

凝汽器罗茨水环真空泵抽气系统控制与仿真

王骏¹, 朱灵瑜², 吴正勇¹, 卢承斌¹, 姚永灵¹, 黄恩和²

(1. 江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211106;

2. 东南大学能源与环境学院, 江苏 南京 210096)

摘要:文中针对目前电厂凝汽器采用的罗茨-水环真空泵复合抽气系统存在的配置不当、凝汽器真空度降低等问题,提出了两级压缩的罗茨水环真空泵变频控制抽气系统,通过合理分配两级压缩比,改善抽气性能,降低系统抽气功率。基于真空泵数学模型建立抽气系统仿真试验平台,以提高抽气能力、降低泵组功率为目的确定最优运行方案并制定相应变频系统控制策略。进行了凝汽器进汽量、循环水量阶跃和启动阶段真空建立试验,结果表明抽气系统控制策略可靠,系统运行平稳,相比于定转速系统,变频系统节能效果明显。

关键词:气冷式罗茨泵;水环真空泵;控制策略;压缩比分配;变频系统

中图分类号:TM621

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2020)04-0214-06

0 引言

汽轮机抽气系统对凝汽器真空会产生较大影响,水环真空泵因具有结构简单、抽速大等优点,广泛运用于汽轮机抽真空系统^[1-3]。一方面由于水环真空的工作介质为水,工作液在达到腔体压力对应的饱和温度时,就会发生汽化,因此存在极限抽气压力。另一方面,凝汽器压力随季节变化,因此真空泵要有较大变化范围的压缩比,一般为10到40。水环真空泵作为一种容积泵其压缩比虽然能在一定范围内变化,但压缩比变化过大时,会带来较大的能耗与附加损失。针对上述问题,某些发电厂开始采用罗茨水环复合真空泵抽气系统^[4-9],将罗茨泵用作前级泵,提高水环真空泵进口吸气压力和抽气能力,虽相比水环真空泵抽气系统能耗已有降低,但仍存在配置不当的问题。如文献[5]为维持凝汽器真空(机组正常运行时),应用了罗茨水环复合真空泵的抽气系统,旨在降低正常运行时的电耗,但不可用于机组启动时。文献[9]考虑系统启动建立真空问题,但系统复杂且由于配置不当存在水环真空泵振动问题。

文中基于罗茨式机械真空泵与水环真空泵组合,针对电厂凝汽器给出了一种罗茨水环真空泵变频控制抽气系统,其中水环真空泵转速可根据不同凝汽器负荷自动调整。根据罗茨水环复合真空泵抽气系统原理,建立了其相应的数学模型,并以某600 MW机组为研究对象,建立动态仿真试验平台,确定抽气系统变频控制策略,通过凝汽器阶跃试验进行验证。

收稿日期:2020-03-17;修回日期:2020-04-23

1 罗茨水环真空泵抽气系统及数学模型

1.1 抽气系统结构

图1为罗茨水环真空机组抽气系统示意,该系统主要由水环真空泵、气冷式罗茨泵、中间混合式喷水冷却器和水环真空泵变频系统组成。凝汽器的抽气,首先进入气冷式罗茨泵中,经过压缩后气体压力有所升高,随后进入喷水冷却器进行冷却降温,冷却后的混合气体在水气分离后,被送入水环真空泵,此时的气体压力已远离其极限压力,使机组具有较高的运行可靠性。凝汽器中漏入的不凝结气体和空气,会影响到换热过程,因此文中系统采用混合式喷水冷却器代替传统罗茨水环机组的表面式换热器。冷却器底部设有水泵,依靠水泵将剩余的水输送回凝汽器热井中。

