

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.202105

基于平行控制的双活调度系统架构设计

郝飞¹, 王兴存², 解凯¹, 鲍永¹, 陈根军¹, 顾全¹

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102; 2. 首都电力交易中心有限公司, 北京 100097)

摘要: 为了提高省级电网调度的安全可靠, 建设具备并列运行、一键切换的双活调度系统具有重要意义。在复杂平行控制理论的基础上, 结合省级电网双活调度系统的应用需求, 提出了具有平行系统特征的双活调度系统体系架构。并对其中的管理与控制、实验与评估、学习与培训、平行执行与反馈等重要组成部分的功能和实现方法进行了系统性研究。结合某省级电网备用调度系统的建设进行了应用实践, 完成了省级电网双活调度系统的构建。该方案很好地解决了两套系统之间的同步、一致性校验、双活切换等核心问题, 提高了双活调度系统运行的稳定性和切换的高效性。

关键词: 平行控制; 计算试验; 平行执行; 系统架构; 调度自动化

Architecture design of a dual active dispatching system based on parallel control

HAO Fei¹, WANG Xingcun², XIE Kai¹, BAO Yong¹, CHEN Genjun¹, GU Quan¹

(1. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China; 2. Capital Electric Power Trading Center Co., Ltd., Beijing 100097, China)

Abstract: To improve the safety and reliability of provincial power grid dispatching, it is of significance to build a dual active dispatching system with parallel operation and one key switching. Based on complex parallel control theory and combined with the application requirements of the dual active dispatching system of a provincial power grid, this paper puts forward the architecture of a dual active dispatching system with the characteristics of a parallel system. It also systematically studies the basic functions and implementation methods of important components in the system, such as management and control, experiment and evaluation, learning and training, parallel execution and feedback. The construction of a double active dispatching system of the provincial power grid is completed. The scheme solves the core problems such as synchronization, consistency verification and dual active switching between the two systems, and improves the operational stability and switching efficiency of the dual active scheduling system.

This work is supported by the National Major Project (No. 2018YFB0904800) and Strategic International Science and Technology Innovation Cooperation Key Project of National Key Research & Development Program (No. 2020YFE0200400).

Key words: parallel control; calculation experiment; parallel execution; system architecture; dispatching automation

0 引言

随着大规模风电、光伏、分布式电源等清洁能源的广泛接入, 增加了“源-网-荷”互动调度的难度, 也给大电网安全稳定带来了一系列挑战^[1-4]。智能发电、智能输变电、智能配用电、智能电网调度与电力市场等专业是智能电网关键技术的重要发展方向^[5-6]。其中, 电网调度自动化系统作为电网调控

的中枢指挥系统, 其可靠运行尤为重要。在调度自动化方面, 为了科学准确地应用调度系统的紧急事件, 要提前制定各种事故预案, 并形成预案知识库, 对实现高效的应急响应具有重要作用^[7]。智能电网调度的一体化要求实现数据一体化、数据平台一体化、功能设计一体化, 以此来提升调度系统的专业融合能力^[8-9]。在新一代调控系统中, 文献[10]提出了预调度的总体目标和框架, 根据电网调度的技术现状, 总结了实现预调度的关键技术, 并设计了预调度的功能模块; 同时在一体化运维、分析决策、微服务、电力现货交易等方面的研究也取得了较大的进展, 大大提升了调控系统的智能化水平^[11-14]。

基金项目: 国家重大专项资助(2018YFB0904800); 国家重点研发计划战略性国际科技创新合作重点专项资助(2020YFE0200400)

为提升调度自动化系统应对自然灾害和重大外部事件的应急支撑能力,各省级电网调度中心积极开展备用调度支持系统的建设,并启动“同城双中心+异地灾备”应急体系和运行机制的建设。省级电网主备调度系统是一个复杂的大系统,调度需求复杂,安全可靠性要求高。然而,在主备调度系统切换、运行维护、模型及数据同步、数据一致性校验等方面,仍然存在一些较难解决的问题^[15-16],实现主备调度系统的双活运行,一直以来都是主备调度系统追求的目标。因此,需要结合电网调度的特点,融入新的理念和控制方法,注重系统的顶层设计,形成合理、高效、先进的架构体系,指导主备调度系统的各层次技术实现。对主备调度系统架构进行重新设计,促进智能电网调度技术的发展。

