

直流4 000 A级风冷型静止变频启动系统研制 及其工程应用研究

张寅^{1,2}, 武强^{1,2}, 张瑞琦^{1,2}, 袁亚洲^{1,2}, 杨合民^{1,2}

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106;

2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106)

摘要: 针对国内早期引进的抽水蓄能电站静止变频启动系统(SFC)存在的技术瓶颈开展研究, 对于设计电压低、工作电流大, 且水冷散热要求更新为风冷散热的应用需求, 提出基于风冷散热技术的大容量SFC改造方案。对直流4 000 A级风冷型抽水蓄能SFC功率屏柜的设计、研制和试验情况进行了详细的分析, 并依托于华东桐柏抽水蓄能电站SFC系统改造项目, 制定了一键选择启机控制流程并完成了现场投运。现场试验数据表明, 改造后机组启动时间缩短至198 s, 温升控制在 $\Delta T \leq 40$ K内, 较原系统容量提升20%。工程实践表明, 该方案在保留原有变压器的约束条件下, 成功实现SFC设备散热方式转型与性能跃升, 显著提升了设备运行可靠性。

关键词: 抽水蓄能; 静止变频器; 风冷; 大电流

Research on the development and engineering application of DC 4 000 A air-cooled static variable frequency starting system

ZHANG Yin^{1,2}, WU Qiang^{1,2}, ZHANG Ruiqi^{1,2}, YUAN Yazhou^{1,2}, YANG Hemin^{1,2}

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China; 2. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: In this paper, the technical bottleneck of the static frequency conversion starting system (SFC) in pumped storage power plants introduced early in our country is studied, especially the design voltage is low, the working current is large, the water cooling heat dissipation requirements are updated to the application requirements of the air-cooled heat dissipation, and a large capacity SFC reconstruction scheme based on the air-cooled heat dissipation technology is proposed. The design, development and test of DC 4 000 A air-cooled pumped storage SFC power panel are analyzed in detail in this paper. Relying on the SFC system modification project of Tongbai pumped storage power plant in East China, the one key selection startup control flow is established and the on-site commissioning is completed. Field test data showed that the unit startup time was shortened to 198 s after modification, and the temperature rise was controlled within $\Delta T \leq 40$ K, 20% more than the original system capacity. Engineering practice shows that this scheme successfully realizes the transformation of heat dissipation mode and performance leap of SFC equipment under the constraints of retaining the original transformer, and significantly improves the operation reliability of the equipment.

Keywords: pumped-storage; SFC; forced air cooling; large current

南瑞自筹科研项目资助 (项目编号为 524609240159)

0 引言

华东桐柏抽水蓄能电站原静止变频启动系统 (Static Frequency Converter, SFC) 采用法国 ALSTOM 公司设计的水冷型变频装置, 累计运行超 17 年。长期运行数据表明, 系统存在显著的技术缺陷: ① 控制板件老化引发硬件失效及通信协议兼容性问题, 导致年均故障率高达 3.4 次^[1-3]; ② 冷却系统采用闭式水循环结构, 存在管路腐蚀泄漏 (年均补水量达 1.2 m³)、冷却液电导率超标 (>5 μs/cm) 等安全隐患^[4]; ③ 原始设计容量 17 MW (2 × 2.1 kV), 难以满足新型电力系统对抽水蓄能机组快速响应 (<200 s) 的调节需求^[5]。更严峻的是, ALSTOM 公司技术迭代导致的备件供应链断裂, 严重影响系统运维可持续性^[6]。

针对上述工程痛点, 本研究提出基于国产化替代的冗余改造技术路线。首先, 通过多物理场耦合仿真建立直流 4 000 A 级大电流密度工况下的三维湍流散热模型, 创新设计基于“均热板-热管-型材散热器”的强迫风冷功率单元架构, 突破传统水冷系统在绝缘性能与散热效率间的技术瓶颈; 其次, 构建模块化 N+1 冗余配置方案, 实现额定容量提升至 20 MW; 最后, 制定了一键选择启机控制流程并完成了现场投运。工程实践表明, 改造后系统成功实现 4 台机组连续启机并网 (启动时间 198 s), 关键性能指标较原系统呈现显著提升, 即散热能力提升超过 17%, 估算年均运维成本降低 10%, 设备可用率提升至 99.96%。