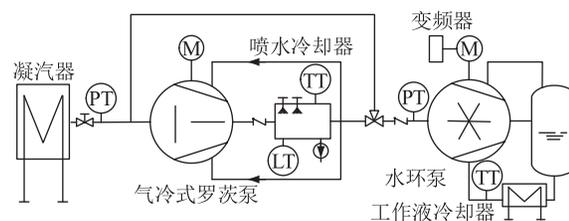


图1 罗茨水环抽气系统示意

Fig.1 Schematic diagram of the Roots water ring pumping system

该系统最关键的是采用罗茨泵和水环真空泵结合进行两级压缩,综合利用两者的优势使抽气系统的性能得到改善,抽气系统的功率因此而降低。由于真空机组中间点压力受后级水环真空泵转速影响,进而决定了消耗的总功率及泵组抽气系统的性能,因此水环真空泵的转速选取和控制策略是文中研究重点。根据机组凝汽器在不同负荷、季节下

的压力,在有效建立并维持凝汽器真空和保证满足抽气系统要求的前提下,通过实现罗茨水环真空泵的压缩比的最佳分配,来降低抽气系统的功率。

1.2 气冷式罗茨泵数学模型

罗茨真空泵系统包括泵体冷却器、转子和泵体,为了实现对转子和泵体的有效降温,在泵体上开设有返冷气口,其工作原理如图2所示。当罗茨泵转子旋转时,凝汽器抽气依次经过吸气、返冷气冷却和排气压缩这3个阶段,当排气口与吸气腔室相通时,腔室中实现高压气体的反冲入,并且腔室中的气体被瞬间压缩^[10-13]。罗茨泵排气口压力与吸气口压力比值为罗茨泵压缩比,由其后水环真空泵转速决定,若水环真空泵转速较小,则罗茨泵压缩比较大。

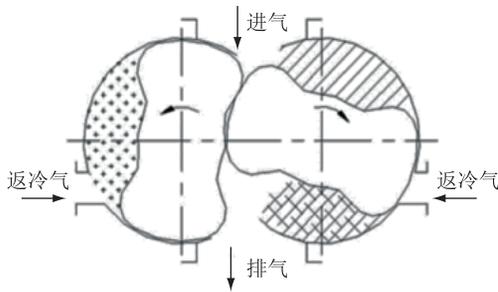


图2 气冷式罗茨泵工作原理

Fig.2 Air cooled Roots pump working principle diagram

不考虑返流等实际情况的理想抽气速率称为罗茨真空泵的理论抽速^[14]:

$$s_{thl} = 4A_0Ln \quad (1)$$

式中: s_{thl} 为罗茨泵理论抽速, m^3/min ; A_0 为有效吸气面积(泵体腔室), m^2 ; L 为转子的长度, m ; n 为罗茨泵转速, r/min 。

在抽气系统实际运行过程中,罗茨泵端盖与转子等处存在着一定间隙,一部分出口高压气体返流,导致理论抽气速率大于实际抽气速率,间隙大小和进出口气体压差主要影响返流气体流量,理论抽速与实际抽速间有如下关系^[14]。

$$s_1 = s_{thl} - u(p_{21}/p_{11} - 1) \quad (2)$$

$$u = 1.2 \times 10^{-4} [L(2\delta_1 + \delta_2) + (D + 2R)(\delta_3 + \delta_4)] \quad (3)$$

式中: s_1 为罗茨泵实际运行时的抽气速率, m^3/min ; p_{11} 、 p_{21} 分别为罗茨真空泵的吸气压力和排气压力, kPa ; u 为通过薄壁孔的流量率, m^3/min ; δ_1 为转子与泵壳径向间隙, m ; δ_2 为转子相互之间的间隙, m ; δ_3 为侧盖与轴活端转子间的轴向间隙, m ; δ_4 为端盖与轴死端转子间的轴向间隙, m ; D 、 R 分别为罗茨泵壳体直径和叶片顶圆半径, m 。

