

蒸发冷却换流阀系统余热利用可行性研究

徐永生¹, 罗兵¹, 张福增¹, 史一涛², 曹瑞²

(1. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510000; 2. 中国科学院电工研究所, 北京 100190)

摘要: 针对换流阀的结构特点及发热功率的大小, 采用电阻加热块模拟换流阀发热, 建立换流阀蒸发冷却系统实验平台, 对不同功率热负荷下的余热情况进行探索。研究表明: 不同功率热负荷下, 液盒出口温度稳定在55℃左右, 具有较高的回收利用价值, 并据此提出了采用溴化锂制冷机耦合蒸发冷却系统的余热回收技术方案, 建立余热回收系统仿真计算模型。结果表明, 系统综合利用效率为60%, 年供冷量达430 GJ, 并且具有巨大的节能减排效益, 该技术应用前景广阔。

关键词: 蒸发冷却; 余热回收; 系统耦合

Feasibility study on utilization of waste heat in evaporative cooling converter valve system

XU Yongsheng¹, LUO Bing¹, ZHANG Fuzeng¹, SHI Yitao², CAO Rui²

1. China Southern Power Grid Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510000, China; 2. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: According to the structural characteristics of the converter valve and the size of the heating power, the resistance heating block is used to simulate the heating of the converter valve, and an experimental platform for the evaporative cooling system of the converter valve is established to explore the residual heat under different power heat loads. The research showed that: under different power heat load, outlet temperature of the liquid box stabilized at about 55℃, has higher value of recycling, and accordingly the evaporative cooling system using lithium bromide chiller coupling scheme of waste heat recovery technology is put forward, waste heat recovery system simulation model is set up. The results show that the system comprehensive ability and utilization efficiency is 60% and years cooling is 430. GJ, this technology has huge energy conservation and emissions reduction benefits, the technical application prospect is big.

Key words: evaporative cooling; waste heat recovery; system coupling

0 引言

我国国土面积辽阔, 发电和用电地域分

配极不均衡, 主要发电地区集中在内蒙古、四川等地, 而用电集中在华中、华南等地, 因此长距离输电势在必行。特高压直流输电技术具有传输距离远、损耗小和易互联等优

国南方电网公司科技项目 (Z8KJXM20170058)

点，成为最有前景的远距离输电技术。目前我国已经建成多条特高压直流输电工程，有力地支撑了电力行业和整体经济的发展。伴随着特高压直流输电技术的快速发展，国内外越来越多的学者开始关注这一研究课题。

换流阀是高压直流输电系统中实现交流电力变换的核心设备，由上千只晶闸管组合桥路，辅助以稳压、阻尼等模块构成，而晶闸管是电路中最主要的发热器件，因此研究晶闸管的散热问题具有重要的意义^[1]。蒸发冷却技术作为中国科学院电工研究所自主研发的高效冷却技术，充分利用液体相变潜热带走设备热量，系统换热效率高，温度分布均匀，具有安全、高效、环保、高绝缘、自适应和无功耗等优点，已经应用于ECR离子源、换流阀和大型超级计算机等电子设备中^[2-3]。

换流阀发热量高，负荷较稳定，现有蒸发冷却系统的冷却散热量通过冷凝器直接排放到大气中，是一种巨大的能量浪费，余热制冷技术主要指吸收式制冷技术，利用工业生产过程中的废热转化为制冷所需的驱动能源，采用循环性质相近的“发生—冷凝—蒸发—吸收/吸附”的循环过程，实现制冷的效果^[4]。以LiBr水溶液作为制冷剂的吸收制冷系统在我国已经得到了大规模的应用，制冷量从几十千瓦到几兆千瓦，技术成熟。将该技术与换流阀蒸发冷却技术进行耦合，不仅可以保障换流阀的高效冷却，还可以为换流站提供冷量，是一种提高综合利用效率的最佳途径。

