国能源建设股份有限公司, 北京 100022; 3. 中国电力工程顾问集团华北电力设计院有限公司, 北京 100120)

摘要:本文介绍了低温回水热电联产供热技术的原理、供热系统构成、能效评价指标体系、供热系统经济性评价和典型供热案例,采用凝汽供热和增加凝汽供热比例可明显降低热源供热等效电,降低供热成本,影响热源供热的主要因素有循环水温度、循环水量以及汽轮机背压;探讨了供热系统调节方式,一般采用质调节、量调节和分阶段变流量的质调节3种调节方法;总结了供热机组灵活性的主流技术和其他灵活性技术(利用热网和建筑物的热惯性调峰及利用长输管网回水侧容量蓄热);介绍了新能源供热技术等最新研究进展;对低温回水热电联产供热技术还需研究的问题进行了分析和展望。

关键词:热电联产;低温回水;吸收式热泵;高背压;热电解耦

中图分类号:TK01;TM621

文章编号:1674-8069(2024)06-0572-10

文献标志码:A

DOI编号:10.19944/j.eptep.1674-8069.2024.06.002

[引用本文格式]赵耀华,吕俊复,李少华.低温回水热电联产供热技术和运行特性研究综述[J].电力科技与环保,2024,40(6):572-581.

ZHAO Yaohua, LYU Junfu, LI Shaohua. A review of low-temperature return water heat and power cogeneration heating technology and operational characteristics[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2024, 40(6):572-581.

A review of low-temperature return water heat and power cogeneration heating technology and operational characteristics

ZHAO Yaohua^{1,2}, LYU Junfu^{1*}, LI Shaohua³

(1. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. China Energy Engineering Corporation Limited, Beijing 100022, China; 3. North China Power Engineering Co., Ltd., of China Power Engineering Consulting Group, Beijing 100120, China)

Abstract: The principle of low-temperature return water cogeneration heat supply technology, the composition of the heat supply system, the energy efficiency evaluation index system, the economic evaluation of the heat supply system and the typical heat supply cases were introduced. The use of condensate heat supply and increasing the proportion of condensate heat supply significantly reduced the heat source heat supply equivalent electricity and reduced the cost of heat supply. The main factors affecting the heat source heat supply were the temperature of the circulating water, the amount of circulating water, and the steam turbine backpressure. It discusses the regulation methods of heat supply system, generally adopting three kinds of regulation methods, namely, quality regulation, quantity regulation and quality regulation with variable flow rate in phases. The mainstream technology of flexibility of heat supply units and other flexibility technologies were summerized(using the thermal inertia of heat networks and buildings to adjust peaks and utilizing the capacity of the return side of the long-distance pipeline network to store heat). It introduced the latest progress of the research on new energy heat supply technology was introduced. The issues that need to be researched on the low-temperature return-water cogeneration heat supply technology in the future also had been determined.

Key words: cogeneration; low-temperature return water; absorption heat pump; high backpressure; thermal-electric decoupling

收稿日期:2024-06-19

基金项目:山西省科技重大专项(20181102001)

0 引言

热电联产是提高火电机组能效的最有效途径^[1-2],热电联产集中供热技术受到世界各国普遍关注^[3],尤其在东欧、北欧国家应用比较成熟。丹麦^[4-5]热电联产集中供热占全国总供热量的80%以上,俄罗斯^[6-7]首都莫斯科拥有世界上容量最大的热电厂和供热管网。

在大气污染治理和“双碳”背景下,北方地区城市供暖热源短缺问题突出,而部分城市周边存在大型纯凝机组排放大量余热,可将其作为供暖热源加以利用。但是,火电机组回收乏汽余热供热面临两大难题:一是现有机组大多距离城市负荷中心较远,如何将电厂热量经济地输送至城市;二是传统抽汽供热技术对电厂发电量影响大、供热成本高,乏汽热量大、品位低,如何科学合理设计供热系统以大幅度降低电厂供热成本。为此,清华大学提出了在热力站回水降温、在电厂侧余热利用的低温回水热电联产集中供暖系统^[8-9],理论上可实现电厂余热的高效利用和长距离经济输送。与传统供热技术供回水温度130℃/70℃相比,低温回水热电联产供热技术采用130℃/30℃的供回水温度,大幅提高了供回水温差和管网输送能力,节约了管网投资;另一方面,通过低温回水和电厂侧高比例乏汽余热供热,可大幅降低电厂供热成本,显著降低供热系统运行成本。

2016年,首先应用该技术的山西古交-太原长输供热工程正式投运^[10],项目利用古交电厂6台火电机组,通过37.8 km的长输管线,设计供回水温度130℃/30℃,成功向太原市7 600万m²用户实施集中供热,占太原市集中供热面积的30%。随后,该技术在多个工程继续推广使用,输送距离不断突破,供热面积进一步增加,成为北方地区大型城市供暖的重要解决途径:2018年投运的宁夏灵武电厂-银川长输供热项目,利用灵武电厂2×1 000 MW机组,通过42.6 km长输管线,设计供回水温度130℃/25℃,向银川市8 000万m²用户实施集中供热,占银川市集中供热面积的60%;2023年投运的内蒙托克托电厂-呼和浩特供热项目^[11],利用托克托电厂4×600 MW机组,通过68.4 km长输管线,设计供回水温度125℃/30℃,向呼和浩特市9 100万m²用户实施集中供热,占呼和浩特市集中供热

面积的50%。这些项目的投运,极大的解决了当地集中供热热源不足的难题,取得了良好的经济效益和社会效益,对其他北方城市供热具有很好的借鉴意义。目前,低温回水热电联产供热技术已在石家庄、郑州、济南、大同等北方城市广泛应用。

1 低温回水热电联产供热技术

1.1 低温回水热电联产供热系统构成

2008年,付林^[8]提出吸收式换热概念,基于吸收式循环(Co-generation based absorption heat-exchange, Co-ah)的热电联产集中供热方法,阐述了低温回水热电联产供热系统的原理,其供热系统由电厂供热首站、输送管网、热力站等组成^[12]。