实际罗茨泵的抽气速率与其理论抽气速率之比,称为容积效率 λ_H ,则有:

$$\lambda_H = \frac{s_1}{s_{thl}} \quad (4)$$

在罗茨泵的运行过程中,其压缩过程几乎完全发生在出口处,压缩气体功率为:

$$W_1 = 60(p_{21} - p_{11}) \frac{s_1}{\eta_1 \lambda_H} \quad (5)$$

式中: W_1 为压缩气体有用功率, kW ; η_1 为罗茨真空泵的机械效率,表示克服摩擦做功。

1.3 水环真空泵数学模型

随着转子的转动,水环真空泵中水环与叶轮形成的吸气腔室的容积不断发生变化,依次完成吸气压缩、排气过程,其工作原理如图3所示^[10-13]。

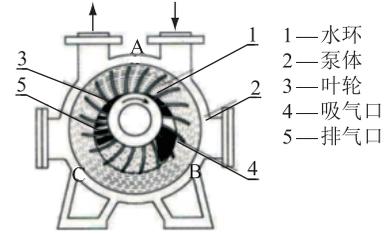


图3 水环真空泵工作原理

Fig.3 Water ring pump working principle diagram

水环真空泵的理论抽气速率受泵体结构、叶片插入工作液深度等因素综合影响,具体如下^[14]:

$$s_{thw} = \pi n r_2^2 b_0 \frac{V - V_0}{V_0} \left[\left(1 - \frac{a}{r_2}\right)^2 - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 \right] \quad (6)$$

式中: s_{thw} 为真空泵的理论抽速, m^3/min ; b_0 为叶轮的轴向宽度, m ; r_1 为叶轮轮毂半径, m ; r_2 为叶片的顶圆半径, m ; a 为叶片插入液环的深度, m ; V_0 为叶轮所有叶片所占的体积; V 为叶轮每转一周叶片扫过的体积; n 为叶轮的转速, r/min 。

在真空泵实际运行过程中,吸气压力和工作液温度决定了抽气速率。水环真空泵内工作液的实际温度往往高于额定温度 $15^\circ C$,导致工作液部分汽化,从而提高水蒸气分压,降低了实际抽气速率,容积效率 r_H 可表示为:

$$r_H = \frac{s_w}{s_{thw}} = \frac{p_{1w} - p_e}{p_{1w} - p_{15}} \quad (7)$$

式中: s_w 为实际抽气速率, m^3/min ; p_{1w} 为水环真空泵的入口压力, kPa ; p_{15} 为额定温度 $15^\circ C$ 下对应的饱和压力, kPa ; p_e 为实际工作液温度对应的饱和压力, kPa 。水环真空泵的气体压缩过程中压缩热被工作液吸收,因此可视为等温压缩过程,其功率为:

$$N = 3.837 \times 10^{-5} \frac{p_{1w} s_w}{\eta_w} \lg \frac{p_{2w}}{p_{1w}} \quad (8)$$

式中: η_w 为水环真空泵等温总效率; p_{2w} 为水环真空泵排气压力,kPa。

2 动态仿真试验平台

2.1 运行方案计算

以某台 600 MW 机组为研究对象,基于美国 NI 公司图形化软件 LabVIEW 平台,建立动态仿真试验。机组配备 N-36000 型凝汽器,该凝汽器为单流程、双壳体、双背压、表面式横向布置凝汽器,设计循环冷却水温度为 20 °C,文中研究对象为低压侧凝汽器,并建立其仿真模型。冷却水流量为 100% 时凝汽器低压侧压力随机组负荷及冷却水温度变化情况见图 4。根据美国 HEI 标准,单侧凝汽器漏空气量 60 kg/h。根据最大要求抽气量(满足不同凝汽器背压),来选择罗茨-真空泵机组,机组高低压缸各配备 1 台罗茨水环真空泵机组,分别为 ZJQ-1800 型气冷式罗茨泵,后接 2BEC-50 型水环真空泵。

