

引用格式: 袁照威, 李峻, 张春琳, 等. 300 MW 级压缩空气储能电站 DCS 一体化技术 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(6): 33-42. YUAN Zhaowei, LI Jun, ZHANG Chunlin, et al. DCS integration technology for 300 MW compressed air energy storage power station [J]. Southern energy construction, 2025, 12(6): 33-42. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-335.

300 MW 级压缩空气储能电站 DCS 一体化技术

袁照威[✉], 李峻, 张春琳, 徐志强

(中能建数字科技集团有限公司, 北京 100022)

摘要: [目的]压缩机 and 空气透平是压缩空气储能电站两大关键设备, 其控制通常由设备自带控制系统实现, 控制较为分散, 调节过程复杂。随着分布式控制系统 (Distributed Control System, DCS) 一体化技术的提出, 开展压缩空气储能电站 DCS 一体化技术具有重要意义。[方法]文章从 DCS 系统、压缩机控制系统、空气透平控制系统分析了压缩空气储能电站当前研究情况, 提出了 3 种 DCS 一体化思路, 分析了压缩空气储能电站实现 DCS 一体化的可行性及 DCS 一体化的优势, 并探究了 DCS 一体化配置方案。[结果]通过压缩空气储能电站分析, 电站实现一体化的难点在于压缩机和空气透平控制系统, 分析结果表明, 两大设备实现 DCS 一体化在技术上是完全可行的。[结论]通过介绍压缩空气储能电站全厂 DCS 一体化设计分析, 为后续压缩空气储能电站 DCS 一体化方案设计提供了思路 and 方向, 对压缩空气储能电站实现集中控制提供了方法。

关键词: 压缩空气储能; 分布式控制系统; 一体化; 压缩机控制系统; 数字电液控制系统

DOI: 10.16516/j.ceec.2024-335

文章编号: 2095-8676(2025)06-0033-10

CSTR: 32391.14.j.ceec.2024-335

中图分类号: TK02; TH41



论文二维码

DCS Integration Technology for 300 MW Compressed Air Energy Storage Power Station

YUAN Zhaowei[✉], LI Jun, ZHANG Chunlin, XU Zhiqiang

(China Energy Digital Technology Group Co., Ltd., Beijing 100022, China)

Abstract: [Objective] Compressors and turbines are two key equipment in compressed air energy storage power stations, and their control is usually achieved by the equipment's built-in control system, resulting in scattered control and a complex regulation process. With the proposal of DCS (Distributed Control System) integration technology, it is significant to carry out DCS integration technology for compressed air energy storage power stations. [Method] Firstly, the current research status of compressed air energy storage power stations was analyzed from the perspectives of DCS, compressor control systems, and air turbine control systems. Then, three DCS integration approaches were proposed, and the feasibility and advantages of implementing DCS integration in such power stations were analyzed. Finally, the DCS integrated configuration scheme was explored. [Result] Through the analysis of compressed air energy storage power stations, the difficulty in achieving integration lies in the control systems of compressors and air turbines. The results show that the integration of DCS for the two major equipment is technically feasible. [Conclusion] This paper introduces the integrated DCS design analysis for the entire compressed air energy storage power plant, providing ideas and directions for subsequent design of DCS integration solutions for such power stations, as well as a method for achieving their centralized control.

Key words: compressed air energy storage; distributed control system; integration technology; compressor control system; digital electro-hydraulic control system

收稿日期: 2024-10-08 修回日期: 2024-11-07 网络首发日期: 2025-08-07

基金项目: 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项 (2024ZD1004108); 中国能源建设股份有限公司科技项目“300 MW 级压缩空气储能电站关键技术和装备研究” (CEEC2021-KJZX-04)

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

随着风电、光伏等新能源装机及电量占比不断提高,高比例可再生能源和电力电子设备的接入,使得电力系统呈现出“双高”特征:高比例可再生能源的接入导致发电不平衡的问题;高比例电力电子设备的接入使得传统的同步电网结构出现低惯量、低阻尼和电压支撑能力减弱等问题,削弱了电力系统对扰动的应变能力^[1-3]。

新型电力系统“双高”特性对长周期、高安全性以及具备物理转动惯量的新型储能需求愈发迫切。压缩空气储能具备快速启停、功率爬坡、有功无功宽幅调节等特性,将成为增量灵活调节电源,也可以作为“风光绿电外送”的调节性电源,助力三北地区清洁低碳电力外送至中东部。同时,压缩空气储能电站配置空气透平+同步发电机组,是未来重要的转动惯量来源^[4-5]。因此,压缩空气储能电站作为一种长时物理储能方式,通过对系统结构改造能够比较适合用于旋转备用、无功支撑场景,对于解决“双高”问题,具有显著的优势^[6-8]。

当前,大规模压缩空气储能技术研究主要集中在系统设计^[9-10]、系统建模^[11-12]、运行特性^[13-14]、地下储气库^[15-16]、应用场景^[17-18]等方面,而由于大规模压缩空气储能电站投运案例较少,对于电站控制方面的研究较少,而电网对压缩空气储能电站要求具有高灵活性、快速频率响应、可双向调节等控制特性,对其控制系统要求非常高。分布式(Distributed Control System, DCS)以其强大的高可靠性、丰富的接口和通信网络等技术优势,在工业控制领域具有广泛的应用,为压缩空气储能电站的安全可靠运行提供系统保障^[19-20]。

近年来,随着 DCS 系统一体化概念的提出,大型火电厂的主辅机系统都基本上实现 DCS 一体化控制,新建电站的热工自动化建设采用 DCS 一体化控制方案已成为一种共识^[21-22]。通过 DCS 一体化技术研究,实现电站集中控制,优化资源管理,提升电站管理水平,对压缩空气储能电站的发展具有重要意义。

1 电站控制系统现状

压缩空气储能电站主要包括压缩机组系统、空气透平机组系统、储换热系统以及辅助系统等^[4]。目前,压缩机和空气透平的控制通常由设备自带控制系统实现,而其他系统通常由 DCS 系统控制。压缩机和空气透平是压缩空气储能电站两大关键设备,其控制方式直接影响电站的控制效果。