1 整体设计方案

从经济效益角度出发, 兼顾系统高可靠性、易维护性和强支撑能力需求, 桐柏抽水蓄能 SFC 设备改造项目采用 SFC 本体设备冗余化实施方案: 利用旧输入/输出变压器, 不改变 SFC 本体设备工作电压条件, 新增一套南瑞 SFC 本体设备, 同时增设 SFC 本体设备网桥侧和机桥侧隔离开关。

阿尔斯通 SFC 选用 ABB 5STP 34N5200 晶闸

管作为功率回路开关器件, 在考虑合适的安全裕度时^[7-8], 实际单管对应交流电压支撑能力约为 1 700 V。为实现额定电压 2 × 2.1 kV 的应用需求, 网桥侧采用每臂“2+1”只晶闸管器件串联升压, 机桥侧采用每臂“3+1”只晶闸管器件升压。

南瑞 SFC 选用 ABB 5STP 48Y7200 晶闸管作为功率回路开关器件, 实际单管对应交流电压支撑能力约为 2 300 V, 即网桥侧采用单管配置实现额定电压 2 × 2.1 kV 的应用需求, 机桥侧采用每臂“2+1”只晶闸管器件配置。

5STP 48Y7200 电流参数为 5 040 A, 5STP 34N5200 电流参数为 3 600 A, 相较于阿尔斯通 SFC, 南瑞 SFC 具有更高的电流承载能力, 并提供了研制直流 4 000 A 级风冷型 SFC 产品的条件。

华东桐柏抽水蓄能电站双套 SFC 系统冗余化改造实施方案如图 1 所示。图 1 中, SW1 和 SW2 为安装于 SFC 输入变压器低压侧的选择隔离开关; SW3 和 SW4 为安装于 SFC 输出变压器侧的选择隔离开关, 其中 SW3 为低压选择开关, SW4 为高压选择开关。SW1~SW4 均为“一进两出”的三工位刀开关, 进线侧接入公共端, 出线侧分“1”和“2”位置, “1”为阿尔斯通侧, “2”为南瑞侧, 其额定电压设计分别为 3.6 kV、3.6 kV、7.2 kV 和 24 kV, 额定电流设计均为 4 000 A, 匹配一次回路实际电压、电流需求。

2 直流 4 000 A 级风冷型 SFC 功率屏柜研制

2.1 SFC 功率屏柜晶闸管器件发热量计算

单只晶闸管器件在额定工作条件下的损耗为^[9]

$$P_{\text{loss}} = P_{\text{T}} + W_{\text{on}}f + W_{\text{off}}f \quad (1)$$

$$P_{\text{T}} = \frac{I_{\text{T}}V_{\text{T}} + I_{\text{T}}^2r_{\text{T}}}{3} \quad (2)$$

式中, P_{T} 为晶闸管器件通态损耗; W_{on} 为器件开通损耗; W_{off} 为器件关断损耗; f 为器件开关频率; I_{T} 为晶闸管实际工作电流; V_{T} 为通态电压降; r_{T} 为斜率电阻。