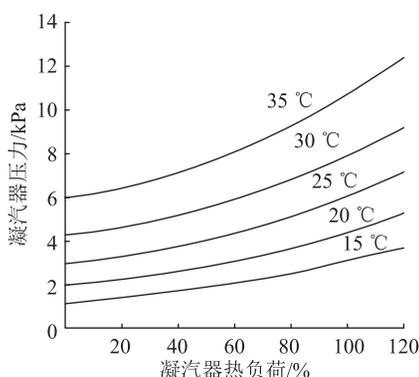


图 4 凝汽器特性曲线

Fig.4 Condenser characteristic curve

在凝汽器抽真空系统中,凝汽器循环冷却水作为水环真空泵冷却器的冷却水,水环真空泵工作液温度 t_{v2} 表达式如下^[15-16]:

$$t_{v2} = t_{w1} + \delta t_v + \Delta t \quad (9)$$

式中: t_{w1} 为凝汽器循环冷却水温度,°C; Δt 为水环真空泵腔体内工作液温度与冷却器出口工作液温之差,取 2.5 °C; δt_v 为冷却器出口工作液温度与进口冷却水温度之差,计算中取 2.78 °C。

抽气系统功率即为罗茨泵与水环真空泵功率之和,由式(5)和式(8)可得:

$$W_{total} = N + W_1 \quad (10)$$

根据真空泵的运行特性和数学模型,凝汽器背压一定时,抽气系统功率随罗茨泵压缩比的增大先减小后增大,存在使得抽气系统功率最低的罗茨泵压比,认为此种压比分配方式为最优运行方案。随着凝汽器运行工况的变化,最优罗茨泵压缩比也将发生改变,以凝汽器循环水流量为 100%,机组负荷

100%为例,不同罗茨泵压缩比、循环水温度下抽气系统功率的变化曲线如图 5 所示。

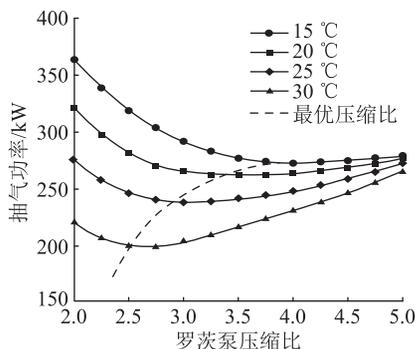


图 5 不同罗茨泵压缩比和循环水温度下抽气系统(100%负荷)耗功

Fig.5 Power consumption of 100% load pumping system with circulating water temperature and Roots pump compression ratio

2.2 抽气系统控制策略

文中抽气系统会根据不同凝汽器负荷下的压力自动调整水环真空泵转速,自动调整罗茨真空泵的出口压力即水环真空泵的入口压力(后称中间点压力),使抽气系统总功率达到最小。中间点压力的控制回路如图 6 所示^[17],罗茨真空泵的压缩比 k 可用于表示抽气系统中间点压力。图 6 中,控制系统的控制目标为上文求得不同凝汽器负荷和循环水温度下的最优罗茨泵压缩比。仿真系统实时采集中间点压力,根据抽气系统进口压力确定罗茨泵实际压缩比,并与目标值进行比较。PI 控制器根据偏差值计算出所需的水环真空泵转速增量指令,变频器根据指令向驱动电机发出转速调整信号,直至达到目标值,再将得到的转速输入系统数学模型。若计算罗茨真空泵压比大于目标值,升高水环真空泵转速;若计算值小于目标值,则降低水环真空泵转速降低。

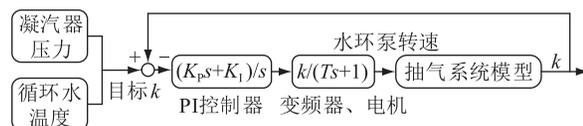


图 6 中间点压力控制回路(抽气系统)