如图1所示,在电厂侧,热网低温回水(25℃)先通过低温加热器加热到约60℃,再通过吸收式热泵加热到约85℃,最后通过尖峰加热器加热到120℃后供给城市。低温加热器直接以汽轮机乏汽为加热热源,吸收式热泵利用汽轮机抽汽为高温热源、尖峰加热器以汽轮机抽汽为加热热源。在热力站侧设置由吸收式热泵、板式换热器等组成的吸收式换热机组,代替传统的板式换热器,在保证用户侧供回水温度60℃/45℃不变情况下,可实现一次网供回水温度由120℃/60℃变为120℃/25℃,实现供热管网的低温回水。

从图2可以看出,吸收式换热机组中,吸收式热泵以120℃的一次网供水作为高温驱动热源,以板式换热器后55℃的一次网回水作为低温热源,共同将用户侧回水从45℃加热到56℃,并使一次网回水温度降低到25℃。

张世刚^[13-14]详细研究了热力站吸收式换热机组,提出了设备在不同工况下稳定运行的系列措施,指出在一次网供水温度从120℃降低到75℃过程中,吸收式换热机组后的一次网回水温度可稳定在30℃,保证低温回水热电联产系统的正常运行,该技术率先在大同一电厂等工程得到了成功应用^[15-16]。

1.2 供热能效评价指标体系

1.2.1 供热等效电

由于电厂同时采用抽汽和乏汽供热,传统“好处归电法”、“好处归热法”不能准确反应低温回水热电联产供热系统的能效情况。为此,李岩等提出

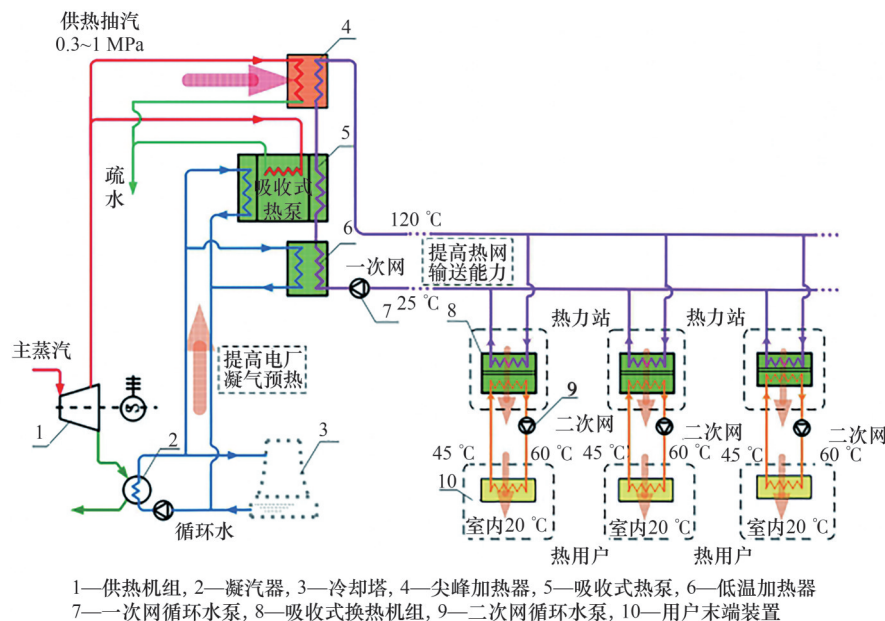


图1 低温回水热电联产供热系统原理

Fig.1 Schematic diagram of low-temperature return water cogeneration heating system

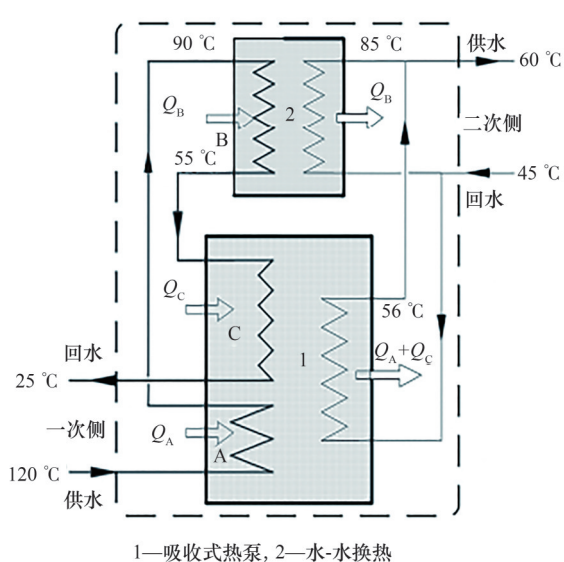


图2 热力站吸收式换热机组流程图

Fig.2 Flowchart of absorption heat exchange unit in heating station

了以供热等效电为核心的供热能效评价指标体系^[12,17],如图3所示。

抽汽供热等效电表示由于抽汽供热减少的发电量/抽汽供热量,其公式为

$$W_{eq,e} = \frac{\Delta W_{2,1}}{Q_e} \quad (1)$$

式中, $W_{eq,e}$ 为抽汽供热等效电, $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{GJ}$; $\Delta W_{2,1}$ 为抽

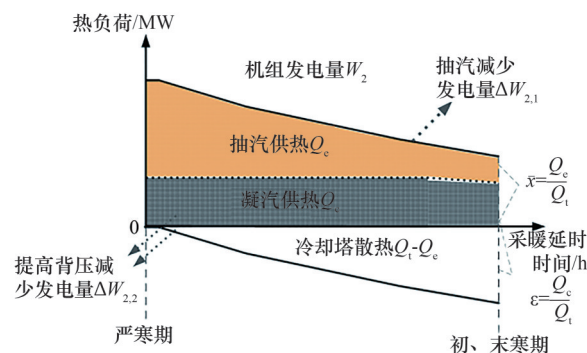


图3 Co-ah方案供热量与发电量的分析

Fig.3 Analysis of heating capacity and electricity generation of the Co-ah scheme