1.1 DCS 系统应用现状

DCS 系统是以微处理器为基础的集中分散型控制系统,综合了计算机、通讯、显示和控制等 4C 技术,由过程控制级和过程监控级组成。DCS 系统在电力行业的热工自动化领域应用非常广泛,其中常用的 DCS 系统基本采用双冗余的控制架构^[19-20]。

当前,DCS 系统主要有进口 DCS 和国产 DCS 两大类^[23-24]。进口 DCS 控制系统主要有艾默生的 Ovation、FOXBORO 的 I/A Series、西门子的 SPPA-T3000、霍尼韦尔的 TDC3000 以及 ABB 的 SymphonyPlus 等。国产的 DCS 集散控制系统是在 20 世纪 80 年代末开始技术引进、自主研发并逐渐普及,但国产 DCS 系统核心元器件仍使用进口品牌,国产化率较低。2019 年后,国内高校、企业、科研院所通过艰苦攻关,逐步完成了元器件的国产化替代,控制系统软件向 Linux 平台的迁移,实现了软件的全部自主可控,国内多数电厂也开始实现全国产化 DCS 的更新。目前国产品牌的 DCS 系统主要有和利时的 HOLLiAS MACS-K 系列,南京科远的 NT6000 系统,浙大中控的 ECS700P 系列、上海新华的 XDC800 系统、国电智深的 EDPF-NT 系统等。

在当前全国产、自主可控趋势的推动下,压缩空气储能电站的 DCS 系统采用国产品牌,甚至是纯国产、完全自主可控品牌,将是必然的趋势^[24]。

1.2 压缩机控制系统应用现状

压缩空气储能电站中压缩机的控制主要由压缩机厂家自带的压缩机控制系统(Compressor Control System, CCS)实现,CCS 是以发电机组控制技术和多重化系统软硬件平台为基础,内置相应的压缩机控制算法,完成压缩机组及其辅机设备的全部自动化控制^[25]。

CCS 通常是工控厂家基于压缩机组控制需求定制开发的专用控制系统。以往大型压缩机多应用于石化和冶金行业，由于压缩机使用场景不同，对压缩机组控制系统的软硬件可靠性要求也不同^[25-27]。

目前成熟的压缩机控制系统软硬件平台有进口三重化系统、国产三重化系统、进口双冗余系统、国产双冗余系统和进口非冗余系统。由于 CCS 系统冗余程度越高，系统可靠性越高，所以大容量压缩机组控制基本上不考虑非冗余系统方案。当前开发的压缩机组控制系统主要针对石化和冶金领域，其采用的规范也都是该领域的规范。在石化和冶金领域，大型压缩机组采用的控制系统都需满足 SIL 等级认证。而压缩空气储能电站中压缩机系统不存在危险化学品介质，因此可以暂不强制要求满足 SIL 等级认证，待以后压缩空气储能领域相关的规程规范编制完善后，再参照相关规程规范指导压缩空气储能电站控制系统的建设。

压缩空气储能电站压缩机组控制系统除具有过程控制（连续控制和离散控制）、操作、显示记录、报警、制表打印、信息管理、系统组态以及自诊断等基本功能外，还应包括一键启/停、自动加载、防喘振控制、性能控制、解耦控制、串联负荷分配控制、机组保护、辅助控制、机械状态监视等控制功能。

1.3 空气透平控制系统应用现状

压缩空气储能电站的空气透平与常规火力发电厂的汽轮机类似，其控制主要由厂家自带的数字式

电液调控制系统（Digital Electro-Hydraulic Control System, DEH）实现。

DEH 主要由以计算机为基础的数字控制系统、危急遮断系统和液压控制系统等组成。系统包括转速和负荷控制、超速保护、负荷限制、阀门控制和管理、热应力计算，气门快关及协调控制等^[28-30]。DEH 控制系统可以满足空气透平机械安全运行和启停的所有要求。其主要分为两大类即专用型控制系统和通用型控制系统：

1) 专用型 DEH 系统：该种类型系统对于运行人员与热控人员封闭，专用化程度高，运行人员和维护人员对系统了解较差，理解 DEH 控制系统逻辑比较困难。

2) 通用型 DEH 系统：该种类型系统采用 DCS 实现空气透平控制，运行人员与热控人员对系统较为熟悉，易于理解，控制软件采用与 DCS 系统组态方式，通信方式采用以太网通信。目前，大型空气透平的控制系统主要采用的是通用型 DEH。

通过对 DCS 系统、压缩机控制系统、空气透平控制系统研究现状分析，得到表 1 所示的 DCS 国内外技术现状对比表。

通过分析，国内外 DCS 系统在软硬件配置、系统性能等关键技术参数上存在一定的差异，国内 DCS 系统在近年来取得了显著进步，但在某些方面仍与国际先进水平存在一定差距。随着工业 4.0、物联网（IoT）以及人工智能（AI）的发展，智能

表 1 电站不同控制系统国内外技术现状对比表
Tab. 1 Comparison of the current technical status of different control systems for power stations at home and abroad

控制系统类型	国外	国内
系统架构	模块化设计水平和兼容性较高；核心架构基于自主芯片、操作系统和通信协议。	模块化设计水平和兼容性略低；核心部件依赖外部，逐步实现自主化。
网络通信	多采用自主封闭的通信协议（如Profinet等）；稳定性和抗干扰性强。	多采用开源协议（如EtherNet/IP）；在实时性和数据传输稳定性方面较差。
硬件配置	常采用双冗余配置；硬件多自主研发。	单CPU设计较为常见，但也在逐步向多核、多线程方向发展；国产DCS系统CPU等核心芯片依旧需要进口。
软件功能	在编程语言上，支持多种编程语言、提供丰富的函数库和算法库等；在控制上，常采用人工智能、自适应控制等先进控制算法；在控制系统上，常基于Windows系统开发。	在编程语言上，多采用基于IEC 61131-3标准的编程语言，如结构化文本（ST）、功能块图（FBD）等；在控制上，常采用传统的PID控制，且在特定行业，需要定制开发；在控制系统上，向Linux平台迁移。
系统性能	响应精度上，响应速度通常<0.5 s，控制精度在±1%，较高的实时性、较高的系统吞吐量和响应速度。	响应速度通常<1 s，控制精度在±0.5%。
代表厂商	艾默生、西门子、霍尼韦尔、ABB等	浙大中控、南京科远、和利时等