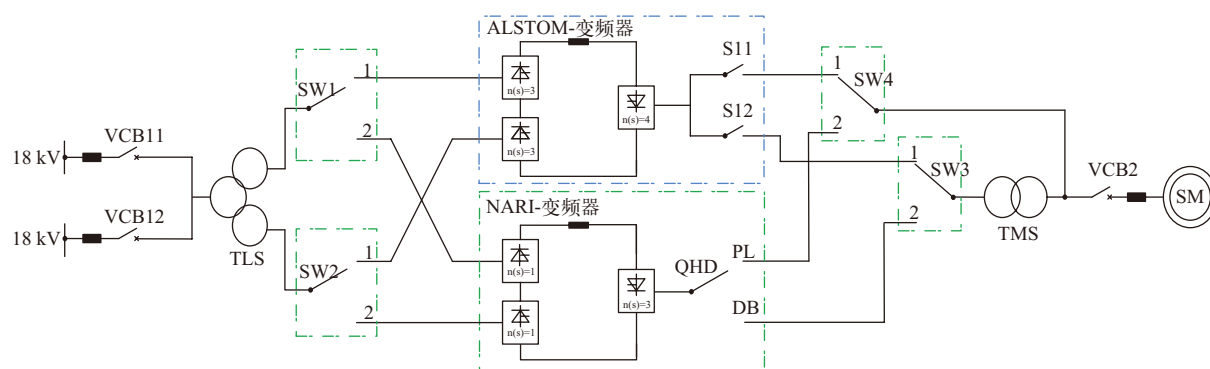


图1 双套SFC系统冗余化改造实施方案

Fig. 1 Implementation plan for redundancy transformation of dual SFC systems

考虑SFC电流源工作特性^[10-13],按 $f=50\text{ Hz}$ 核算,查阅5STP 48Y7200器件手册,在电流为4 500 A时,单只晶闸管器件发热功率约为3.8 kW。

SFC功率屏柜采用“6只晶闸管器件+7只散热器”双面压接的组串结构,单柜总发热功率小于24 kW。

2.2 SFC功率屏柜散热设计

南瑞SFC功率屏柜组串压接式阀组结构模型如图2所示,采用绝缘隔板将柜体分隔成进风舱(后舱)和出风舱(前舱)两个舱室,构建了零泄漏并联风道散热结构。运行状态下,功率屏柜顶置风机开启,冷却风从后舱经散热器过风孔流入前舱,将晶闸管器件载流产生的热量高效送出。

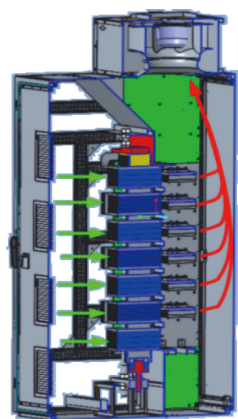


图2 SFC功率屏柜组串压接式阀组结构模型

Fig. 2 Structural model of SFC power panel cabinet series pressure connected valve group

新型晶闸管单元低热阻散热器结构如图3所示,采用“均热板+热管+铝型材”设计。此种结

构极大地降低了散热器的热阻,快速地实现了晶闸管结与散热器之间的热量交换。在4 500 A电流风冷运行条件下,缩小了晶闸管结与散热器之间的温差。



图3 晶闸管单元“均热板+热管+铝型材”低热阻散热器结构

Fig. 3 Low thermal resistance radiator structure of thyristor unit consisting of "heat sharing plate+heat pipe+aluminum profile"