平行系统是指由某个自然的现实系统和对应的一个或多个虚拟或理想的人工系统所组成的共同系统^[17]。将人工智能方法与控制理论相结合,提出了由人工系统(artificial systems)、计算试验(computational experiments)、平行执行(parallel execution)为主要过程的方法(ACP)。平行系统理论为复杂系统的建模、分析、控制和管理提供了理论体系,并在交通、电力、石化等复杂系统的研究中得到了初步应用^[18-20]。

本文首先根据省级主备调度系统的建设要求,对系统实现方案进行了分析,并对其双活运行中要解决的问题进行了梳理和归类。然后,基于平行控制系统理论,提出了一种新的双活调度系统平行系统架构,并对该架构中的主要技术进行研究和分析。具体工作包括:双活调度平行系统构建、管理与控制、实验与评估、学习与培训、平行执行与反馈等重要环节的实现方法研究。最后,结合某省级调度系统完成了双活调度系统实现方案,为实现主备调度系统的双活运行、一键切换打下基础,为省级调度双活调度系统的建设提供参考案例。

1 主备调度系统的建设要求

在国家电网发布的《智能电网调度技术支持系统》技术规范中,国、网、省级智能电网调度系统包括实时监控与预警类、调度计划类、调度管理类、安全校核类四大应用类,内含 26 项应用功能。基础平台为各类应用提供统一的模型、数据、CASE、网络通信、人机界面、系统管理以及分析计算等服务;应用之间的数据交换通过平台提供的数据服务进行^[21];另一方面,电力市场改革的持续推进,电力现货调度支持决策系统已经成为省级调度系统中必要的组成部分,集中式现货市场的运行增加了原

来调度系统的复杂性^[22]。以往省级备调系统只配置实时监控与控制、自动发电控制、自动电压控制的备用调度功能。主备调度系统通过各自网络通道独立采集实时数据,备调系统与主调系统之间只同步电网模型、主接线图、主从控制等数据。由于平时缺乏对备调系统的使用和维护,很多备调系统并不能承担调度运行任务。为了提升省级电网的应急灾备能力,各省级电网调度纷纷对原来的备用调度系统进行功能提升和改进,除要求具备监视控制功能,还增加了预警类、调度计划、调度管理、安全校核类等,大大提升了备用调度系统的灾备能力。同时,也增加了主备调度系统的复杂性。因此,复杂系统的设计、建设和运行调度,也成为管理者和研究人员持续关注的问题。

图 1 给出了某省级电网调度系统的主备调度系统实现方案。主备调度系统建立单独的数据采集网络,采集稳态监视、电量计量、新能源、保信数据、动态数据、故障录波、雷电数据、气象数据、水调数据,并与区域网调、所辖地调、发电厂进行数据交互。基础平台负责基础数据、模型、画面、信息的同步,并为应用提供相关的技术服务。同步内容包括主从切换控制标志、配置参数、模型数据等。通过商用数据库的同步服务,可以实现主调和备调系统历史数据库的同步;实时库模型、实时数据、参数数据、操作信息、计算结果,采用标准的 E 文件或数据总线的方式进行同步;第三方应用需要的模型和实时数据由备调基础平台负责提供。

上述主备调度系统实现方案为构建双活调度系统打下了良好的基础。但是,在双活调度系统中应用功能的配置要更加全面,两套系统之间没有主备之分,是平行运行的,地位是平等的。一个在运行,另一个在跟踪,即双活运行。要保证在任意时刻实现系统的无缝切换和正常使用,需要更加先进的系统理论作为支撑,实现双活调度系统的架构设计。

2 基于 ACP 方法的双活调度系统架构

2.1 平行系统理论与 ACP 方法

平行系统由人工系统、计算试验和平行执行 3 部分组成,如图 2 所示。平行系统解决实际系统问题的主要过程包括学习与培训、试验和评估、管理与控制。

1) 学习与培训。通过将实际与人工系统适当连接组合,使管理和控制实际复杂系统的有关人员掌握复杂系统的各种状况,应对扰动的响应办法,在条件允许的情况下,以实际的管理与控制方法来运行人工系统,以期获得更佳的真实效果。