注：由于不同系统因产品型号或制造商不同，技术参数略有不同。

化已成为 DCS 系统的未来方向。在当前全国产、自主可控浪潮推动下,国内 DCS 厂商需要不断加强技术研发和创新,特别是在先进控制算法(如自适应控制、模型预测控制等)、人工智能和大数据分析等前沿技术领域。尤其在压缩空气技术领域,国内正领先全球 300 MW 级压缩空气储能电站的建设工作,国内厂商应当更加重视国际认证和标准化的工作,确保研发的 DCS 系统、压缩机控制系统及空气透平控制系统能够符合 IEC、ISO、NEMA、UL 等国际标准,满足不同国家和地区的法规要求,提升其全球竞争力。

2 电站 DCS 一体化可行性分析

2.1 DCS 一体化思路分析

所谓 DCS 一体化是指全厂采用一套 DCS 系统将多个独立但相互关联的控制系统整合为一个整体,以简化系统,实现对全厂主辅运行设备的集中监视和分散控制^[31-32]。目前 DCS 一体化方式主要有以下 3 种:

1) 控制室一体化方式

示意图如图 1 所示,压缩空气储能电站 CCS 系统、DEH 系统、DCS 系统分别设有独立的控制系统,其上位机系统统一布置在集中控制室内,在集中控制室实现对全厂主辅系统的监视和控制。

在该种方式下,以 DCS 控制系统网络为中心,实现整个电站的集中控制。DCS 网络交换机采用冗余配置,保证在任何一路网络连接发生故障的情况下转向备用网络。根据压缩空气储能电站的控制要求,设置 1 个集中控制点和若干辅助车间控制点,集中控制点设置在集中控制室,设有操作员站对全厂工艺系统的集中监视和控制,工程师站对系统组态进行维护管理,辅助车间控制点配有操作员站及工程师站,用于现场调试。DCS 控制器全部采用冗余配置,并按照工艺设备设置独立控制器。

压缩机组的控制通过压缩机厂家提供的压缩机控制系统实现,完成所有压缩机组及辅机设备的自动化控制,通常设置一套三重冗余的控制系统,采用一控多方式。在集控室内,设有压缩机操作员站和工程师站,实现对压缩机组的过程控制。压缩机控制系统品牌可与 DCS 品牌不一致。

空气透平控制系统通过透平厂家提供的数字电液控制系统实现,用于完成空气透平本体的自动化控制、监视及保护。在集控室内,设有操作员站和工程师站,用于操作人员监控、控制空气透平。空气透平控制系统品牌可与 DCS 品牌不一致。

该种方式仅仅是控制系统在物理空间位置上实现一体化,是控制系统一体化最初级的整合模式,实际各个控制系统仍互不关联,全厂的自动化水平

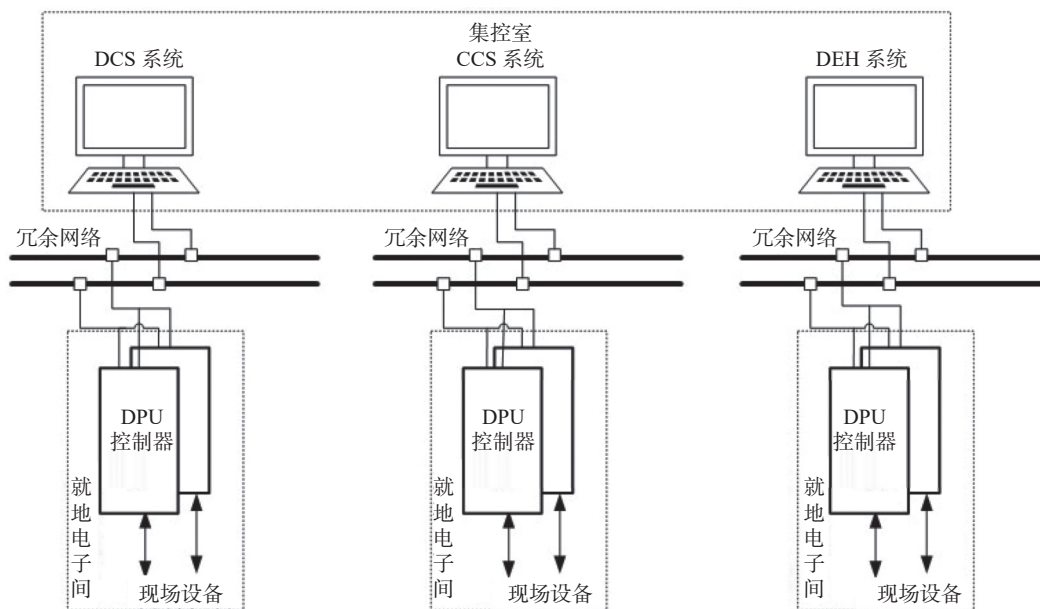


图 1 DCS 一体化：控制室一体化方式示意图

Fig. 1 DCS integration: schematic diagram of control room integration mode

很低。在以往计算机网络技术尚不成熟时期,或者不同系统通信比较困难时,采用此种模式。

2) 监控网络一体化方式

监控网络一体化方式是在控制室一体化基础上,进一步将压缩空气储能电站的各主、辅控制系统

(CCS、DEH, 以及 DCS 等) 的监控网络进行一体化, 通过将 CCS、DEH 等设备的控制系统数据以通信方式接入 DCS, 从而在 DCS 系统上实现对整个压缩空气储能电站的各主、辅控制系统的集中监视和控制。示意图如图 2 所示。