Fig.6 Intermediate point pressure control loop of the pumping system

以下传递函数用于表示控制系统中的 PID 控制器:

$$G(s) = K_p + K_i/s \quad (11)$$

式中: K_i 为积分系数; K_p 为比例系数。

$$G(s) = k/(Ts + 1) \quad (12)$$

式中: k 为调速系统的增益; T 为调速系统惯性时间常数,s。

3 仿真试验结果及分析

基于已有动态试验平台,分别进行凝汽器进汽量及循环水流量动态阶跃仿真试验。下文试验初始条件均为凝汽器进汽量 100%,循环水流量 100%,循环水温度 20 ℃。

3.1 凝汽器进汽量阶跃试验

凝汽器进汽量阶跃试验如图 7—图 9 所示。凝汽器进汽量由 100% 阶跃下降至 50%,循环水量不变,循环水温度保持 20 ℃,凝汽器压力随负荷的降低而相应降低。抽气系统中罗茨泵相应动态响应如图 7 所示,其中,红色线表示文中变频控制罗茨水环真空泵抽气系统,水环真空泵转速能够随凝汽器负荷、压力、循环水温度等的变化自动调整;蓝色线表示水环真空泵不采用变频控制,始终以最大转速(即 700 r/min)运行的定转速抽气系统下罗茨泵压缩比的动态响应。

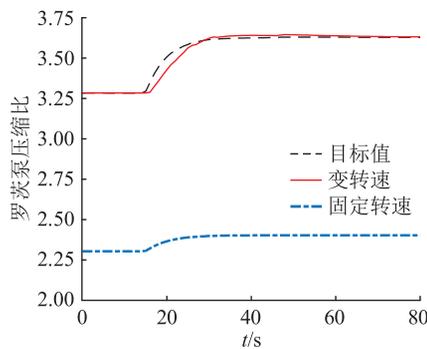


图 7 罗茨泵压缩比动态响应

Fig.7 Condenser inlet steam step test-Roots pump compression ratio dynamic response

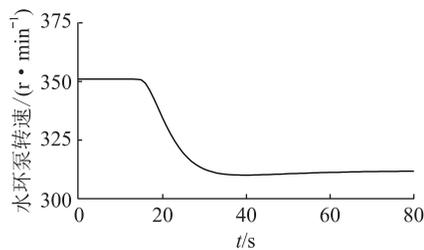


图 8 水环真空泵转速动态响应

Fig.8 Condenser steam inlet step test-water ring pump speed dynamic response

由图 7 可知,随着凝汽压力的减小,目标罗茨泵最优压缩比增大,抽气系统需要罗茨泵承担更大的压比以提高水环真空泵的入口吸气压力及容积效率。对比变转速与定转速系统,变转速系统能够快速达到最优目标罗茨泵压缩比,而定转速系统中罗茨泵压缩比虽有增加,但增幅较小。自动变转速罗茨水环真空泵抽气系统及定转速罗茨水环真空泵

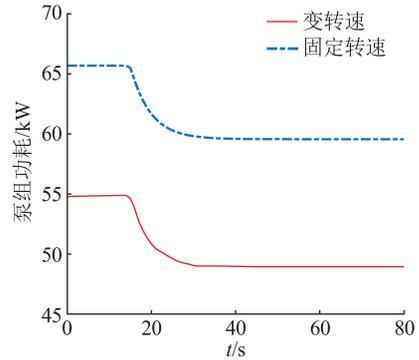


图 9 泵组功率动态响应

Fig.9 Condenser steam inlet step test-pump group power consumption dynamic response

转速动态响应如图 8 所示。由图 8 可知,水环真空泵转速由 350 r/min 自动降至 310 r/min,转速变化响应迅速。由图 9 可知,随负荷减小(凝汽器),变转速与定转速系统功率均降低,变化趋势类似,但与定转速系统相比,变转速系统的总消耗功率仍明显较低。