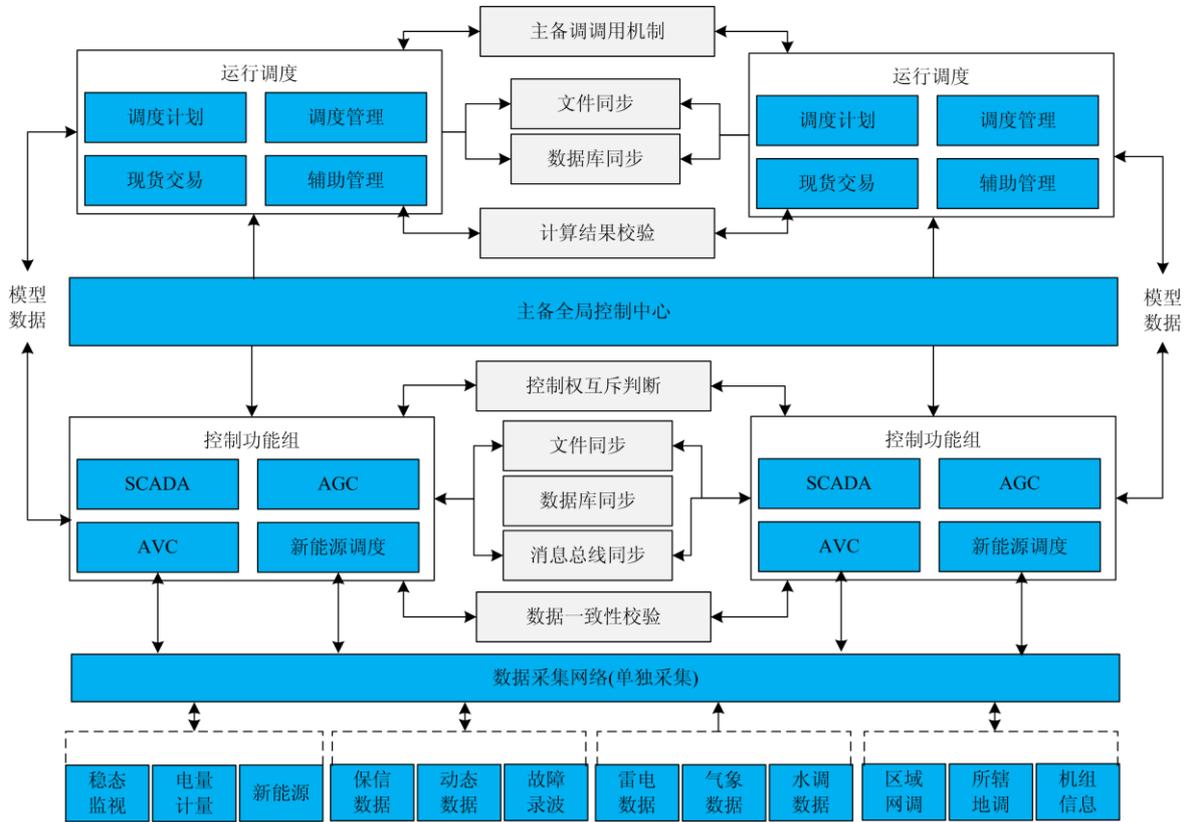


图 1 主备调度系统实现方案

Fig. 1 Synchronization of main and standby dispatching

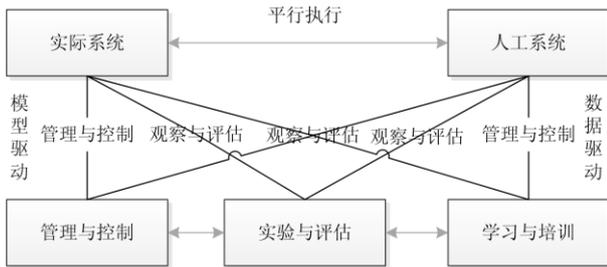


图 2 平行系统的框架和执行过程

Fig. 2 Framework and execution process of parallel system

2) 实验和评估。利用人工系统进行计算试验, 分析各种不同复杂系统的行为和反应, 并对不同解决方案的效果进行评估, 作为管理与控制决策的依据。

3) 管理与控制。通过人工系统尽可能地模拟实际系统, 对其行为进行预估, 从而寻找对实际系统有效的解决方案, 并提供当前方案改进的依据, 建立实际系统与人工系统评估反馈机制, 不断对人工系统的评估方式或参数进行修正。