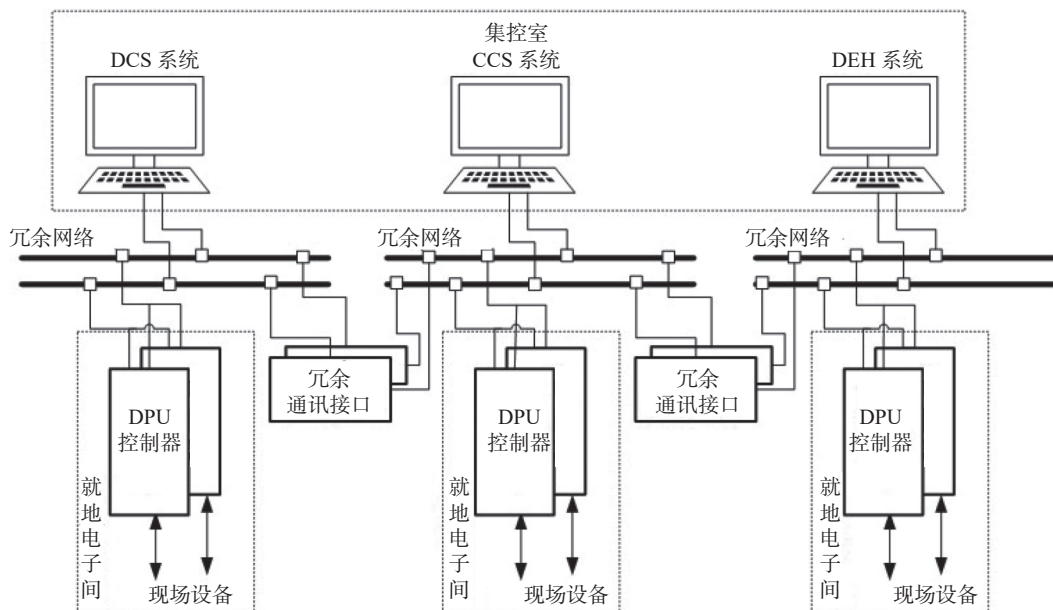


图 2 DCS 一体化：监控网络一体化方式示意图

Fig. 2 DCS integration: schematic diagram of monitoring network integration mode

相比第一种方式, DCS 控制系统、压缩机控制系统和空气透平控制系统在软硬件配置、网络配置等方面要求相同。在第一种方式基础上, 该方式各系统网络之间设有冗余通信接口, 实现各系统之间的互联互通。压缩机组控制系统和空气透平控制系统都是通过冗余的通信接口与 DCS 系统进行双向数据通信, 重要信号采用硬件线方式直接接至 DCS 系统, 可在 DCS 系统中实现压缩机侧系统、空气透平侧系统的控制。

该种方式在控制室一体化方式的基础上, 实现了监控网络层面上各独立控制系统的交互, 该方式比控制室整合更进一步, 自动化水平也有显著提升, 在控制室 DCS 系统中即可实现对全厂主辅控制系统的集中监控。该种方式各控制系统并没有实现全面互通互联, 同时由于采取网络通信, 受限于网络设备限制, 存在一定的网络延迟。

3) 软硬件系统一体化方式

软硬件系统一体化方式是将全厂主、辅机所有

系统的控制统一纳入到同一套控制系统平台内, 全厂主、辅控制系统采用相同的软硬件、集中在同一网络中, 实现对整个压缩空气储能电站的各主、辅控制系统的集中监控。示意图如图 3 所示。

该种方式下, DCS 控制系统、压缩机控制系统、空气透平控制系统在软硬件配置、网络配置等方面, 与前两种方式是一致的。除此之外, 该种方式下的 3 种控制系统的软硬件也是相同的, 并且在同一个网络下。在集控室设置多个操作员站和工程师站, 用于对压缩机侧系统、膨胀机侧系统、其他辅机系统的控制。

在软件层面上, 该种方式所有系统均采用相同的操作系统、组态等软件, 在硬件层面上, 所有系统均采用相同型号的控制器的 I/O 模块等设备, 控制系统简单, 通信方式可靠, 全厂控制系统的自动化水平进一步提升。目前, 国内火电厂的控制系统均采用该种模式。

通过上述 3 种方式分析, 得到了表 2 所示的 3

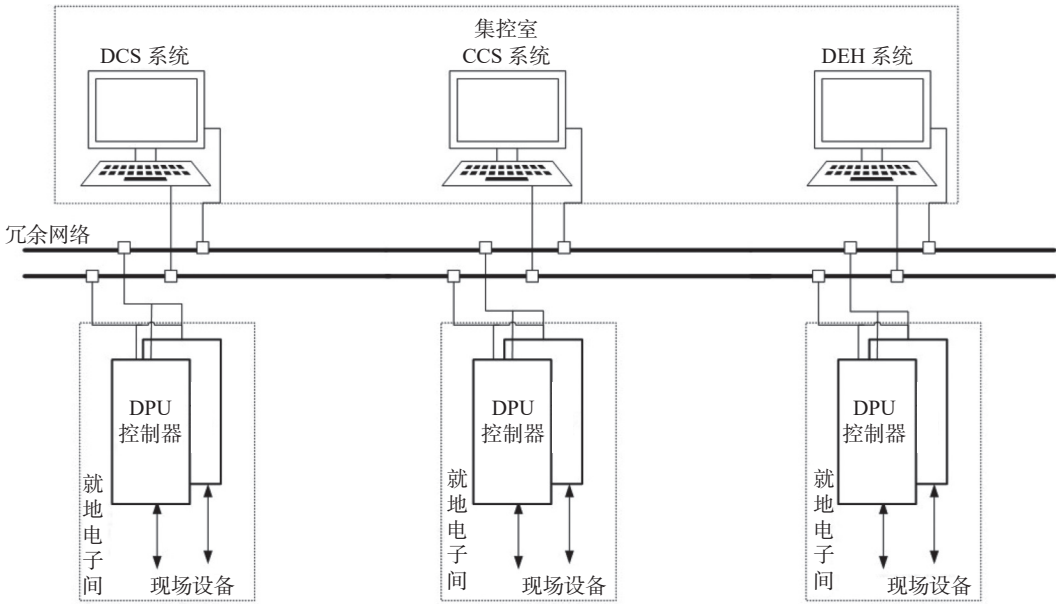


图 3 DCS 一体化：软硬件系统一体化方式示意图

Fig. 3 DCS integration: schematic diagram of software and hardware system integration mode