1 余热利用系统

蒸发冷却系统采用有机工质进行循环，而溴化锂制冷机推动循环热源一般是水工质，鉴于两者循环所用工质不同，本文采用增加中间换热器的方法实现两个系统的耦合，整个蒸发冷却换流阀余热发电系统如图1所示。它由蒸发冷却模块、中间换热器和溴化锂制冷机等设备组成。蒸发冷却侧，蒸发

冷却工质在蒸发冷却模块加热蒸发，产生高压饱和蒸汽，进入中间换热器进行热交换，工质冷却后回到换流阀冷却模块通道继续冷却循环；溴化锂制冷循环侧，水在中间换热器加热后，进入溴化锂制冷机并进行供热（冷），冷却后返回中间加热器继续加热，热冷不足部分通过储水箱进行调节。

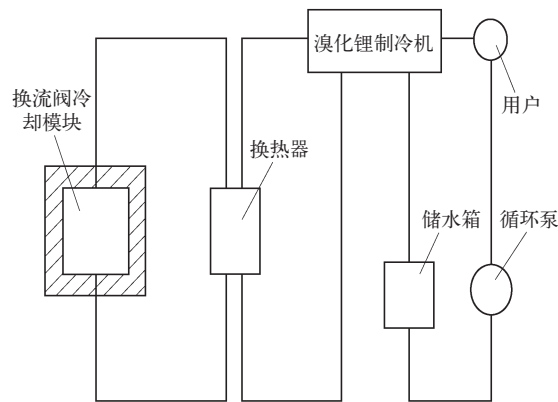


图1 换流阀余热发电系统

Fig. 1 Residual heat power generation system of converter valve

1.1 蒸发冷却系统

基于换流阀机柜的布置形式和发热功率，建立与之相对应的蒸发冷却系统实验平台，如图2所示。该平台由换流阀冷却模块、工质循环回路和冷凝器等设备构成，其中换流阀冷却模块包括发热模块和冷却液盒两个部分。

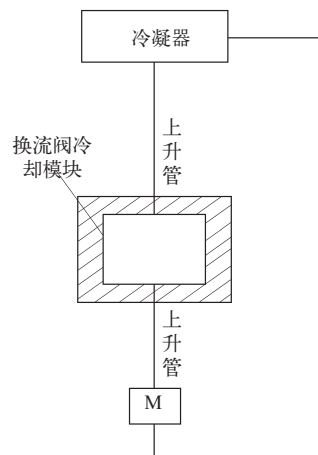


图2 换流阀蒸发冷却系统实验系统

Fig. 2 Experimental system of evaporative cooling system with converter valve

实验遵循贴壁自循环蒸发冷却系统的运行原理,通过给与液盒散热底板紧贴的发热板加载一系列电压来提供不同的功率负荷。发热板产生热损,热量首先以导热的形式通过散热底板传递给液盒内的冷却介质。冷却介质吸收热量,温度逐渐升高达到其沸点汽化形成汽液混合物,由于密度低于回液管路中的单相液体密度,密度差在重力加速度作用下产生流动压头,克服循环管路中的流动阻力维持系统循环,从而起到冷却发热板的作用。