平行系统的干扰源既可以来源于实际系统的外界扰动, 也可以来自于假想故障和实验, 最终的结

果都会通过反馈机制传送到控制与管理器, 进行进一步的管理与控制、试验与分析、学习与训练, 直到获得满意的执行结果。

2.2 平行系统的构建

实现平行控制的重点是构建实际系统和人工系统, 对于主备调度系统来说, 要实现双活运行就要摒弃主备的系统定位, 由原来的主备调度系统变为 A/B 调度系统, 两套系统的地位、功能都是一致的, 将调度系统的 A/B 切换运行实现常态化。基于平行控制方法的双活调度的架构设计方案如图 3 所示。

实际系统和人工系统也没有具体的指定, 把投入正式运行的调度系统认为是实际系统, 另一套系统作为人工系统, 两套系统之间通过管理与控制、实验与评估、学习与训练, 建立实时互动的反馈机制。

2.3 管理与控制

为了保证调度系统专注于主要业务和功能实现, 通过管理与控制对调度系统相关的文件、模型、数据、控制和操作进行统一管理。其中, 文件有外部文件和内部文件。外部文件是指系统外输入的文件, 如新增加厂站的主接线图、主接线图的 E 语言模型文件、变电站的量测点表信息文件、调度规则

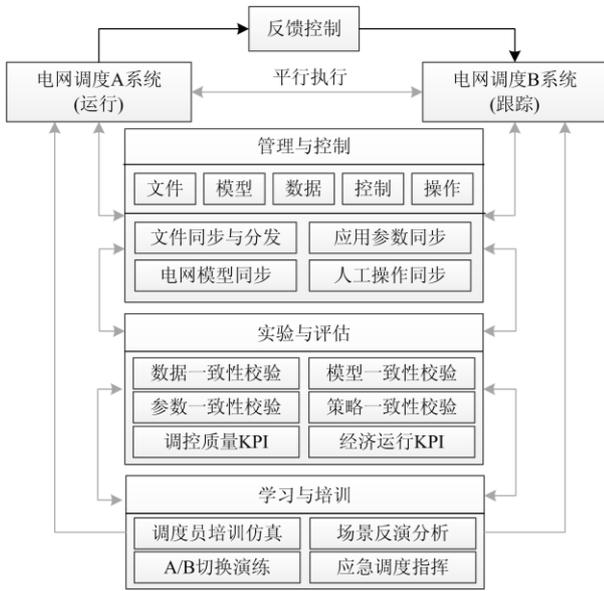


图3 双活调度系统的构建

Fig. 3 Construction dual active dispatching system

及调度管理相关文件等；内部文件是指投入运行系统运行过程中生成的，并需要同步到跟踪运行系统的文件。模型是指电网的模型文件，由运行系统生成，上传到数据中心，跟踪系统从数据中心下载进行比对和同步，并完成相关的图模库一体化建模。控制主要是实时监控、自动发电控制、自动电压控制、新能源综合调度等控制类应用模块的动作信息，一般A系统完成完整的控制和执行，B系统采用开环模式，跟踪运行。操作是指调度员的人工操作，包括人工置数、人工变位、挂牌、调整应用模块的控制参数等。控制和操作的同步要求实时性较高，可以采用消息总线的方式实现。

2.4 实验与评估

实验与评估主要完成数据一致性校验、模型一致性校验、参数一致性检验、策略一致性校验、调控质量KPI(Key Performance Index, KPI)分析、经济运行KPI分析。在日常系统切换中，一致性校验结果是A/B系统是否可以平稳切换的重要依据，以确保切换后自动控制类应用的正常使用。以自动发电控制为例，模型一致性校验主要校验控制区、电厂、PLC、机组、稳定断面等控制模型相关的结构、信息及参数是否一致。调控质量KPI分析完成对控制类的操作及执行的控制策略的评估，主要从频率、电压、功率因数、用户用电质量、持续供电小时数等指标进行衡量。经济运行KPI分析要结合优化调度的经济型指标进行计算，并对运行调度系统的运行性能进行评估分析。

实验与评估的技术架构如图4所示，包含1个中心和3个功能模块。共享数据中心将运行和跟踪调度系统的规则、模型、场景、预案、数据、文件等信息汇集到一起，为其他功能模块提供数据分析基础；学习优化包括数据学习、参数学习、模型修正3个方面，其中数据学习是根据数据的一致性校验结果对数据进行完善，参数学习是对两套系统的配置参数进行验证，模型修正是跟踪系统根据运行系统的模型变化来更新自身模型，保证两套系统模型的一致性；实验设计包括场景配置、方案制定和参数配置，运行人员可以在跟踪系统进行一些实验和模拟仿真，以保证某些策略或参数修改在运行系统中的安全性和有效性；评估分析包括一致性分析、调控分析和经济分析，为双活系统的切换提供参考指标数据。