种 DCS 一体化思路对比分析表，通过表分析 3 种不同方式的技术难点。

综上，第三种一体化方式最为彻底，也是压缩空气储能电站 DCS 一体化最终目标和趋势。

2.2 电站 DCS 一体化可行性分析

通过压缩空气储能电站控制系统研究现状分析，压缩机和空气透平作为电站两大关键设备，其控制通常都是由专用的控制系统实现^[25, 28]。所以，压缩空气储能电站实现 DCS 一体化控制的难点在于压缩机与空气透平的控制是否能采用与 DCS 一致的软硬件实现。

1) 压缩机控制系统一体化分析

压缩空气储能电站属于大型压缩机应用的全新

场景，以往主要应用于冶金、石化等领域。目前世界主流压缩机控制大部分使用独立的 PLC 系统，但在火电领域，主控系统通常采用 DCS，PLC 通常用于小型控制设备。随着自动化领域 PLC 和 DCS 实际上已经越来越向彼此靠拢，PLC 和 DCS 之间的区分越来越模糊。因此，大型压缩机控制系统采用 DCS 同样可以实现。但压缩机专用的压缩机防喘振、性能控制及多台压缩机联合运行的负荷分配算法等控制模块需要在 DCS 中定制开发。同时，由于压缩机 CCS 专用控制系统对控制器的性能要求比常规 DCS 处理器要高。因此，压缩机控制系统在 DCS 上实现是可行的，但需要在 DCS 系统中开发高性能处理器且需要定制化压缩机算法模块。

表 2 3 种 DCS 一体化思路对比分析表

Tab. 2 Comparison and analysis of three DCS integration ideas

方式	优点	缺点
控制室一体化	控制系统独立、控制方式简单；三个系统单独设计、单独采购；不需要多考虑不同控制系统DCS品牌。	控制水平低；增加运行人员数量；增加了热控人员对多种软件的学习负担和维护工作量；增加备品备件种类。
监控网络一体化	控制系统独立；三个系统单独设计、单独采购；通过网络联通，不需要多考虑不同控制系统DCS品牌。	系统受限于网络通讯，对通讯方式的传输精度有一定要求，精度低会带来一定网络延迟；需要运行人员掌握多种品牌的DCS性能，同时增加备品备件的种类。
软硬件系统一体化	全厂自动化水平高，实现集中控制，通信可靠；操作简单，大大降低运行人员和热控人员数量；维护量和故障率低；降低系统通讯接口，降低联网费用。	设计过程复杂，一般压缩机控制系统和空气透平控制系统由厂家供货且品牌有限，因品牌问题，招标厂家只能选择具备特定能力的厂商。

2) 空气透平控制系统一体化分析

空气透平的控制主要采用 DEH 实现, 由于大容量压缩空气储能电站所用空气透平采用全新研发机型, 运行工况与以往的工程不同, DEH 系统设计与原有成熟机型不一样, 对 DEH 控制系统要求也不同, 所以需要在原有系统上进行优化设计。但目前通用型 DEH 本身就是在 DCS 基础上开发, 空气透平 DEH 实现 DCS 一体化在技术上是可行的。

2.3 电站 DCS 一体化优点

相比非 DCS 一体化系统, 实现 DCS 一体化存在诸多优点, 主要体现在以下几点:

1) 由于 DCS 一体化系统采用统一的软件, 大大减轻了热控维护人员学习多种软件的负担, 对 DCS 系统的软件更熟悉, 能更好地维护机组的运行。同时, 热控人员可随时完成逻辑修改和参数设定, 大大提高了热控人员设备维护效率、方便和加快了控制系统的调试。

2) 由于 DCS 一体化系统采用统一的硬件设备, 能提高热控人员处理问题的能力, 降低设备故障率, 从而减少设备维护量。此外还能减少相关设备的备品备件的数量和种类, 减少电厂的资金积压和在建项目的投资。

3) DCS 一体化系统几乎所有的控制对象都进入 DCS, 运行人员可以通过统一人机接口全面监视全部系统工况, 监视操作简单、可靠。

4) 采用 DCS 一体化系统, 不需要异构系统之

间联网, 减少了各系统的通信接口, 通信组网更加方便, 增强了系统的整体性和可靠性。

5) DCS 的一体化程度越高, 所需要运行人员就越少, 因而可以达到减人增效的目的。

3 电站 DCS 一体化配置方案

根据电站 DCS 一体化可行性分析, DCS 一体化最关键在于将压缩机和空气透平两大关键设备的控制系统接入 DCS 系统中, 实现全厂 DCS 全过程监视和控制。根据公开报道, 现在尚不确定国内外已投运压缩空气储能电站在实现 DCS 一体化上的进程, 根据火电厂 DCS 一体化的经验, 对压缩空气储能电站 DCS 一体化配置方案进行探究。

根据 2.2 节 DCS 一体化分析过程, 得到图 4 压缩空气储能电站 DCS 一体化系统网络图, 包含压缩侧(含换热)、空气透平侧(含换热)、储热、电气、APS、公辅等子系统的控制器, 操作员站、工程师站、历史站等人机界面以及通信的冗余网络。图 4 表明, 压缩空气储能控制系统和空气透平控制系统作为控制子站直接关联至 DCS 主干网上, 并要求各系统 DCS 品牌、软硬件配置一致, 实现同网络、同配置的一体化, 进而实现全厂主辅系统的集中监测和控制, 提升全厂自动化管控水平。