2.3 SFC功率屏柜温度场及流速场仿真

经查阅手册可知,5STP 48Y7200器件的结壳热阻为3 K/kW,新型散热器的热阻实测为10 K/kW,故有

$$T_j = T_c + P_{\text{loss}} Z_{j-s} \quad (3)$$

式中, T_j 为晶闸管器件设计结温; T_c 为环境温度,按40℃考虑; Z_{j-s} 为晶闸管壳至散热器的热阻; P_{loss} 为晶闸管器件损耗。

在风机有效换热条件下,按式(3)计算可知,器件设计结温为89.4℃(5STP 48Y7200手册中,最大运行结温为110℃)。

基于以上设计,对SFC功率屏柜进行流速场和温度场仿真设计,仿真结果分别如图4和图5所示。

图4中,SFC功率屏柜最上面的散热器出风口流速为6.04 m/s,最下面的散热器出风口流速为2.09 m/s。

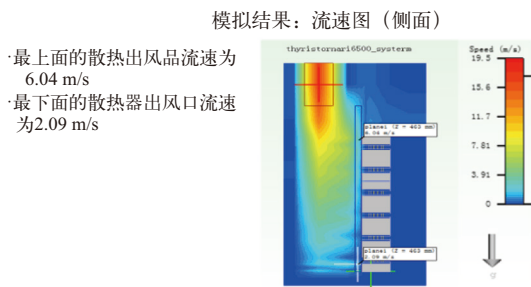


图 4 SFC 功率屏柜流速场仿真
Fig. 4 Simulation of flow field in SFC power cabinet

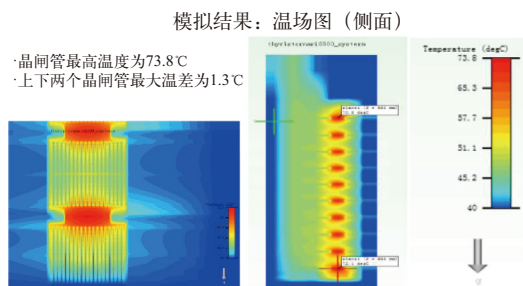


图 5 SFC 功率屏柜温度场仿真
Fig. 5 Simulation of temperature field in SFC power cabinet

图5中，组串压接式SFC功率屏柜结构保障了所有晶闸管器件在实际工作时冷却条件一致，且工作环境也一致。晶闸管最高温度为73.8℃，上下两个晶闸管最大温差为1.3℃。

2.4 SFC功率屏柜低压大电流温升试验

直流4 000 A级风冷型功率屏柜实物研制如图6所示。为对SFC功率屏柜实际温升情况进行验证，在环境温度为20℃时，进行低压大电流温升试验，试验数据见下表。



图 6 直流 4 000 A 级风冷型 SFC 功率屏柜
Fig. 6 DC 4 000 A air-cooled SFC power cabinet

表 SFC 功率屏柜低压大电流试验温升数据
Tab. SFC power cabinet low voltage high current test temperature rise data

时间 /min	电流 /A	散热器温度 /℃						
		SRQ1 (#1 测点)	SRQ2 (#2 测点)	SRQ3 (#3 测点)	SRQ4 (#4 测点)	SRQ5 (#5 测点)	SRQ6 (#6 测点)	SRQ7 (#7 测点)
5	1 000	20	20	20	20	20	20	20
10	1 500	25.2	25.8	24.4	25.3	24.5	24.5	25.2
15	2 200	29	29.2	27.9	29	28.1	28.1	29
20	2 800	39.1	38.1	36.8	38.8	37.3	37.3	39.1
25	3 500	44.5	42.8	42	44.2	43.2	43.2	44.5
30		45.5	44.7	44	45.7	44.8	44.8	45.5
35		47.4	46.6	45.4	47.5	46.5	46.5	47.4
40		49	48	47.1	49.1	48.1	48.1	49
45		50.7	49.6	48.6	50.7	49.7	49.7	50.7
50		51.8	51	50	52.1	50.8	50.8	51.8
55	4 500	53.1	52.4	51.4	53.2	52.2	52.2	53.1
60		54.5	53.6	52.6	54.4	53.6	53.6	54.7
70		55.6	54.8	53.6	55.5	54.5	54.2	55.6
80		56.7	55.9	54.9	57	55.8	54.8	55.9
100		58.2	57.2	55.6	57.9	55.9	55.8	56.4
120		59.7	57.8	56	58.3	56	56.2	56.5

注：#1测点、#2测点~#7测点实际测点位置如图6所示，测温探头贴近晶闸管安装位置。

SFC功率屏柜在直流4 500 A下晶闸管器件与散热器接触位置各测点稳态温度如图7所示。试验表明，当风冷条件下达到热平衡时，散热器（SRQ1~SRQ7）贴近晶闸管器件处，温度最高不超过60℃，温升仅40 K。按式（3）计算，晶闸管结温实际不超过76℃，满足项目应用需求。

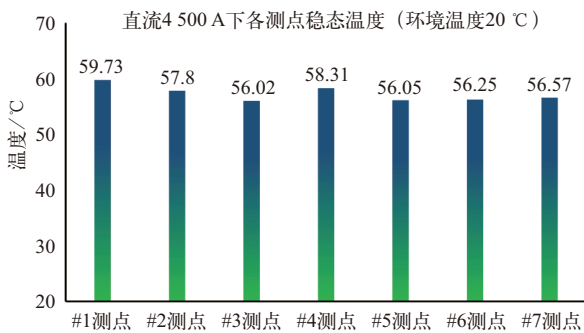


图 7 直流 4 500 A 下晶闸管元件与散热器接触位置稳态温度
Fig. 7 Steady state temperature at the contact position between thyristor components and heat sink under DC 4 500 A