汽减少的发电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; Q_e 为抽汽供热量, GJ 。

$$\Delta W_{2,1} = \int_0^T D_{e,i} (h_{e,i} - h_{c,i}) d_i \quad (2)$$

式中: $D_{e,i}$ 为某 i 时刻机组抽汽流量, t/h ; $h_{e,i}$ 为某 i 时刻机组抽汽比焓, kJ/kg ; $h_{c,i}$ 为机组额定背压下乏汽比焓, kJ/kg 。

凝汽供热等效电表示由于凝汽供热提高背压而减少的发电量/凝汽供热量,其公式为

$$W_{eq,c} = \frac{\Delta W_{2,2}}{Q_c} \quad (3)$$

式中: $W_{eq,c}$ 为凝汽供热等效电, $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{GJ}$; $\Delta W_{2,2}$ 为由于凝汽供热提高背压而减少的发电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; Q_c 为

凝汽供热量, GJ。

热源供热等效电表示由于热源供热减少的发电量/总供热量, 其公式为

$$W_{\text{eq},s} = \frac{\Delta W_{2,1} + \Delta W_{2,2}}{Q_e + Q_c} = \frac{W_{\text{eq},e} Q_e + W_{\text{eq},c} Q_c}{Q_e + Q_c} \quad (4)$$

式中: $W_{\text{eq},s}$ 为热源供热等效电, kW·h/GJ。

对于 2×300 MW 供热机组, 供热抽汽压力一般为 0.4 MPa(a), 其抽汽供热等效电约为 58 kW·h/GJ。因乏汽供热汽轮机背压提升到 20 kPa 时, 凝汽供热等效电约为 10 kW·h/GJ。因此, 采用凝汽供热和增加凝汽供热比例可明显降低热源供热等效电, 从而降低电厂供热成本。

1.2.2 热源供热等效电主要影响因素

李岩^[12]进一步研究发现, 在低温回水热电联产供热系统中, 热源供热等效电的主要影响因素是循环水温度、循环水量和汽轮机背压, 次要影响因素是汽轮机抽汽压力等。

1) 循环水温度

一次网回水温度、低温加热器出口温度、吸收式热泵出口温度、一次网供水温度, 这 4 个温度基本决定了热网回水在电厂的加热过程, 决定了抽汽和乏汽供热的比例。

从图 4 中可以看出, 以 20 kPa 对应数据为例, 其一次网回水温度、低温加热器出口温度、吸收式热泵出口温度、一次网供水温度分别为 25、60、85、130 °C, 以吸收式热泵性能系数 (coefficient of performance, COP) 为 1.7 计算, 设计工况时循环水热量中约有 43% 是由汽轮机乏汽提供的, 其余 57% 是由汽轮机抽汽提供的。按此计算其热源供热等效电约为 37 kW·h/GJ, 较常规抽汽供热等效电 (58 kW·h/GJ) 降低了 36%, 大幅降低了供热能耗。

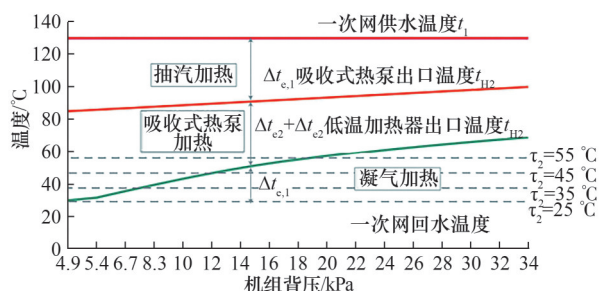


图 4 电厂首站热网循环水温度曲线图

Fig.4 Temperature curve of heating network circulating water at the primary station of the power plant

2) 循环水量

当供热负荷一定时, 循环水供水温度是由回水温度和循环水量共同决定的, 循环水量越大, 其供水温度越低。当机组最高运行背压一定时, 循环水量越大, 回收乏汽供热能力会相应按比例增加, 乏汽供热比例越高、热源供热等效电越低。所以, 一般低温回水热电联产供热系统会采用较大的设计循环水量。

在低温回水热电联产供热项目中, 设计循环水量由设计供热能力和设计供回水温差确定, 还受管道管径和比摩阻等的限制。如古交电厂长输管网采用 $4 \times \text{DN } 1400$ 两供两回循环水管道, 其设计循环水量为 30 000 t/h, 设计供回水温度为 130/30 °C, 输送热功率约为 3 500 MW。

3) 汽轮机背压

图 4 中可以看出, 低温加热器出口温度是由汽轮机背压直接决定的, 吸收式热泵出口温度也受汽轮机背压影响。表面上看, 汽轮机背压越高, 低温加热器和吸收式热泵出口温度也就越高, 乏汽供热比例也越高。但汽轮机背压升高时, 低压缸最小流量也需相应增加, 若不能精确匹配, 一方面会因汽轮机乏汽量过大而不能全部回收供热, 另一方面, 汽轮机抽汽能力不足会导致系统供水温度偏低。

李岩^[12]研究发现, 在 2×300 MW 机组采用吸收式热泵的供热系统中, 针对不同一次网回水温度, 电厂存在最优运行背压曲线, 使得电厂供热能力最大、供热能耗最优。

从图 5 中可以看出, 当一次网回水温度在 50~60 °C 时, 应采用优化工况点曲线 AB 运行, 此时机组背压取 20 kPa, 汽轮机抽汽能力最大, 保证电厂最大供热能力。当一次网回水温度在 45~50 °C 时, 应采用优化工况点曲线 BC 运行, 随着回水温度降低, 逐步提高机组背压, 在保证电厂供热能力最大的同时增加乏汽供热比例、降低热源供热等效电。当一次网回水温度在 25~45 °C 时, 应采用优化工况点曲线为 CD 运行, 随着回水温度降低, 反向降低机组背压, 此过程中电厂最大供热能力保持不变, 乏汽供热比例保持不变, 乏汽供热等效电因背压降低而继续降低。