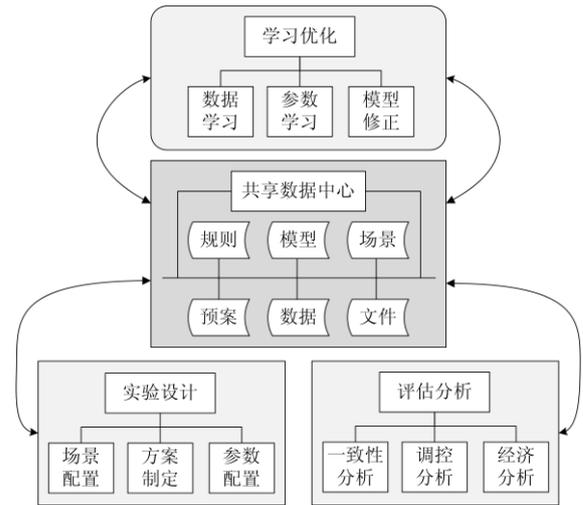


图4 实验与评估技术架构

Fig. 4 Experiment and evaluation technology framework

2.5 学习与培训

学习与培训包括调度员培训仿真、场景反演分析、A/B调度切换演练、应急调度指挥，如图5所示。调度员培训仿真能够模拟电力系统的静态和动态响应以及事故恢复过程，使学员能在与实际完全相同的调度环境中进行操作、事故处理及系统恢复的培训，熟悉各种操作。场景反演分析是在观察系统状态和控制策略的同时，高度逼真地重现电网发生过的场景，为调度员提供正常操作、事故处理及系统恢复的训练。对于两套系统来说都要具备调度员培训仿真功能，以便调度员可以进行A/B调度切换演练。应急调度指挥在学习和培训中由教员发起，通过改变电力系统运行方式和设置调度系统应用故障，通知学员进行相应的处理，实行应急调度预案。

学员可以根据实际情况判断是否需要 A/B 调度系统的切换。

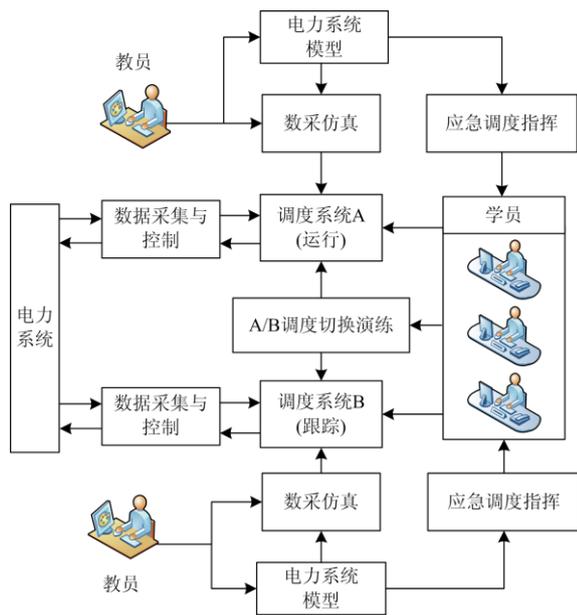


图 5 调度员学习与培训流程

Fig. 5 Learning and training flow of dispatcher

2.6 平行执行与反馈

通过平行执行与反馈建立 A、B 两套系统的运行和跟踪关系，形成软闭环运行态势。一方面对跟踪系统进行计算实验来模拟实际系统的控制策略，并通过实际系统的被控变量和控制目标的变化，来验证本身控制策略的有效性；另一方面，通过采集被控对象的实际数据，形成完整的控制、执行与反馈的控制体系，使得跟踪系统的角色从被动、离线转为主动、在线，充分发挥跟踪系统在平行系统管理与控制中的作用。