4 结论

随着压缩空气储能技术及 DCS 技术的发展, 压缩空气储能电站主辅机 DCS 一体化控制必将在

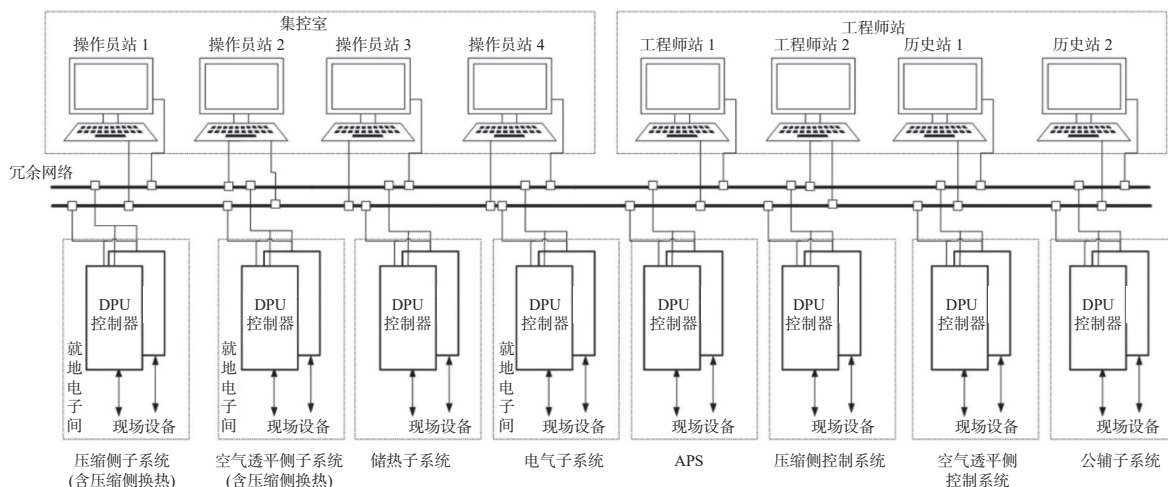


图 4 压缩空气储能电站 DCS 一体化系统网络示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the DCS integrated system network for compressed air energy storage power stations

压缩空气储能电站中逐步推进。DCS 一体化系统的选择和运用,使压缩空气储能电站自动化控制网络的功能更加强大,并使机组的经济效益和安全性能得到进一步的提升,提升机组管理运行水平。通过以上研究,得到以下结论:

1) 将全厂主、辅机所有系统的控制均纳入到同一套控制系统平台内,全厂主、辅控制系统采用相同的软硬件、采用同一套组网方式,从而实现对整个压缩空气储能电站的各主、辅控制系统的集中监控。

2) 通过以上对 DEH 以及 CCS 实现 DCS 一体化问题分析,DEH 和 CCS 实现 DCS 一体化在技术上是完全可行的。

3) 随着全国国产化、自主可控浪潮驱动下,压缩空气储能电站 DCS 一体化系统采用国产品牌,甚至是纯国产、完全自主可控品牌,将是必然的趋势。

参考文献:

- [1] 袁小明,程时杰,文劲宇.储能技术在解决大规模风电并网问题中的应用前景分析[J].*电力系统自动化*,2013,37(1):14-18. DOI: 10.7500/AEPS201210050.
YUAN X M, CHENG S J, WEN J Y. Prospects analysis of energy storage application in grid integration of large-scale wind power [J]. *Automation of electric power systems*, 2013, 37(1): 14-18. DOI: 10.7500/AEPS201210050.
- [2] 徐三敏,张云飞,赵添辰,等.“双碳”目标下新型电力系统发展综述[J].*水电与抽水蓄能*,2022,8(6):21-25. DOI: 10.3969/j.issn.2096-093X.2022.06.005.
XU S M, ZHANG Y F, ZHAO T C, et al. Overview of new-type power system development under the background of carbon peaking and carbon neutrality [J]. *Hydropower and pumped storage*, 2022, 8(6): 21-25. DOI: 10.3969/j.issn.2096-093X.2022.06.005.
- [3] 王新宝,葛景,韩连山,等.构网型储能支撑新型电力系统建设的思考与实践[J].*电力系统保护与控制*,2023,51(5):172-179. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221158.
WANG X B, GE J, HAN L S, et al. Theory and practice of grid-forming BESS supporting the construction of a new type of power system [J]. *Power system protection and control*, 2023, 51(5): 172-179. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221158.
- [4] 袁照威,杨易凡.压缩空气储能技术研究现状及发展趋势[J].*南方能源建设*,2024,11(2):146-153. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.2.14.
YUAN Z W, YANG Y F. Research status and development trend of compressed air energy storage technology [J]. *Southern energy construction*, 2024, 11(2): 146-153. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.2.14.
- [5] 梅生伟,李瑞,陈来军,等.先进绝热压缩空气储能技术研究进展及展望[J].*中国电机工程学报*,2018,38(10):2893-2907. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.172138.
MEI S W, LI R, CHEN L J, et al. An overview and outlook on advanced adiabatic compressed air energy storage technique [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(10): 2893-2907. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.172138.
- [6] 傅旭,黎建锋,邵成成,等.高比例新能源系统中各类电网侧储能设施调峰效益对比[J].*油气与新能源*,2024,36(2):95-103. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0021.2024.02.013.
FU X, LI J F, SHAO C C, et al. Peaking shaving benefits comparison of various grid-side energy storage facilities in high-proportion new energy systems [J]. *Petroleum and new energy*, 2024, 36(2): 95-103. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0021.2024.02.013.
- [7] 李季,黄恩和,范仁东,等.压缩空气储能技术研究现状与展望[J].*汽轮机技术*,2021,63(2):86-89,126. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5884.2021.02.002.
LI J, HUANG E H, FAN R D, et al. Research status and development prospects of compressed air energy storage technology [J]. *Turbine technology*, 2021, 63(2): 86-89, 126. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5884.2021.02.002.
- [8] BUDT M, WOLF D, SPAN R, et al. A review on compressed air energy storage: basic principles, past milestones and recent developments [J]. *Applied energy*, 2016, 170: 250-268. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.02.108.
- [9] 赵星源,谢芳毅,刘乙学,等.压气储能电站智能建造体系及其关键技术[J].*发电技术*,2024,45(5):899-909. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.24013.
ZHAO X Y, XIE F Y, LIU Y X, et al. Intelligent construction system and key technology for compressed air energy storage power plant [J]. *Power generation technology*, 2024, 45(5): 899-909. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.24013.
- [10] 万明忠,杨易凡,袁照威,等.大容量压缩空气储能关键技术[J].*南方能源建设*,2023,10(6):26-33. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.003.
WAN M Z, YANG Y F, YUAN Z W, et al. Key technologies of large-scale compressed air energy storage [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(6): 26-33. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.003.
- [11] 凌晨,吴斌,朱学成,等.350 MW 级先进压缩空气储能系统建模与特性分析[J].*能源研究与利用*,2023(5):28-32. DOI: 10.16404/j.cnki.issn1001-5523.2023.05.008.
LING C, WU B, ZHU X C, et al. System modeling and performance analysis of 350 MW advanced adiabatic compressed air energy storage system [J]. *Energy research & utilization*, 2023(5): 28-32. DOI: 10.16404/j.cnki.issn1001-5523.2023.05.008.
- [12] 韩雪茹,杨德昌,DEGHANIAN Payman,等.考虑 AA-CAES