3.2 凝汽器循环水流量阶跃试验

凝汽器循环水量阶跃试验如图 10—图 12 所示。凝汽器的循环水量由 100% 阶跃下降至 50%,进汽量不变,循环水温度保持 20 ℃,凝汽器压力随循环水量的减小而升高。

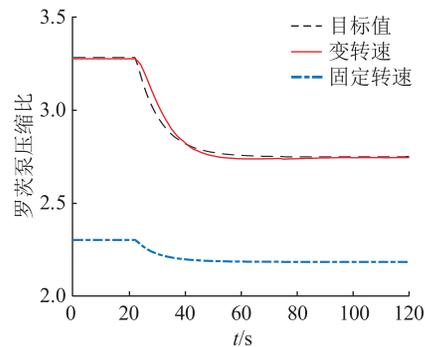


图 10 罗茨泵压缩比动态响应

Fig.10 Condenser circulating water step test-Roots pump compression ratio dynamic response

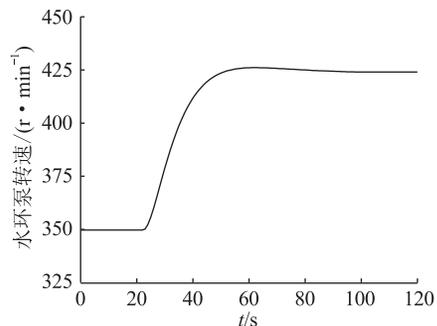


图 11 水环真空泵转速动态响应

Fig.11 Condenser circulating water step test-water ring pump speed dynamic response

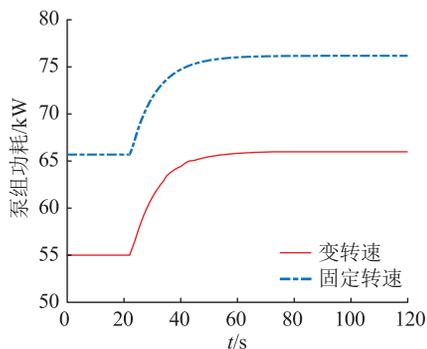


图 12 凝汽器循环水量阶跃泵组功率动态响应

Fig.12 Condenser circulating water step test-pump group power consumption dynamic response

由图 10 可知,当凝汽压力升高时,目标罗茨泵最优压缩比减小,同样变转速系统通过提高水环真空泵转速快速达到最优目标罗茨泵压缩比,而相比之下定转速系统中罗茨泵压缩比仅仅略有减小。水环真空泵转速动态响应见图 11。可知,水环真空泵转速由 350 r/min 自动上升至 425 r/min,转速变化响应迅速。由图 12 可知,随着凝汽器压力的升高,变转速与定转速系统功率均增大,变转速系统功率依旧低于定转速系统。

3.3 启动阶段真空建立试验

在启动建立真空阶段,机组首先打开旁路并启动水环真空泵,此时罗茨泵暂不投入运行,观察水环真空泵的运转是否正常,当凝汽器抽气口压力低于 12 kPa 时,缓慢调整三通阀,同时启动气冷式罗茨真空泵并投入运行,当泵转速稳定后,关闭旁路。图 13 为启动过程凝汽器压力变化曲线。

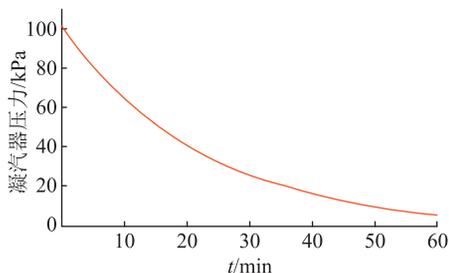


图 13 启动工况凝汽器背压-抽真空时间

Fig.13 Start-up condition condenser back pressure-vacuum time

根据 HEI 关于凝汽器抽真空建立时间的规定,从大气压力到 33.86 kPa 不能超过 30 min,由图 13 可知该系统建立真空大约需要 25 min,完全能够满足 HEI 标准和实际需要。