在省级电网调度系统中控制类的应用包括实时监控、自动电压控制、自动发电控制、新能源综合调度。除了实时监控是调度员手工操作，通过遥控的方式控制开关的分合，其他 3 项都是通过自动的方式来实现闭环控制，并且控制目标和控制对象也各不相同。自动电压控制主要控制变电站的有载变压器的分接头、电容器的投切、发电厂的高压母线，保证主网母线电压在合理范围内；自动发电控制主要控制火电机组的有功功率，保证电网频率稳定和恒定的联络线交换功率；新能源综合调度控制光伏电站和风力发电厂的发电出力，在满足电网约束的情况下，尽可能实现新能源的最大消纳。

在双活调度系统中，运行系统与跟踪系统有相同的输入，但是内部优化算法和功能实现不同，会出现控制策略不一致的情况。因此，在跟踪系统中

要增加计算实验环节，进行离线或在线的调控模拟仿真，其结果与运行系统状态进行实时比对，并对运行系统的运行提出优化建议。当运行系统发生故障，跟踪系统快速接管整个电网的调度任务，利用跟踪系统计算实验中的反馈功能，实现 A/B 系统的一键切换和平稳过渡。

3 建设方案分析

省级电网调度双活调度系统的建设要求两地独立建设，同时在主城建立备调场所。具备的功能包括电网稳态监视、集中控制、自动发电控制、自动电压控制、新能源综合调度、电力高级应用、智能调控操作票、综合智能告警等；有些省调还要求具备发电计划、电力现货交易、调度管理功能。要实现双活调度系统并列运行、一键切换的目标，需要在人机交互网、A/B 系统同步、A/B 系统一致性校验、主从控制权切换等方面进行统一设计和建设。在双活调度平行系统的基础上，增加数据中台，形成两套系统之间的缓冲地带，建立进行信息交互的渠道。由数据中台来完成人机交互、操作及参数同步、运行一致性校验，其中主从控制权切换还是由各自调度系统完成，数据中台提供信息交互的路径。数据中台提供面向不同应用场景的大数据分析，可以将数据采集、分析、存储融合起来，其核心功能包括采集整理、组织存储、自助分析、支持决策。通过数据驱动实现多样化的用户服务，让数据与具体的业务建立联系，发挥数据价值，如预测、推理决策和人机交互等^[23-25]。

在平行系统架构中，融入数据中台的技术特征，对两套系统的模型数据、运行数据、实时数据、操作信息、计算结果进行统一管理，可以有效提升双活调度系统的运行效率，保证系统的平滑切换和跟踪运行，实现方案如图 6 所示。

与图 1 所示的主备调度系统的实现方案相比，在基于平行系统的双活调度系统增加了数据中台，将模型文件、画面文件、管理文件、实时数据、时序数据、历史数据、人工操作、控制策略、控制评估、发电计划、检修计划、市场出清等内容进行统一的管理，提供数据共享服务。该体系架构实现了电网调度 A 系统和电网调度 B 系统的解耦，让其最大限度地发挥其核心功能，二者的信息交互和同步都是通过数据中台提供的服务来完成，实现了独立采集、独立运行、独立决策和独立执行；同时，可以大大减少调度系统本身的额外开发，并且很好地解决了异构调度系统的双活运行问题。