古交、银川等项目进一步提出了电厂采用高压供热技术^[18-21]、不设吸收式热泵的方案。其原理是, 通过大幅提高机组背压至 40~55 kPa, 可利用汽轮机乏汽直接加热循环水至 70~80 °C, 其乏汽供热

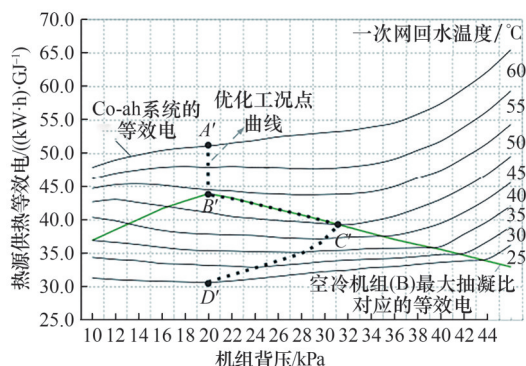


图5 基于空冷机组的系统热源供热等效电曲线

Fig.5 Equivalent electricity curve of heating system based on air-cooled unit's heat source

比例更高,无需再设置吸收式热泵,因此电厂改造投资明显降低。以55 kPa为例,热网循环水从30~80℃采用乏汽直接加热,从80~120℃采用抽汽加热,设计工况乏汽供热比例即为56%。尤其对于直接空冷机组,汽轮机最高允许运行背压一般在40~50 kPa水平,当电厂抽汽+乏汽供热能力可全部对外输出时,更适合采用高背压供热技术。因此,古交电厂、灵武电厂和托克托电厂等均采用了高背压供热方案。

1.3 供热系统经济性评价

供热系统经济性分析,主要包括初投资和运行成本两部分。初投资包括电厂侧改造投资、长输管网投资、热力站改造投资等,运行成本包括热源供热成本、管网水泵电耗和其他运行维护成本。低温回水热电联产供热项目规模大,建设投资高,单位供热成本受到多个因素影响,其中影响最大因素为初投资、年供热量和购热成本^[22-25]。

对于传统供热技术,随着电厂供热距离的增加,管网初投资线性增加,输送电耗也增加很快,供热成本不断上升,《热电联产设计规程》规定的热电厂经济供热半径只有20 km,而低温回水热电联产供热技术破解了这个难题。一方面,低温回水提升了管网输送能力、降低了长输管网造价。常规供热系统供回水温差为60℃(130℃/70℃),低温回水热电联产供热系统供回水温差可达到100℃(130℃/30℃),同等管径下管网输送能力提升66%,因此可大幅降低长输管网初投资。另一方面,在同样输送距离下,供热能力和供热量越大,管网初投资折算的单位供热成本越低。因此,低温回水

热电联产项目多以发挥电厂全部机组最大供热能力为系统设计出发点,且在城市中利用其他调峰热源等措施尽量提升长输管网的采暖季供热量。此外,低温回水实现了电厂高比例乏汽供热,降低了电厂供热成本,古交等电厂乏汽供热比例均在50%以上,供热成本明显降低。

1.4 典型供热案例和成效

古交-太原供热项目利用古交电厂6台机组向太原市提供7 600万m²的集中供热。古交电厂共有2×300 MW、2×600 MW、2×660 MW 6台直接空冷机组,根据不同机组乏汽抽汽供热能力和循环水温升的匹配关系,机组采用5级梯级高背压供热。如图6所示,6号、5号机组供热背压为10 kPa,4号机组为15 kPa,3号机组为33 kPa,2号机组为54 kPa,1号机组为73 kPa;尖峰加热的抽汽由6号、5号、4号、3号机组提供。6台机组总供热能力为4 172 MW,向太原市供热3 484 MW。太原市中继能源站建在长输管网末端和太原市区边缘,距电厂37.8 km,中继能源站同时是隔压站。古交电厂供热的太原市供热片区中,有381座热力站安装了吸收式换热机组,占片区供热面积的60%。

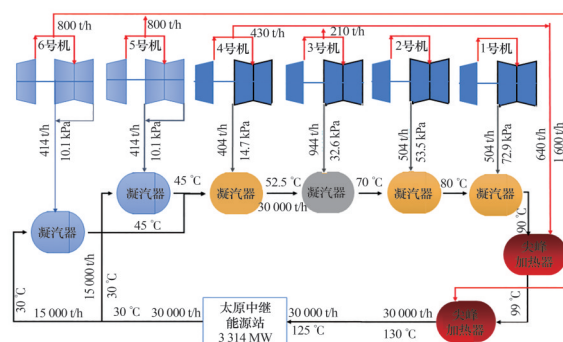


图6 古交电厂供热流程图

Fig.6 Heating process flow chart of gujiao power plant

古交电厂2021—2022年采暖季实际运行情况表明,太原市城区管网平均回水温度降低至30.4℃,37.8 km长输供热管道全程温降小于1℃。如图7所示,采暖季电厂乏汽供热量占总供热量比例达到74.3%,热源等效供热等效电约为30 kW·h/GJ,比常规抽汽供热机组能耗降低50%。

从古交等案例分析,当前低温回水热电联产供热技术已基本成熟,且体现出大温差(供回水温度

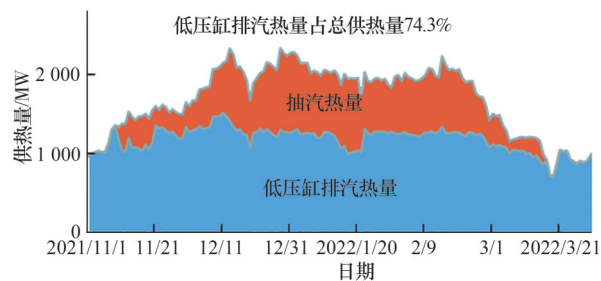


图7 2021-2022年采暖季古交电厂供热量分配
Fig.7 Heat supply allocation of gujiao power plant during the heating season of 2021-2022

130/30℃)、长距离(输送距离40 km以上)、大容量(供热面积5 000万 m^2 以上)、高背压(50 kPa以上)的显著特征,为北方大型城市供热提供了良好的解决方案。