- 季节效率优化的建筑微网群多能协同优化策略[J]. *电力建设*, 2023, 44(9): 94-107. DOI: [10.12204/j.issn.1000-7229.2023.09.009](#).
- HAN X R, YANG D C, DEHGHANIAN P, et al. Multi-energy cooperative scheduling of building microgrid group considering AA-CAES seasonal efficiency optimization [J]. *Electric power construction*, 2023, 44(9): 94-107. DOI: [10.12204/j.issn.1000-7229.2023.09.009](#).
- [13] 姬海民, 薛磊, 周方盛, 等. 非补燃液态压缩空气储能系统性能模拟研究 [J]. *发电技术*, 2024, 45(5): 910-918. DOI: [10.12096/j.2096-4528.pgt.24030](#).
- JI H M, XUE L, ZHOU F S, et al. System simulation study on performance of non-supplementary combustion liquid compressed air energy storage system [J]. *Power generation technology*, 2024, 45(5): 910-918. DOI: [10.12096/j.2096-4528.pgt.24030](#).
- [14] 孙晓霞, 桂中华, 高梓玉, 等. 压缩空气储能系统动态运行特性 [J]. *储能科学与技术*, 2023, 12(6): 1840-1853. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0181](#).
- SUN X X, GUI Z H, GAO Z Y, et al. Dynamic characteristics of compressed air energy storage system [J]. *Energy storage science and technology*, 2023, 12(6): 1840-1853. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0181](#).
- [15] 梅生伟, 公茂琼, 秦国良, 等. 基于盐穴储气的先进绝热压缩空气储能技术及应用前景 [J]. *电网技术*, 2017, 41(10): 3392-3399. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2017.1992](#).
- MEI S W, GONG M Q, QIN G L, et al. Advanced adiabatic compressed air energy storage system with salt cavern air storage and its application prospects [J]. *Power system technology*, 2017, 41(10): 3392-3399. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2017.1992](#).
- [16] 万明忠, 纪文栋, 商浩亮, 等. 压缩空气储能地下盐穴物探关键问题及处理技术 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(2): 26-31. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.004](#).
- WAN M Z, JI W D, SHANG H L, et al. Key problems and techniques of geophysical exploration in underground salt cavern for compressed air energy storage [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(2): 26-31. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.004](#).
- [17] 郭祚刚, 马溪原, 雷金勇, 等. 压缩空气储能示范进展及商业应用场景综述 [J]. *南方能源建设*, 2019, 6(3): 17-26. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.003](#).
- GUO Z G, MA X Y, LEI J Y, et al. Review on demonstration progress and commercial application scenarios of compressed air energy storage system [J]. *Southern energy construction*, 2019, 6(3): 17-26. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.003](#).
- [18] 卜宪标, 陈昕, 李华山, 等. 面向海上风电的水下压缩空气储能性能分析及提效技术 [J]. *电力建设*, 2024, 45(8): 106-117. DOI: [10.12204/j.issn.1000-7229.2024.08.010](#).
- BU X B, CHEN X, LI H S, et al. Performance analysis and efficiency-improving technology of underwater compressed air energy storage for offshore wind power [J]. *Electric power construction*, 2024, 45(8): 106-117. DOI: [10.12204/j.issn.1000-7229.2024.08.010](#).
- [19] 梁雪. 火电厂热工自动化DCS控制系统的应用浅析 [J]. *中国设备工程*, 2023(14): 53-55. DOI: [10.3969/j.issn.1671-0711.2023.14.025](#).
- LIANG X. Application analysis of DCS control system for thermal automation in thermal power plants [J]. *China plant engineering*, 2023(14): 53-55. DOI: [10.3969/j.issn.1671-0711.2023.14.025](#).
- [20] 陈金伟, 田忠玉, 张宇翼. 浅谈DCS系统在火电厂电气控制方面的应用 [J]. *电子元器件与信息技术*, 2022, 6(12): 97-100. DOI: [10.19772/j.cnki.2096-4455.2022.12.021](#).
- CHEN J W, TIAN Z Y, ZHANG Y Y. A brief discussion on the application of DCS system in electrical control of thermal power plants [J]. *Electronic components and information technology*, 2022, 6(12): 97-100. DOI: [10.19772/j.cnki.2096-4455.2022.12.021](#).
- [21] 纪贤瑞, 王婉茹, 李远见, 等. 生物质发电厂DCS系统一体化设计 [J]. *工程建设与设计*, 2024(13): 183-185. DOI: [10.13616/j.cnki.gcjsysj.2024.07.053](#).
- JI X R, WANG W R, LI Y J, et al. Integrated design of DCS system for biomass power plant [J]. *Construction & design for engineering*, 2024(13): 183-185. DOI: [10.13616/j.cnki.gcjsysj.2024.07.053](#).
- [22] 董建朋, 崔猛, 王宏伟, 等. 火力发电厂全厂DCS一体化实施方案的探讨 [J]. *河南电力*, 2009(3): 55-57.
- DONG J P, CUI M, WANG H W, et al. Some thinking on thermal power plant control system integration [J]. *Henan electric power*, 2009(3): 55-57.
- [23] 黄焕袍, 潘钢. 国产EDPF-NT分散控制系统在600 MW~1000 MW级大型火电机组控制中的应用 [J]. *中国仪器仪表*, 2009(3): 42-45. DOI: [10.3969/j.issn.1005-2852.2009.03.008](#).
- HUANG H P, PAN G. Applications of domestic DCS named EDPF-NT on large coal-fired power generation units with 600 MW~1000 MW capacity [J]. *China instrumentation*, 2009(3): 42-45. DOI: [10.3969/j.issn.1005-2852.2009.03.008](#).
- [24] 李飞. 国产DCS系统在超超临界机组可靠性应用研究 [J]. *南方能源建设*, 2016, 3(3): 85-90. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.03.018](#).
- LI F. Reliability application and research of domestic DCS system in ultra-supercritical unit [J]. *Southern energy construction*, 2016, 3(3): 85-90. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.03.018](#).
- [25] 皇甫迎波. 浙江中控CCS压缩机组控制系统在乙二醇装置中的应用 [J]. *仪器仪表与分析监测*, 2023(2): 1-4. DOI: [10.3969/j.issn.1002-3720.2023.02.001](#).
- HUANGFU Y B. Application of CCS compressor unit control system of Zhejiang central control in ethylene glycol plant [J]. *Instrumentation analysis monitoring*, 2023(2): 1-4. DOI: [10.3969](#)