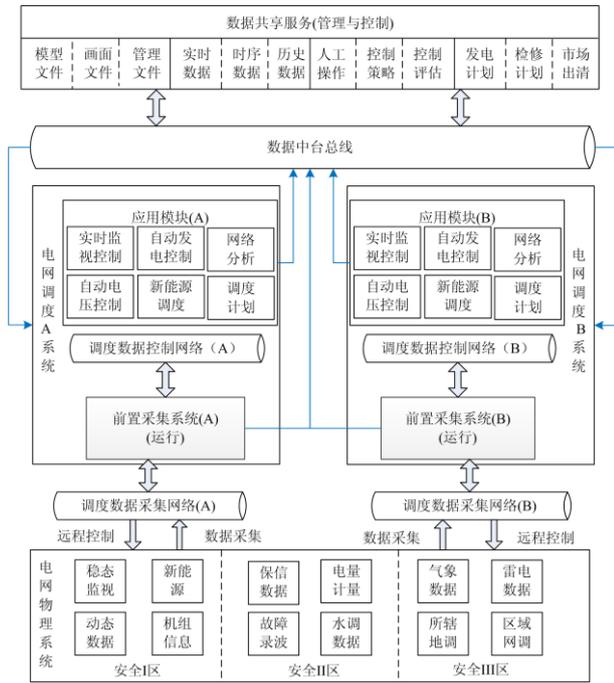


图 6 双活调度系统的实现方案

Fig. 6 Implementation of dual active dispatching system

4 结论

在省级电网双活调度系统中，要去除“主备”的概念，取而代之的是“A/B”系统，两套系统之间的地位对等，是运行和跟踪的关系，要具备“并列双活运行、一键无感切换”的要求。电网调度 A 系统运行时，电网调度 B 系统处于跟踪模式，两者之间通过管理与控制环节实现数据、模型、操作、控制指令的同步和管理；通过实验与评估实现数据、模型、参数、策略的一致性校验，并对 A/B 两套系统的运行状态进行评估；借助学习与培训环节构建调度员培训仿真、场景反演分析、调度切换演练、应急调度指挥等应用场景，保证 A/B 系统的平稳切换；平行执行与反馈在运行系统与跟踪系统之间，建立实时信息交互，并建立软闭环运行状态，并通过计算实验环节进行离线的模拟操作，提高 B 系统的跟踪精度。

最后，结合某省调的建设过程，将省级电网双活调度平行系统架构与实际工程应用相结合，完成了某省调双活调度系统的构建，并通过引入数据中台，大大简化 A/B 两套系统的改造工作，提供了更加合理和实用的体系架构，为建设更加安全可靠、经济高效的省级电网调度系统提供了有效的解决方案。

参考文献

[1] 陈志杰, 李凤婷, 赵新利, 等. 考虑源荷特性的双层互动优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 135-141.

CHEN Zhijie, LI Fengting, ZHAO Xinli, et al. A bi-level interactive optimization scheduling considering source-load characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 135-141.

[2] LI Guodong, LI Gengyin, ZHOU Ming. Model and application of renewable energy accommodation capacity calculation considering utilization level of interprovincial tie-line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1): 1-12. DOI: 10.1186/s41601-019-0115-7.

[3] 方印, 刁培玉, 申庆斌, 等. 计及“源-网-荷”成本效益的可再生能源渗透率影响量化分析[J]. 智慧电力, 2019, 47(5): 43-50, 58.

FANG Yin, XI Peiyu, SHEN Qingbin, et al. Quantitative analysis of the impact of renewable energy penetration on the cost-effectiveness of "supply-grid-load"[J]. Smart Power, 2019, 47(5): 43-50, 58.

[4] 丁健, 马春雷, 陈宣林, 等. 计及“源-网-荷”影响的主动配电网可靠性评估[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(3): 18-26.

DING Jian, MA Chunlei, CHEN Xuanlin, et al. Reliability evaluation of active distribution network considering "supply-grid-load"[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(3): 18-26.

[5] 闫华光, 陈宋宋, 杜重阳, 等. 智能电网电力需求响应标准体系研究与设计[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2685-2689.

YAN Huaguang, CHEN Songsong, DU Chongyang, et al. Research and design of power demand response standard system about smart grid[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2685-2689.

[6] 甘德树, 林桂辉, 吴海雄, 等. 以断面控制为核心的电网调度运行控制体系及系统开发[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 117-124.

GAN Deshu, LIN Guihui, WU Haixiong, et al. Research and development of power grid dispatching operation control system based on transmission section control[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 117-124.

[7] 高明, 李文云, 袁德君, 等. 电网调度自动化系统应急预案实用化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(9): 67-71.

GAO Ming, LI Wenyun, YUAN Dejun, et al. Practical study on emergency plan of power network dispatching automation system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9): 67-71.

[8] 杜贵和, 王正风. 智能电网调度一体化设计与研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 127-131.

DU Guihe, WANG Zhengfeng. Design and research on power network dispatching integration of smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 127-131.