2 热电联产供热系统运行特性

低温回水热电联产供热系统规模庞大、系统复杂、运行影响因素多、运行方式对系统能效影响很大,结合新型电力系统火电灵活性调节需求,深入研究低温回水热电联产供热系统运行特性具有重要意义。当前,国内对这方面的针对性研究还较少。

2.1 供热系统调节方式

传统城市供热系统较为简单,电厂采用抽汽供热,热力站采用板式换热器换热。其调节主要是根据环境温度确定供热负荷,然后以此调节热网循环水量和供水水温,同样供热负荷下其系统能耗主要与水泵电耗有关。因此在考虑管网系统安全稳定因素后,一般采用质调节、量调节、分阶段变流量的质调节3种调节方法^[10]。

低温回水热电联产供热系统中,同样供热负荷下其系统能耗由电厂供热能耗(约占运行成本的80%)和水泵输送电耗(约占运行成本的20%)共同决定^[10],主要受电厂供热能耗影响。而电厂供热能耗又与循环水回水温度、循环水量、循环水供水温度、机组背压等有关。所以,低温回水热电联产供热系统对运行调节要求更高。

李岩等^[26-27]对2×300 MW低温回水热电联产机组研究发现,采用质调节比采用量调节时全采暖季循环水量更大,因此可使凝汽供热量增加约25%,从而显著降低系统供热能耗。

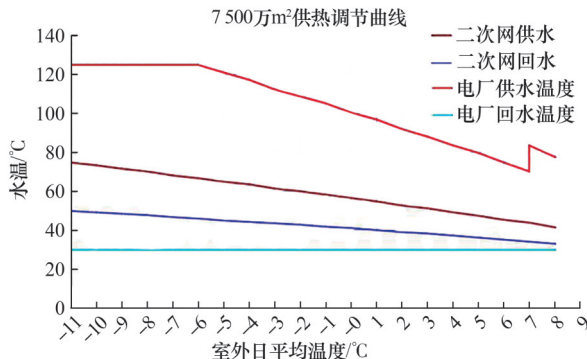


图8 古交电厂设计供热调节曲线
Fig.8 Design heating regulation curve of gujiao power plant

从图8可以看出,古交电厂设计供热调节方式为分阶段改变流量的质调节方式。当环境温度在7℃以下时,系统以最大循环水量运行,调节供水温度;当环境温度在7℃以上时,循环水量减小一档运行,仍然调节供水温度。在实际运行中,质调节升温效果的传递需要较长时间,古交电厂升温调整到太原市最远端热力站(距离约80 km)需要10 h以上。因此,目前古交—太原供热工程实际运行以10 h的前置调整为前提,采用质调节与量调节两种方式相互切换进行供暖季内调节^[10,28]。为了保证热力站吸收式换热机组能正常工作(一次网供水温度不低于90℃),在供热负荷较低时系统采用量调节,保证供水温度稳定在90℃;供热负荷较高时系统采用质调节,以30 000 t/h最大循环水量运行。

此外,低温回水热电联产机组多采用多台机组梯级高背压供热,循环水量、循环水温变化对各机组供热参数的影响,多台机组串并联、变背压对能效的影响,电厂供水温度对一次网回水温度的影响,调峰热源对供热系统的影响等均需详细研究,才能提出合理经济的系统运行调节方法。

2.2 热电联产机组灵活性

2.2.1 常规热电联产机组灵活性

灵活性是指电厂机组发电负荷的可调节范围,对于300 MW、600 MW级煤粉炉电站,一般发电负荷调节范围为35%~100%。常规热电联产机组的供热抽汽能力与主汽量、发电功率直接相关,采暖季受供热负荷制约其发电负荷调节一般在50%以上。

高耀岩^[29]研究了常规抽汽供热机组热电耦合关系,绘制了300 MW供热机组安全运行曲线,如图9

所示。当抽汽量为 200 t/h 时,机组发电负荷率范围为 41%~115%;当抽汽量为 500 t/h 时,机组发电负荷率范围为 77%~88%。

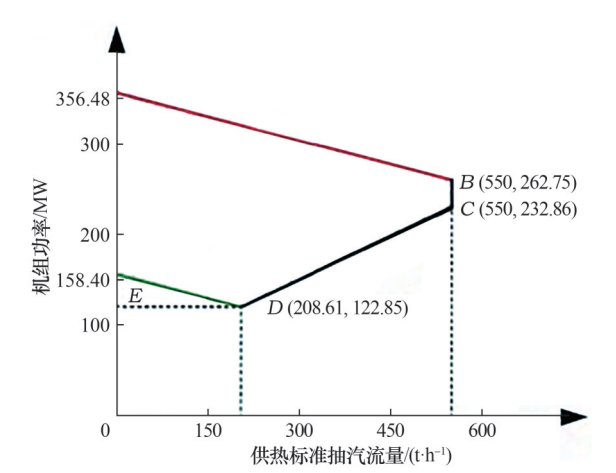


图 9 300 MW 供热机组安全运行曲线
Fig.9 Safe operation curve of 300 MW heating unit

2.2.2 主要灵活性技术

当前,可提升热电联产机组灵活性的主流技术见表 1。由于低温回水热电联产机组多采用高背压供热方式,电厂供热能力等于抽汽+乏汽供热能力的总和,高低压旁路、低压缸零出力、热泵供热、基于蒸汽喷射器供热技术对电厂抽汽+乏汽总供热能力调节范围有限,并不适用于低温回水热电联产机组。电锅炉供热热电解耦能力强,但其投资大、热经济性差。大型热水储热罐在华能丹东等热电厂得到成功应用,结合地方调峰电价政策取得了较好的收益,比较适合低温回水热电联产系统采用。

李刚^[30]研究了适用于长输热力管网的蓄热罐系统,在华能上安电厂输送能力为 1 350 MW 的长输热力管网中设置容量为 8 万 m³、蓄热功率为 400 MW 的蓄热罐,能够使电厂 4 台供热机组发电负荷降低 267 MW、发电负荷率可调范围降低 16%。