为充分了解不同功率负荷情况下的液盒出口工质的温度情况,对该系统分别进行200~700 W功率热负荷实验,间隔100 W,并逐步升高。

1.2 蒸发冷却模块

蒸发冷却模块如图3所示,整个部分由加热块、液盒和亚克力板三部分构成,液盒紧贴加热块表面,发热块的热量通过液盒快速传给介质,维持发热块表面温度稳定。

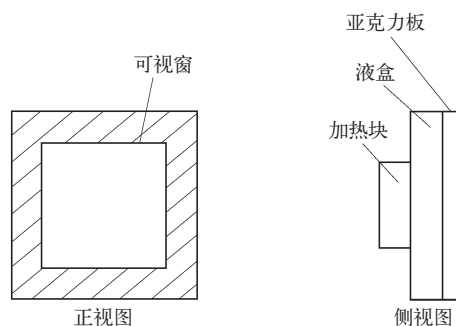


图3 蒸发冷却模块

Fig. 3 Evaporative cooling module

1.3 热源结果

实验结果如图4所示,换流阀蒸发冷却模块出口温度呈现一条直线的趋势,不同负荷情况下模块出口温度均维持在55℃左右,波动幅度在1℃范围以内,这一特点有利于余热利用系统设备的稳定运行,但是出口温度略低,在选择余热制冷设备时也应选择补燃型溴化锂制冷机,方便机组运行过程中的负荷调节。

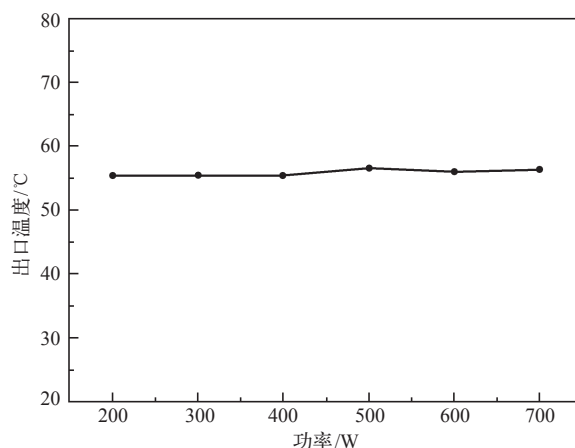


图4 系统功率-出口温度曲线

Fig. 4 System power outlet temperature curve

图5为功率-流量曲线,随着加热功率增加,流量呈现先增大后减小的趋势,尽管热负荷增加以后流量减小,但蒸发冷却模块内部沸腾越来越剧烈,相变带走的热量增加,蒸汽量增加,在进行系统换热器选型时,需考虑热源的这一特点。

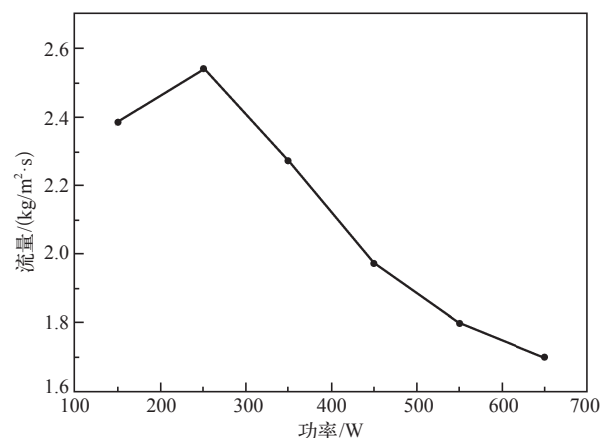


图5 系统功率-出口流量曲线

Fig. 5 System power - outlet flow temperature curve

总的来说,换流阀热源出口温度稳定,工质为汽液两相混合物,随着功率不断增加,气量也增加。单位能量密度高,适合低温余热利用项目。

1.4 系统运行

换流阀余热利用系统实际运行时,通过溴化锂制冷剂产生热(冷)水供用户使用,热(冷)水富余时将热水储存在水箱中,在热负荷不足时,再通过水箱去补充供热,由

于水箱的存在, 整个系统包括政策供热、储热和放热三种运行模式。

1.5 系统仿真

本文以某 ± 800 kV直流输电换流阀为例, 根据各设备的结构原理特点, 采用集中参数法, 基于能量守恒定律进行整个换流阀蒸发冷却系统及余热利用系统的仿真建模, 分别建立换流阀损耗、蒸发冷却、溴化锂制冷机和中间换热器等设备的数学模型。