- [9] 高志远, 陈鹏, 陈天华, 等. 新一代智能电网调度自动化标准体系研究[J]. 供用电, 2020, 37(3): 22-26, 57.
GAO Zhiyuan, CHEN Peng, CHEN Tianhua, et al. Research on new generation standard system for smart grid dispatching automation[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(3): 22-26, 57.
- [10] 刘俊, 王勇, 杨胜春, 等. 新一代调控系统预调度架构及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(22): 201-208.
LIU Jun, WANG Yong, YANG Shengchun, et al. Pre-dispatching architecture and key technologies of new generation dispatching and control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(22): 201-208.
- [11] 阙凌燕, 蒋正威, 肖艳炜, 等. 调控云关键技术研究及展望[J]. 浙江电力, 2019, 38(8): 1-7.
QUE Lingyan, JIANG Zhengwei, XIAO Yanwei, et al. Research and prospects of key technologies for dispatching and control cloud[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(8): 1-7.
- [12] SONG W, MA X X, LÜ J. Instance migration in dynamic evolution of web service compositions[J]. Chinese Journal of Computers, 2009, 32(9): 1816-1831.
- [13] 马莉, 范孟华, 曲昊源, 等. 中国电力市场建设路径及市场运行关键问题[J]. 中国电力, 2020, 53(12): 1-9.
MA Li, FAN Menghua, QU Haoyuan, et al. Construction path and key operation issues of electricity market in China[J]. Electric Power, 2020, 53(12): 1-9.
- [14] 袁泉, 吴云亮, 李豹, 等. 计及源荷不确定性的多时间尺度滚动调度计划模型与方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 8-16.
YUAN Quan, WU Yunliang, LI Bao, et al. Multi-timescale coordinated dispatch model and approach considering generation and load uncertainty[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 8-16.
- [15] 姚星安, 曾智健, 杨威, 等. 广东电力市场结算机制设计与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 76-85.
YAO Xing'an, ZENG Zhijian, YANG Wei, et al. Electricity market settlement mechanism design and practice in Guangdong[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 76-85.
- [16] 赵家庆, 赵裕嘯, 丁宏恩, 等. 电网调度自动化主备系统间模型正确性校验技术方案[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 139-144.
ZHAO Jiaqing, ZHAO Yuxiao, DING Hong'en, et al. Technical scheme for the verification of grid models between the active and standby systems in power dispatching automation system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 139-144.
- [17] WANG F Y, TANG S M. Artificial societies for integrated and sustainable development of metropolitan systems[J]. IEEE Intelligent Systems, 2004, 19(4): 82-87.
- [18] WANG F Y. Parallel control and management for intelligent transportation system: concepts, architectures, and applications[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2010, 11(3): 1-10.
- [19] 王飞跃, 赵杰, 伦淑娴. 人工电力系统与复杂大电网的运营和管理[J]. 南方电网技术, 2008, 2(3): 1-6.
WANG Feiyue, ZHAO Jie, LUN Shuxian. Artificial power systems for the operation and management of complex power grids[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(3): 1-6.
- [20] 熊刚, 王飞跃, 邹余敏, 等. 提升乙烯长周期生产管理的平行评估方法[J]. 控制工程, 2010, 17(3): 401-406.
XIONG Gang, WANG Feiyue, ZOU Yumin, et al. Parallel evaluation method to improve long period ethylene production management[J]. Control Engineering of China, 2010, 17(3): 401-406.
- [21] 严胜, 姚建国, 杨志宏, 等. 智能电网调度关键技术[J]. 电力建设, 2009, 30(9): 1-4.
YAN Sheng, YAO Jianguo, YANG Zhihong, et al. Study on key technologies in smart grid dispatching[J]. Electric Power Construction, 2009, 30(9): 1-4.
- [22] 高志远, 冯树海, 薛必克, 等. 集中式现货市场下的省级调度业务框架设计[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(18): 185-191.
GAO Zhiyuan, FENG Shuhai, XUE Bike, et al. Business framework design of provincial dispatching center in centralized electricity spot market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(18): 185-191.
- [23] WU X D, CHEN H H, WU G Q et al. Knowledge engineering with big data[J]. IEEE Intelligent Systems, 2015, 30(5): 46-55.
- [24] 李新鹏, 徐建航, 郭子明, 等. 调度自动化系统知识图谱的构建与应用[J]. 中国电力, 2019, 52(2): 70-77, 157.
LI Xinpeng, XU Jianhang, GUO Ziming, et al. Construction and application of knowledge graph of power dispatching automation system[J]. Electric Power, 2019, 52(2): 70-77, 157.
- [25] 许洪强. 调控云架构及应用展望[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3104-3111.
XU Hongqiang. Architecture dispatching and control cloud and its application prospect[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3104-3111.

收稿日期: 2021-04-15; 修回日期: 2021-08-24

作者简介:

郝飞(1980—), 男, 通信作者, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为大电网优化调度与调控; E-mail: haof@nrec.com

王兴存(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网调度运行与电力市场; E-mail: jouran@163.com

解凯(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为大电网优化调度与调控。E-mail: xiek@nrec.com

(编辑 周金梅)