表 1 深度调峰技术综合分析对比
Tab.1 Comprehensive analysis and comparison of deep peaking technologies

调峰技术						
项目	储热型	非储热型				
	储热罐	高、低压旁路供热	低压缸零出力供热	电锅炉供热	热泵供热	基于蒸汽喷射器供热技术
原理	设置储热装置或增设额外热源,缩小热电供求在时间上的不匹配程度	通过旁路将高品位蒸汽减温减压后供热	将低压缸切除,让中压缸排汽供热,达到热电解耦的目的	通过电锅炉将电能转化为热能实现热电解耦	通过热泵回收余热,扩大热电比	通过蒸汽喷射器匹配不同压力的蒸汽进行供热
技术特点	短时间将热力生产与电力生产分离	通过匹配高、低压旁路蒸汽流量,避免锅炉再热器温度超限和汽轮机轴向推力超限的风险	中压缸排汽直接供热,机组处于背压供热运行状态	消耗富裕电能补足供热	消耗少量高品质热源,获得大量低品质热源	高压蒸汽引射低压蒸汽,可充分利用乏汽
调峰性能	在一定程度上弱化供热机组的热电耦合特性	调峰能力强,上限为“停机不停炉”	可实现一定的热电解耦	可实现机组的零上网或负上网	调峰能力有限	具有近全负荷解耦的功能特性
优势	改造程度小,供热性能好	投资小,热电解耦能力较强	投资小,运行灵活,供热能力好	改造程度小,热电解耦能力强	无需提高机组背压来利用乏汽增加供热	乏汽利用率高,供热能力好
局限性	占地面积大,投资大	热经济性差	热电解耦能力有限	投资大,热经济性差	应用要求高	占地面积较大,系统较复杂

2.2.3 其他灵活性技术

1) 利用热网和建筑物的热惯性调峰

秦冰^[31]提出利用热网和建筑物的热惯性实施热电联产机组调峰的运行模式。在热电机组供热热量较大时,使供热介质和建筑物室内温度有限升

高,将热量储存在热网和建筑物中;在热电机组供热热量较小时,供热介质和建筑物室内温度可有限度下降,将储存在热网和建筑物中的热量释放出来。通过试验发现,如图 10 所示,以 24 h 为 1 个周期,供水温差在 20~30 ℃ 循环,相当于供热量在 67%~

100% 之间的一个循环,用户室温无明显变化。

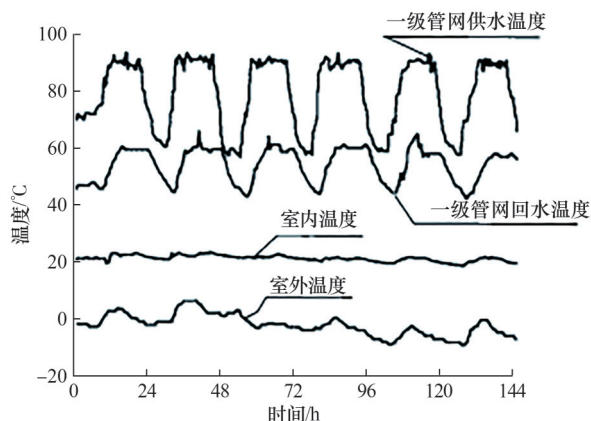


图 10 一级管网供水温度的周期变化对室内温度的影响

Fig.10 Impact of periodic changes in water supply temperature of the primary pipe network on indoor temperature

2) 利用长输管网回水侧容量蓄热

张赟纲^[32]提出利用长输管网回水侧容量蓄热技术。裕中电厂-郑州长输管网输送距离约为 26 km,在保证隔压站对城市输出热量不变的情况下,通过局部时段(约 4 h)将长输管网回水侧水温从 53 °C 提高到 59 °C,可实现利用回水侧水容量蓄热,如图 11 所示。蓄热时段电厂供回水温度为 116 °C/59 °C,放热时段电厂供回水温度为 104 °C/53 °C,放热阶段比蓄热阶段电厂实际供热负荷降低了 10%。

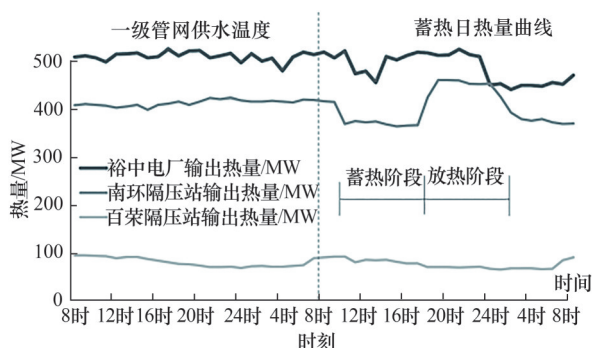


图 11 裕中电厂蓄热前后热负荷输出曲线

Fig.11 Heat load output curve of yuzhong power plant before and after thermal storage

上述灵活性技术中,供热机组安全运行曲线提供了很好的灵活性分析方法;设置大型蓄热罐,可大幅度实现机组热电解耦;利用建筑物和长输管网

回水侧蓄热,可为低温回水热电联产供热系统提供一定的调节能力。然而,低温回水热电联产机组采用梯级高背压供热技术,多台机组抽汽、乏汽供热变工况繁杂,采暖季供热负荷变化幅度大、灵活性变化大,供热系统热惯性大,灵活性技术对机组的影响程度和适用性还需深入分析。

2.3 新能源供热技术

低温回水热电联产供热系统是北方城市供热重要的新场景,新能源供热是新能源大规模发展后能源利用面临的新课题,也是国内研究的热点^[33-34],研究新能源谷电和低温回水热电联产供热系统耦合的方案,提升能源利用效率和系统经济性,对加快推动新能源供热具有重要意义。新能源谷电具有间歇性和能量高品质的显著特征,与电锅炉供热相比,利用电热泵供热的能源利用效率更高。