(1) 换流阀损耗

目前, 换流阀的损耗计算普遍采用IEEE和IEC标准的损耗计算公式。其损耗主要由阀导通损耗和阻尼回路损耗(关断期间)两部分组成。阀导通损耗为阀导通电流与相应的理想状态电压的乘积; 阻尼损耗是阀电容存储的能量随阀阻断电压的级变而产生的。

$$Q = \frac{1}{2}Q_{T1} + \frac{2}{3}Q_{T2} \quad (1)$$

$$Q_{T1} = \frac{N_i I_d}{3} [U_0 + R_0 + R_0 I_d (\frac{2\pi - \mu}{2\pi})] \quad (2)$$

$$Q_{T2} = \frac{U_{v0}^2 f C_{HF} (7 + 6m^2)}{4} [\sin^2 \alpha + \sin^2 (\alpha + \mu)] \quad (3)$$

式中, Q_{T1} 为阀导通损耗, J; N_i 为每个阀的晶闸管数目; U_0 为晶闸管的门槛电压, V; R_0 为晶闸管导通态电阻的平均值, Ω ; I_d 为通过换流桥直流电流有效值, A; μ 为换向角($^\circ$); Q_{T2} 为阻尼损耗, J; U_{v0} 为变压器阀侧空载线电压有效值, V; C_{HF} 为阀阻尼电容有效值加上阀两端间的全部有效杂散电容, F; m 为电磁耦合系数。

(2) 蒸发冷却模块

蒸发冷却模块由加热块和冷却液盒两部分构成。加热块直接贴合在冷却液盒上面, 两者之间为铝板导热, 传热热阻很小, 加热块的发热量主要有散热损失和工质带走热量两部分, 其中散热损失主要包括辐射热损失和对流热损失两部分, 单相对流换热系数采用D-B公式, 两相沸腾换热系数采用文献[5]

提出的关联式, 即

$$Q = Q_s + Q_l \quad (4)$$

$$Q_s = \varepsilon \sigma [A_1 (\frac{T_1}{100})^4 - (\frac{T_2}{100})^4 + A_2 h_1 (T_1 - T_2)] \quad (5)$$

$$Q_l = G_l [A_2 h_2 (T_3 - T_4) + A_2 h_3 (T_5 - T_6)] \quad (6)$$

$$h_s = 0.11 \times \frac{\lambda}{l} (G_r P_r)^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

$$h_2 = 0.023 \times \frac{\lambda}{d} (\frac{\rho v d}{\mu})^{0.8} (\frac{\mu c_p}{\lambda})^{0.4} \quad (8)$$

$$h_b = 0.023 \times \frac{\lambda_1}{d} (\frac{\rho_1 v d}{\mu_1})^{0.8} (\frac{\mu_1 c_p}{\lambda_1})^{0.4} F \quad (9)$$

$$h_c = 0.00122 \times \frac{\rho_1^{0.49} c_p^{0.45} \lambda_1^{0.79}}{\rho_g^{0.24} \mu_{lg}^{0.24} \mu_1^{0.29} \sigma_1^{0.79}} T_w^{0.24} P_w^{0.75} S \quad (10)$$

$$h_3 = h_b + h_c \quad (11)$$

式中, Q_s 为散热损失, J; Q_l 为工质带走热量, J; ε 为表面发射率; σ 为黑体辐射系数, $W/m^2 \cdot K^4$; G_r 为格拉晓夫数; P_r 为普朗特数; h_s 为自然对流换热系数, $W/m^2 \cdot K$; h_3 为单相对流换热系数, $W/m^2 \cdot K$; h_4 为饱和沸腾换热系数, $W/m^2 \cdot K$ 。