3 一键选择启机控制流程及现场试验情况

3.1 一键选择启机控制流程

一次回路双工位隔离开关SW1~SW4配置为SFC本体设备实现双套冗余提供了条件。为最大程度地降低与集散式控制系统(Distributed Control System, DCS)交互接口变动的数量,简化控制逻辑,增设一面二次信号切换柜,实现两套SFC设备对外交互信号的扩展。

图8为监控系统一键选择启机流程图,主要程序控制逻辑如下。

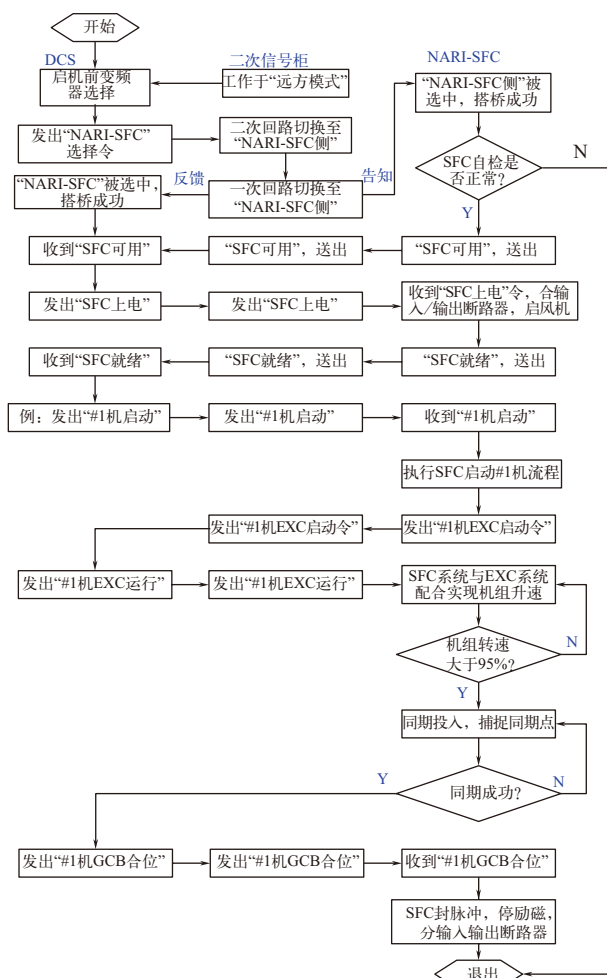


图8 一键选择启机控制流程

Fig. 8 One click selection startup control process

1) 二次信号切换柜工作于“远方模式”,状态送出给DCS。

2) DCS发出“NARI-SFC”选择令,由二次信号切换柜实现二次信号接口一键切换至NARI-

SFC侧,SW1、SW2、SW3、SW4开关同时一键切换至NARI-SFC侧。二次信号切换柜内部完成自检,送出“NARI-SFC被选中”信号给DCS。

3) NARI-SFC自检正常,送出“SFC可用”信号给DCS。

4) DCS发出“SFC上电”令,由NARI-SFC完成合输入/输出侧断路器,执行启风机等操作,送出“SFC就绪”信号给DCS。

5) 以启动#1机组为例,DCS发出“#1机启动”令,NARI-SFC执行#1机启动流程,发出“#1机EXC启动”令。

6) NARI-SFC收到“#1机EXC运行”令,SFC系统与EXC系统配合实现机组升速。

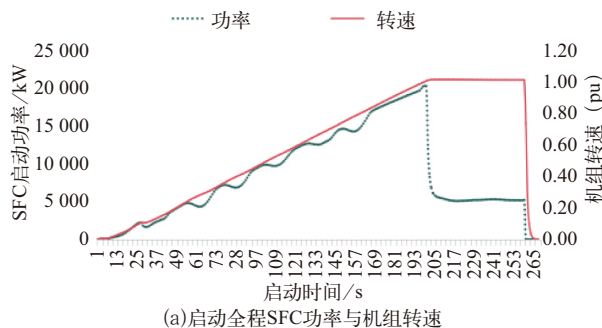
7) 机组升速至同期并网,SFC启机完成,封脉冲,SFC退出。

3.2 现场试验情况

南瑞SFC容量为20 MW,相较于阿尔斯通,其容量设计提升20%。图9为南瑞SFC系统在现场启机试验全程波形。图9a给出了启动全程SFC功率与机组转速随启动时间的关系,南瑞直流4 000 A风冷型SFC系统将机组从静止状态升速至额定转速的时间为198 s,相较于改造前节省了接近100 s(改造前启动时间为300 s)。图9b给出了启动全程SFC电流与机端电压随启动时间的关系,启动全程采用恒磁调压控制,定子电压随启动时间线性上升,SFC输出电流在4 200 A附近快速调节。