孙健等^[35-36]研究了新能源谷电与一次网结合的供热方案,并依托 10 万 m²热力站进行了电动热泵与蓄热罐组合运行实验,系统原理如图 12 所示。在当地白天 12 h 无谷电模式下,关闭电动热泵,二次网仅通过板式换热器与一次网换热,一次网热水首先进入板式换热器降温,然后从蓄热罐顶部进入存储起来,蓄热罐在夜间模式储存的冷水从底部排出进入一次网回水,白天模式运行完毕后蓄热罐内的冷水被置换为热水。夜间 12 h 利用谷电驱动电动热泵,蓄热罐内的热水从顶部流出,与经过板式换热器的一次网热水混合后进入电动热泵降温,离开电动热泵后的部分冷水从蓄热罐底部进入存储起来,其他冷水进入一次网回水管网。试验发现,电动热泵 COP 可达到 6.98,电动热泵仅在夜晚运行,通过蓄热罐储存冷水,可实现利用谷电供热的同时,全天一次网回水保持 27 °C。

新能源谷电供热是北方地区普遍课题,低温回水热电联产供热系统是重要的供热场景,谷电可提供廉价供热热源,低温回水热电联产供热系统具备较好的稳定性、储热能力和调节能力,二者的结合有利于发挥综合优势。然而,对于更大容量的谷电与供热系统的互补与存储、运行调节方式、能源利用效率和经济性,以及耦合供热系统的运行特性和电厂灵活性的关系等,还需进一步深入研究。

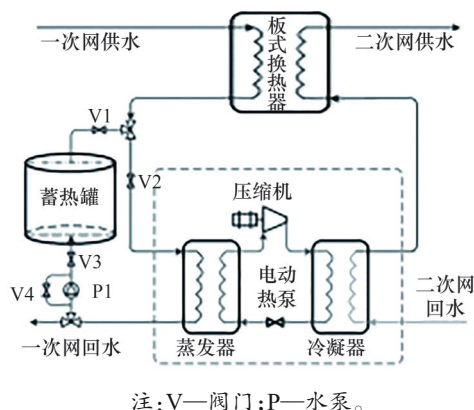


图12 电动热泵与蓄热装置原理图

Fig.12 Schematic diagram of electric heat pump and thermal storage device

3 总结和展望

1) 低温回水热电联产供热技术是解决北方城市供热的一项重大技术, 体现出大温差(供回水温度 $130\text{ }^{\circ}\text{C}/30\text{ }^{\circ}\text{C}$)、长距离(输送距离 40 km 以上)、大容量(供热面积 $5\,000\text{ 万 m}^2$ 以上)和高背压(50 kPa 以上)的显著特征。

2) 当前低温回水热电联产供热技术已基本成熟, 在太原、银川、呼和浩特等城市供热中已发挥了重要作用, 对北方大型城市供热具有很好的参考价值。

3) 为了提升乏汽供热比例, 低温回水热电联产供热系统应以较大循环水量运行, 其调节方式应以质调节为主, 同时兼顾前置调整、热力站吸收式换热机组最低运行水温等要求。供热系统运行调节方式对梯级高背压供热机组供热参数的影响, 多台机组串并联、变背压对能效的影响, 电厂供水温度对一次网回水温度的影响, 调峰热源对供热系统的影响等还需进一步研究, 以提出一套合理经济的系统运行调节方法。

4) 现有灵活性技术中, 蓄热罐技术比较适用于低温回水热电联产系统。低温回水热电联产机组采用梯级高背压供热技术, 多台机组抽汽、乏汽供热变工况繁杂, 采暖季供热负荷变化幅度大、灵活性变化大, 供热系统热惯性大, 蓄热罐、利用建筑物热惯性调峰、利用长输管网回水侧容量蓄热等灵活性技术对机组的影响程度和适用性需深入分析。

5) 新能源谷电具有间歇性和能量高品质的显著特征, 以电热泵+蓄热罐的方式与供热系统结合

能源利用效率较高。对于大容量谷电与供热系统的互补与存储、运行方式、能源利用效率和经济性, 以及耦合供热系统的运行特性和电厂灵活性的关系还需进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 孙奉仲, 杨祥良, 高明. 热电联产技术与管理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [2] 武学素. 热电联产[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
- [3] International Energy Agency. Combined heat and power: Evaluate the benefits of global investment[R]. Heiligendamm: IEA, 2009.
- [4] 佚名. 丹麦能源发展及对我国的启示[J]. 节能与环保, 2007(8): 5-7.
- [5] International Energy Agency. Denmark—answer to a burning platform: CHP/DHC[EB/OL]. [2024-11-04]. <http://www.iea.org/G8/CHP/docs/denmark.pdf>.
- [6] KORPPOO A, KOROBOVA N. Modernizing residential heating in Russia: End-use practices, legal developments, and future prospects[J]. Energy Policy, 2012, 42: 213-220.
- [7] 邹平华. 借鉴俄罗斯经验积极发展我国集中供热事业[J]. 暖通空调, 2000, 30(4): 33-37.
ZOU Pinghua. Study Russian experience to advance China's central heating industry[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2000, 30(4): 33-37.
- [8] 付林, 江亿, 张世钢. 基于Co-ah循环的热电联产集中供热方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(9): 1377-1380+1412.
FU Lin, JIANG Yi, ZHANG Shigang. District heating system based on Co-ah cycles in combined heating and power systems[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2008, 48(9): 1377-1380+1412.
- [9] 付林, 李永红. 利用电厂余热的大温差长输供热模式[J]. 华电技术, 2020, 42(11): 56-61.
FU Lin, LI Yonghong. Long-distance heat-supply mode with large temperature difference using waste heat of power plants[J]. Huadian Technology, 2020, 42(11): 56-61.
- [10] 陈鹏, 王亚楠. 太古长输供热系统运行调节及控制边界条件[J]. 区域供热, 2019, (2): 19-21+42.
- [11] 贾兆丰. 涉及长输供热管网的热电联产改造研究[J]. 工程技术研究, 2024, 9(3): 41-43.
JIA Zhaofeng. Research on the renovation of cogeneration involving long-distance heating pipeline networks [J]. Engineering and Technological Research, 2024, 9(3): 41-43.
- [12] 李岩. 基于吸收式换热的热电联产集中供热系统配置与运行研究[D]. 北京: 清华大学, 2012.
LI Yan. Research on the configuration and operation strategy of district heating system with co-generation based on absorption heat exchange(Co-ah)[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [13] 张世钢, 付林, 李永红, 等. 吸收式换热过程及设备[J]. 暖通空调, 2015, 45(9): 85-90.