4 结论

文中针对目前电厂凝汽器采用的罗茨-水环真空泵复合抽气系统存在的配置不当、凝汽器真空度

降低等问题,提出一种罗茨水环真空泵变频控制抽气系统,通过仿真研究得出以下结论:

(1) 建立罗茨水环真空泵抽气系统数学模型,并在此基础上得出了不同凝汽器工况下的最优两级真空泵分配方式,以此作为系统最优运行方案。

(2) 基于 LabVIEW 软件建立动态试验平台,制定变频控制系统转速控制策略,并进行凝汽器阶跃试验。结果表明,控制策略可靠,系统运行平稳。

(3) 将变频系统与定转速系统进行比较,变频系统节能效果明显。

参考文献:

[1] 罗思球. 水环真空泵机组在凝汽器抽真空的应用及介绍[J]. 通用机械,2004(2):28-30.
LUO Siqiu. Application and introduction of water ring vacuum pump unit in condenser vacuum pumping[J]. General Machinery,2004(2):28-30.

[2] 吴河生,范朝光. 300 MW 供热机组水环式真空泵系统技术改造[J]. 江苏电机工程,2010,29(5):70-72,76.
WU Hesheng,FAN Chaoguang. Technical transformation of water ring vacuum pump system for 300 MW heating unit[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2010,29(5):70-72,76.

[3] 金纬. 660 MW 汽轮发电机组真空泵节能改造[J]. 华电技术,2019,41(7):40-42.
JIN Wei. Energy-saving retrofit of vacuum pump for 660 MW steam turbine generator set[J]. Huadian Technology,2019,41(7):40-42.

[4] 刘守斌,杨日尧. 高效罗茨水环真空泵组在空冷机组的应用[J]. 电工技术,2019(14):153-155.
LIU Shoubin,YANG Riyao. Application of high efficiency roots water ring vacuum pump set in air cooling unit[J]. Electrical Engineering,2019(14):153-155.

[5] 冯锐. 罗茨真空泵组在 600 MW 凝汽式机组上的应用[J]. 安徽电力,2019,36(2):62-64.
FENG Rui. The application of roots vacuum pump unit in 600 MW condensing unit[J]. Anhui Electric Power,2019,36(2):62-64.

[6] 陈鑫,程石,郑敏聪. 火电机组凝汽器抽真空系统节能改造[J]. 发电设备,2019,33(1):61-64.
CHEN Xin,CHENG Shi,ZHENG Mincong. Energy-saving retrofit of condenser system for thermal power unit condenser[J]. Power Generation Equipment,2019,33(1):61-64.

[7] 刘玲玉,贺翠连,夏友刚. 火力发电厂凝汽器抽真空系统技术改造[J]. 化工管理,2018(17):98.
LIU Lingyu,HE Cuilian,XIA Yougang. Technical transformation of condenser vacuum system in thermal power plant[J]. Chemical Management,2018(17):98.

[8] 马兰香,韦红旗. 某 340 MW 机组凝汽器改造试验分析[J]. 江苏电机工程,2012,31(1):69-71,74.
MA Lanxiang,WEI Hongqi. Analysis of condenser retrofit test of a 340 MW unit[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2012,31