(3) 溴化锂制冷机

溴化锂制冷机主要包括蒸发器、吸收器、发生器和冷凝器四个主要的换热设备, 根据能量守恒分别得出四部分的平衡方程, 即

$$Q_h = G_{m,a} (h_7 - h_2) = (G_{m,a} - G_{m,d}) (h_4 - h_8) \quad (12)$$

$$Q_c = G_{m,d} (h_4 - h_3) \quad (13)$$

$$Q_e = G_{m,d} (h_5 - h_1) \quad (14)$$

$$Q_a = G_{m,d} (h_5 - h_8) + G_{m,d} (h_8 - h_2) \quad (15)$$

式中, Q_g 为加热量; Q_c 为冷凝热; Q_e 为蒸发器热负荷; Q_a 为吸收器热负荷。

2 结果分析

根据上述数学模型建立换流阀蒸发冷却余热利用仿真系统, 相关系统计算参数如下表所示, 整个蒸发冷却及余热利用系统综合利用效率为60%, 其中蒸发冷却回路热效率较高。余热利用回路, 也就是溴化锂制冷回路效率较低, 有进步提升空间, 如果将蒸发

冷却回路和余热利用回路循环工质进行统一，整个系统可以进一步集成简化，效率可大幅提高。

表 主要计算参数

Tab. Main calculation parameters

项目	参数	符号单位	数值
蒸发冷却回路	热功率	W/kW	150
	散热损失	Q_s/kW	11
	进口温度	$T_3/^\circ\text{C}$	35
	出口温度	$T_6/^\circ\text{C}$	55
	回路流量	$G_f/(\text{m}^3/\text{h})$	2.3
余热利用回路	回路热效率	$\eta_t(\%)$	93
	制冷量	Q_c/kW	100
	冷水流量	$G_{m,D}/\text{m}^3/\text{h}$	12.92
	冷水进口焓值	$h_1/^\circ\text{C}$	13
	冷水出口焓值	$h_5/^\circ\text{C}$	7
系统综合能力利用效率	溴化锂机效率	$\eta_c(\%)$	0.72
		$\eta_c(\%)$	60

以广州地区为例，该蒸发冷却余热回收利用系统按照年供冷运行1 200 h计算，该系统年供冷量为430 GJ，可减少电量消耗3万kW·h，年减少CO₂排放24 t，减少SO₂排放80 kg，节能减排效果显著，具有进一步推广空间。

该换流阀蒸发冷却余热利用系统的提出，不仅充分利用了换流阀废热，提高了能量利用效率，而且用中间换热器替代凝汽器实现了蒸发冷却回路冷凝的作用。与此同时，蒸发冷却回路和余热利用回路两者耦合运行，系统复杂程度有一定的提高，应该在首先保证换流阀高效冷却的前提下，最大化进行供冷，两个回路之间的优化运行问题有待进一步研究确定。

3 结束语

本文针对换流阀蒸发冷却系统低品位能

源情况进行实验研究，该余热资源温度稳定，能量品位能够较好地与溴化锂制冷机组进行能级匹配，据此提出一种耦合余热利用系统，该系统可以有效利用蒸发冷却余热，具有较好的应用前景，为下一步蒸发冷却系统余热实验平台的建立奠定基础。

参考文献

- [1] 蔡静，曹惠玲. 晶闸管整流电路的蒸发冷却研究[J]. 电力电子技术，2003(6): 86-88.
- [2] 曹瑞，阮琳. 蒸发冷却技术在环网控制装置上应用的可行性研究[J]. 电力电子技术，2018，52(6): 40-42.
- [3] 熊斌. 高功率密度蒸发冷却ECR离子源磁体内热问题的研究[D]. 北京：中国科学院研究生院，2015.
- [4] DITTUS F W, BOELTER L M K. Heater transfer in automobile radiators of the tubular type[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 1985, 12(1): 3-22.
- [5] CHEN J C. Correlation for boiling heat transfer to saturated Fluids in convective flow: BNL-6672[R]. Upton, N.Y.: Brookhaven National laboratory, 1962.

作者简介



许永生

许永生（1977—），博士，高级工程师，从事直流设备新技术应用方面的研究。

（收稿日期：2019-07-16）EA