[/j.issn.1002-3720.2023.02.001.](#)

- [26] 李超. 和利时 CCS 控制系统在 MVR 压缩机中的应用研究 [J]. 电子制作, 2020(14): 85-86. DOI: [10.16589/j.cnki.cn11-3571/tn.2020.14.036.](#)

LI C. Application research of Hollysys CCS control system in MVR compressor [J]. Practical electronics, 2020(14): 85-86. DOI: [10.16589/j.cnki.cn11-3571/tn.2020.14.036.](#)

- [27] 梁凌艳, 陈康立. 利用 CCS 系统调节放空阀开度防止喘振发生的设计与研究 [J]. 工业控制计算机, 2012, 25(10): 47-48, 50. DOI: [10.3969/j.issn.1001-182X.2012.10.023.](#)

LIANG L Y, CHEN K L. Using CCS to regulate vent valve and prevent occurrence of surge [J]. Industrial control computer, 2012, 25(10): 47-48, 50. DOI: [10.3969/j.issn.1001-182X.2012.10.023.](#)

- [28] 孙通, 吴炳辉. 1050 MW 超超临界机组 DEH 系统可靠性分析与优化措施 [J]. 化工设计, 2022, 32(5): 48-50, 2. DOI: [10.15910/j.cnki.1007-6247.2022.05.005.](#)

SUN T, WU B H. Reliability analysis and optimization measures for DEH system of 1050 MW ultra supercritical unit [J]. Chemical engineering design, 2022, 32(5): 48-50, 2. DOI: [10.15910/j.cnki.1007-6247.2022.05.005.](#)

- [29] 陈辉, 盛勇, 李文, 等. 发电用透平控制系统研究进展 [J]. 汽轮机技术, 2022, 64(3): 161-166, 232. DOI: [10.3969/j.issn.1001-5884.2022.03.001.](#)

CHEN H, SHENG Y, LI W, et al. Progress of turbine control system for power generation [J]. Turbine technology, 2022, 64(3): 161-166, 232. DOI: [10.3969/j.issn.1001-5884.2022.03.001.](#)

- [30] 詹兆春. 基于 DCS 汽轮机 DEH 控制系统的优化研究分析 [C]//江西省电机工程学会. 2020 年江西省电机工程学会年会论文集, 南昌, 2021-01-20. 南昌: 江西省电机工程学会, 2021: 196-197. DOI: [10.26914/c.cnkihy.2021.000219.](#)

ZHAN Z C. Optimization research and analysis of DEH control system for DCS turbine [C]//Jiangxi Institute of Electrical Engineering. Proceedings of the 2020 Jiangxi Society of Electrical Engineering Annual Meeting, Nanchang, January 20, 2021. Nanchang: Jiangxi Institute of Electrical Engineering, 2021: 196-197. DOI: [10.26914/c.cnkihy.2021.000219.](#)

- [31] 王金毅. 火电厂 DCS 一体化控制技术的应用探讨 [J]. 能源与节能, 2021(5): 201-202. DOI: [10.16643/j.cnki.14-1360/td.2021.05.084.](#)

WANG J Y. Discussion on application of DCS integrated control technology in thermal power plants [J]. Energy and energy conservation, 2021(5): 201-202. DOI: [10.16643/j.cnki.14-1360/td.2021.05.084.](#)

- [32] 王新平, 伏军军. 厂级一体化 DCS 技术在大型火电厂的应用 [J]. 重庆电力高等专科学校学报, 2020, 25(3): 7-9, 13. DOI: [10.3969/j.issn.1008-8032.2020.03.003.](#)

WANG X P, FU J J. A study on the application of the plant-level integrated DCS technology in large thermal power plants [J]. Journal of Chongqing electric power college, 2020, 25(3): 7-9, 13. DOI: [10.3969/j.issn.1008-8032.2020.03.003.](#)

作者简介:



袁照威

袁照威 (第一作者, 通信作者)

1988-, 男, 博士, 高级工程师, 长期从事储能技术研究工作 (e-mail) [zwyuan6276@ceec.net.cn](#).

(编辑 徐嘉铨)

广 告

封面图片: 吐纳之间、绿能脉动 ----- 封一

广东湛江外罗海上风电项目 ----- 封二

《南方能源建设》被欧洲学术出版中心数据库 EuroPub 收录 ----- 封三

《南方能源建设》期刊最美封面 ----- 封四