- (1):69-71,74.
- [9] 宋哲. 罗茨-水环真空泵组在电厂节能改造中的应用[J]. 电力安全技术,2015(12):50-52.
SONG Zhe. Application of Roots-water ring vacuum pump group in energy saving reconstruction of power plants [J]. Electric Power Safety Technology,2015(12):50-52.
- [10] 杨乃恒. 真空获得设备[M]. 北京:冶金工业出版社,1986.
YANG Naiheng. Vacuum acquisition equipment[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,1986.
- [11] 李泽,刘俊杰. 罗茨泵真空及其使用[M]. 四川:四川科学技术出版社,1984.
LI Ze, LIU Junjie. Roots pump vacuum and its use [M]. Sichuan: Sichuan Science and Technology Press,1984.
- [12] TAKADA S. Water-ring pump[J]. Journal of the Vacuum Society of Japan,2009,4(9):367-370.
- [13] 春模. 罗茨鼓风机及其使用[M]. 长沙:中南工业大学出版社,1999.
CHUN Mo. Roots blower and its use [M]. Changsha:Central South University of Technology Press,1999.
- [14] 俞健,杨建明. 水环真空泵数学模型与运行特性[J]. 发电设备,2009,23(2):82-86.
YU Jian, YANG Jianming. Mathematical model and operating characteristics of water ring vacuum pump[J]. Power Generation Equipment,2009,23(2):82-86.
- [15] 胡勇,卓佳讯,黄锦涛,等. 真空泵工作水温对循环水系统优化目标值的影响[J]. 汽轮机技术,2012,54(4):303-305,260.
HU Yong, ZHUO Jiaxun, HUANG Jintao, et al. Effect of working temperature of vacuum pump on optimized target value of circulating water system [J]. Steam Turbine Technology,2012,54(4):303-305,260.
- [16] NAUMOV V A ,VELIKANOV N L . Simulation of operational characteristics of the water-ring vacuum pumps [C]//IOP Conference Series:Materials Science and Engineering,2019.
- [17] 乔东凯. 基于 PLC 和变频器控制异步电动机转速的研究[J]. 机械与电子,2008(7):71-72.
QIAO Dongkai. Research on controlling the speed of asynchronous motor based on PLC and frequency converter [J]. Machine & Electronics,2008(7):71-72.
- [18] 孟彦京,耿娜娜,马汇海,等. 水环真空泵的水环节能控制与研究[J]. 中国造纸,2016,35(4):47-50.
MENG Yanjing, GENG Nana, MA Huihai, et al. Study on the energy saving control of water ring for water ring vacuum pump [J]. China Pulp & Paper,2016,35(4):47-50.
- [19] 王福玉,张景红. 凝结水泵变频改造运行控制解析[J]. 江苏电机工程,2010,29(5):79-81.
WANG Fuyu, ZHANG Jinghong. Analysis of operation control of frequency conversion reform of condensate pump [J]. Jiangsu Electrical Engineering,2010,29(5):79-81.

作者简介:



王骏

王骏(1978),男,硕士,高级工程师,从事常规火电及联合循环机组性能优化工作(E-mail:aries_wj@139.com);

朱灵瑜(1993),女,硕士在读,研究方向为火电机组热力系统建模仿真、性能分析、热工控制;

吴正勇(1981),男,硕士,高级工程师,从事常规火电及联合循环机组性能优化工作。

Control and simulation of Roots water-ring vacuum pump extraction system for condenser

WANG Jun¹, ZHU Lingyu², WU Zhengyong¹, LU Chengbin¹, YAO Yongling¹, HUANG Enhe²

(1. Jiangsu Frontier Electrical Power Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China;

2. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Based on the prevailing problems of the Roots water-ring vacuum pump combination extraction system for steam turbines that the inappropriate configuration of vacuum pumps leads to the increase of condenser vacuum degree, this paper put forward a Roots water-ring pump frequency conversion control extraction system. Based on the mathematical model of vacuum pumps, a simulation experimental platform for the extraction system is established. Aimed at increasing the pumping capacity and reducing energy-consuming, the optimal operation plan is determined, the control strategy of the frequency conversion system is developed, the condenser step tests are performed. The results show that the control strategy of the pumping system is reliable and the system runs smoothly. And the frequency conversion system has obvious energy saving effect compared to the fixed speed system.

Keywords: gas circulation cooled Roots vacuum pump; water ring vacuum pump; control strategy; compression ratio distribution; frequency conversion system

(编辑 方晶)