4 结束语

本研究通过工程实践表明,国电南瑞研制的直流4 000 A级风冷型静止变频启动系统(SFC)在华东桐柏抽水蓄能电站改造工程中取得突破性应用。



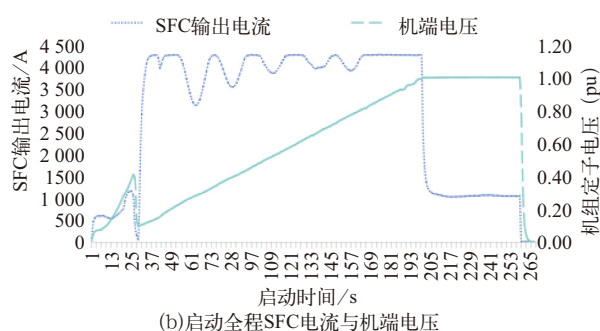


图9 启动全程 SFC 波形

Fig. 9 SFC waveform throughout the entire startup process

本研究的创新价值体现在：①建立大电流风冷SFC的热-流-固多物理场协同设计方法，突破传统水冷系统在散热效率与绝缘可靠性间的技术悖论；②构建“机电-控制-运维”多维协同的快速响应能力优化框架，提升电站调频响应能力。

工程实践表明，该改造方案在保留原有变压器约束条件下，成功实现进口设备国产化替代与技术跨越，其技术路径为抽水蓄能电站机电系统迭代提供了可复用的工程范式。研究成果不仅验证了国产大功率电力电子装备的技术竞争力，更为高比例新能源电网中灵活调节资源的提质增效提供了理论方法支撑与工程实践基准。

参考文献

- [1] 徐喆. 桐柏抽蓄机组开关闭锁分闸处理方法分析[J]. 水电站机电技术, 2015, 38(11): 21-22, 42.
- [2] 陈勤, 章亮, 赵锋, 等. SFC输入开关频繁误跳的原因分析及处理[J]. 浙江水利水电专科学校学报, 2011, 23(3): 65-68.
- [3] 李广亮, 王昆. 机组抽水调相时同期合闸失败的原因分析及处理[J]. 水电站机电技术, 2015, 38(11): 48-50.

- [4] 漫自强, 刘欢, 刘腾. 风冷型及水冷型静止变频器设备对比研究[J]. 电气技术, 2022, 23(7): 69-73.
- [5] 刘许. 抽水蓄能电站水冷式静止变频器故障分析及处理[J]. 福建水力发电, 2023(2): 63-64, 72.
- [6] 武波. 丰宁抽水蓄能电站SFC冷却系统故障分析及设计建议[J]. 水电站机电技术, 2024, 47(5): 65-67, 72, 148.
- [7] 郭炎彬. 大功率晶闸管均流均压试验台关键技术研究及实现[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
- [8] 高经伦. 基于晶闸管的四象限电流源型变频器[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [9] 戴薇, 邓雪军, 齐怀轩. 大功率晶闸管变流装置的设计方法[J]. 电气传动, 2008(5): 25-27.
- [10] 邵燕秋, 邵宜祥, 王小红, 等. 静止变频起动器低频阶段起动控制方法的研究[J]. 电气技术, 2016(7): 75-78, 92.
- [11] 天津电气传动设计研究所. 电气传动自动化技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [12] 杨合民, 简优宗, 周洪涛, 等. 静止变频器启动控制策略与限制曲线[J]. 电气传动, 2019, 49(8): 3-6.
- [13] Bimal K Bose. 现代电力电子学与交流传动[M]. 王聪同, 赵金, 于庆广, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2005.

作者简介

张寅(1986—), 男, 硕士, 主要从事发电机励磁技术和大型同步电机静止变频技术的研究。

(收稿日期: 2025-03-24)