- ZHANG Shigang, FU Lin, LI Yonghong, et al. Process and equipment based on absorption heat exchange[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2015, 45(9):85-90.
- [14] 赵玺灵,付林,张世钢.吸收式热泵等效循环模型及性能优化[J].太阳能学报,2010,31(9):1173-1179.
- ZHAO Xiling, FU Lin, ZHANG Shigang. Thermodynamics model and performance optimization of absorption heat pump[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2010, 31(9):1173-1179.
- [15] 孙健,付林,李文涛.降低热网回水温度回收电厂余热的工程案例[J].区域供热,2015(4):54-58+117.
- [16] 付林,孙健,李岩,等.山西大同一电厂基于吸收式换热的热电联产集中供热系统工程测试[J].区域供热,2013(3):10-15+27.
- [17] 江亿,刘晓华,薛志峰等.能源转换系统评价指标的研究[J].中国能源,2004,26(3):27-31.
- [18] LI Wentao, ZHAO Jingquan, FU Lin, et al. Energy efficiency analysis of condensed waste heat recovery ways in cogeneration plant[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 101: 616-625.
- [19] 赵世飞.燃煤高背压热电联产机组适用性研究[D].北京:华北电力大学,2019.
- ZHAO Shifei. Adaption research on coal-fired combined heat and power plant with high back-pressure turbine[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [20] 张福祥.热电联产机组能量梯级利用及灵活调峰运行[D].北京:华北电力大学,2020.
- ZHANG Fuxiang. Energy cascade utilization and flexibility enhancement of the combined heat and power unit[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [21] 李文涛,袁卫星,付林,等.汽轮机高背压供热方式能耗分析[J].区域供热,2015(4):10-17.
- [22] 李永红,张世刚,付林.不同热网回水温度对电厂余热回收供热的经济性影响[J].区域供热,2015(4):5-9.
- [23] 于森,张明.不同热源条件下长输热网的经济性[J].煤气与热力,2017(11):5-9+22.
- YU Miao, ZHANG Ming. Economy of long-distance heat-supply network under different heat source conditions[J]. Gas & Heat, 2017(11):5-9+22.
- [24] 张戮,许国春,高颖艳.大温差长输供热项目供热成本影响因素分析和热价定价建议[J].价值工程,2020,39(27):28-30.
- ZHANG Tao, XU Guochun, GAO Yingyan. Heating cost impact factors analysis and heat price determination suggestion of large water temperature difference long-distance heating project[J]. Value Engineering, 2020, 39(27):28-30.
- [25] 原峰.太古供热长输管线耗电输热经济性分析[J].山西建筑,2018,44(34):181-182.
- YUAN Feng. EHR Economic analysis on Tai-Gu heating long-distance transportation pipeline[J]. Shanxi Architecture, 2018, 44(34):181-182.
- [26] 李岩,付林,张世钢,等.基于吸收式换热的热电联产集中供热系统的运行调节[J].区域供热,2013(3):1-4+35.
- [27] 吴彦廷,尹顺永,付林,等.热电协同提升热电联产灵活性[J].区域供热,2018(1):32-38.
- [28] 樊敏,高海旺,武政.浅谈超大型集中供热系运行优化策略[J].区域供热,2020(5):1-11.
- [29] 高耀崧.火电机灵活运行控制关键技术研究[D].北京:华北电力大学,2019.
- GAO Yaokui. Research on key technologies of flexible operation control of thermal power units[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [30] 李刚,李钊,焦国军,等.适用于长输热力管网的蓄热罐系统研究[J].区域供热,2021(6):12-18.
- [31] 秦冰,付林,江亿.利用系统热惯性的热电联产电力调峰[J].煤气与热力,2005,25(10):6-8.
- QIN Bing, FU Lin, JIANG Yi. Electric peak shaving for CHP plant by using thermal inertia of heat-supply system[J]. GAS & HEAT, 2005, 25(10):6-8.
- [32] 张贻纲,张志鹏,李登峰.长输管网蓄热技术在“热电解耦”中的应用探讨[J].区域供热,2020(4):22-30.
- [33] International Energy Agency. District energy systems in China: Options for optimization and diversification[M]. Paris: IEA, 2017.
- [34] 郑进福.利用供热系统热惯性促进风电消纳的热电优化运行研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
- ZHENG Jinfu. Optimized operation of combined heat and power system by utilizing thermal inertia of district heating system for wind power integration[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [35] 孙健,刘靖宇,谈政,等.电动热泵与蓄热组合实现低温回水实验研究[J].暖通空调,2020,50(2):72-75+52.
- SUN Jian, LIU Jingyu, TAN Zheng, et al. Experimental study on low temperature return water with combination of electric heat pump and heat storage system[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2020, 50(2):72-75+52.
- [36] 张立钦,苗青,唐道轲,等.电热泵降低一次网回水温度的应用分析与实验[J].区域供热,2017(2):1-4+19.



第一作者简介:赵耀华(1983—),男,研究员级高级工程师,主要从事能源电力技术等方面的研究, yhzhaol012@ceec.net.cn;



通信作者简介:吕俊复(1967—),男,教授,中国工程院院士,主要从事循环流化床燃烧理论与技术方面的研究, lvjif@mail.tsinghua.edu.cn;



李少华(1982—),男,研究员级高级工程师,从事能源电力技术研究, lish@ncep.com.cn。

(编辑 沈凡卉)