

面向清洁能源消纳的流域型风光水多能 互补基地协同优化调度模式与机制

程海花¹,寇宇²,周琳³,郑亚先¹,张硕³,冯树海¹,袁汉杰²,李更丰²

(1. 中国电力科学研究院南京分院,江苏 南京 210003;2. 西安交通大学 陕西省智能电网重点实验室,陕西 西安 710049;
3. 北京电力交易中心,北京 100031)

摘要:针对面向清洁能源消纳的流域型风光水多能互补基地(WMCB)协同优化调度所面临的清洁能源时空多尺度相关性分析、大规模多类型清洁能源多能互补、高效消纳和安全管控的问题,归纳了优化调度模式和机制的相关研究并提出了未来的发展方向。首先分析了WMCB的发展现状,总结了其协同优化调度亟需解决的瓶颈问题。进而从时空多尺度互补特性、协同优化调度模式和机制方面,对WMCB的研究现状进行了梳理。最后探索了WMCB协同优化调度相关问题的解决思路,以期推动WMCB的建设和发展,从而推进大规模清洁能源的互补开发和高效消纳。

关键词:高比例清洁能源消纳;多能互补;流域型;协同调度;优化

中图分类号:TM 734;TK 019

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201908034

0 引言

能源是人类赖以生存和发展的基础,随着能源需求的不断提升和环境问题的日益恶化,发展清洁低碳、安全高效的能源体系已经成为我国能源发展的战略方向^[1-2]。近年来,随着国家政策的大力支持和清洁能源发电技术的快速发展,风、光、水等清洁能源基地的开发规模不断扩大^[3],例如:甘肃千万千瓦级的风电基地、青海的大型光伏基地、西南地区的大容量水电基地以及东南地区的大规模分布式电源等^[4]。然而,清洁能源的强波动性和不确定性使其高比例消纳成为我国能源体系进一步发展和完善的重点和难点之一。不同于上述单一资源为主的清洁能源基地,流域型风光水多能互补基地WMCB(Watershed-type wind-solar-water Multi-energy Complementary Bases)特有的自然资源分布形式给清洁能源大规模消纳带来了良好契机,是清洁能源高比例消纳模式的新探索。

WMCB旨在将水电和风电、光伏发电进行互补开发,沿流域建设多座水电站,并在流域范围内建设广泛分布的风电、光伏场站,通过全流域优质的水电整体调节性能,水能资源与风能、太阳能资源的互补特性,优化电源结构,提升电网对清洁能源的消纳能力^[5]。值得注意的是,风、光资源沿流域广泛分布的特征使基地中的清洁能源具有更加复杂的时空相关

性,同时众多风电场和光伏电站可能隶属不同的主体,这些给WMCB的优化调度和运行管控带来了极大的挑战。由此,如何在保障能源电力系统安全稳定运行的前提下,充分利用多类型清洁可再生能源之间的时空多尺度互补特性,建立高效的协同优化调度模式,形成合理的运行管控机制,已经成为WMCB进一步发展的关键问题 and 研究热点。

本文首先简要介绍了WMCB的发展现状和瓶颈。然后从清洁能源时空多尺度出力模型、WMCB协同优化调度模型及算法、运行管控机制3个方面,对WMCB协同优化调度的研究现状进行梳理。最后针对目前亟需解决的问题提出了可能的解决思路,以期对WMCB的后续建设、发展、完善提供参考和指导。

1 WMCB的发展现状

目前,我国WMCB的发展正处于起步阶段。根据国家能源局水电发展“十三五”规划,我国已经基本建成了长江上游、黄河上游、乌江、南盘江-红水河、雅砻江、大渡河六大水电基地,总规模超过 10^9 kW^[6]。其中,乌江、大渡河、雅砻江均已开展风光水多能互补开发的相关探索。

对于乌江流域多能互补清洁能源基地,文献[7]指出乌江流域风能资源与水力资源有着天然的时间互补性,风水互补发电的后续发展空间巨大,亟需开展风-水联合调度研究,掌握风-水协同优化调度的关键技术。

对于大渡河流域多能互补清洁能源基地,国电大渡河公司从2000年开始进行大渡河干流17个梯级电站(约 1.8×10^7 kW)以及西藏帕隆藏布流域(约

收稿日期:2019-03-18;修回日期:2019-06-24

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目(跨省区清洁能源消纳辅助决策技术研究)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (Research on Decision Support Technology for Cross Provincial Clean Energy Absorption)

1.2×10⁷ kW)水电资源的开发建设,并一直致力于清洁能源高效互补利用的研究。文献[8]提出水电多能互补应该跳出单一的物质层面,突破性地考虑了清洁能源在时间、空间、供需、生态和人文层面的多维度互补。

对于雅砻江流域多能互补清洁能源基地,其得天独厚的风能、太阳能和水能资源,使其成为WMCB的典型代表^[9]。作为金沙江的第一大支流,雅砻江全长约为1 571 km,流域面积约为1.36×10⁵ km²,其干流年径流量约为600 km³,天然落差约为3 830 m,目前规划了21个梯级水电站,总装机容量约为30 GW,年发电量约为1.5×10⁶ GW·h。风能资源方面,雅砻江流经甘孜、凉山、攀枝花3个行政区,为四川风能资源主要集中处,截至2015年,已投产风电总装机容量约为630 MW,风电场址21个。除此之外,根据流域内气象站太阳能辐射的实测数据以及美国国家航空航天局的数据分析,雅砻江流域范围大部分地区属于太阳能资源二类或三类地区,截至2015年,已投产光伏总装机容量约为180 MW,光伏场址4个。

作为清洁能源高比例消纳模式的重要探索方向,WMCB的规模不断扩大。然而,面对数量庞大、类型复杂、分布广泛的清洁能源场站,已有的优化调度方法不再适用。因此,如何设计有效的协同优化调度模式,真正达到各类清洁能源充分利用的初衷,逐渐成为WMCB进一步发展推广的关键。

WMCB协同优化调度模式的研究主要包含3个方面,每个方面亟需解决的瓶颈问题如下。

(1) 清洁能源时空多尺度出力模型。

针对千万千瓦级高不确定性的清洁能源,如何建立更加精准的考虑时空相关性的风电、光伏出力模型,对流域型风光水资源的时空多尺度互补特性进行分析预测,是WMCB协同优化调度设计的基础。

(2) 协同优化调度模型和算法。

针对大规模风光水清洁能源场站,如何在一个运营管理主体的集控调度下,充分利用其多能互补的特点,实现不同场站、不同层级调度机构之间的智能集控和高效配合,最大化清洁能源就地消纳量,是WMCB实现协同优化调度的关键。

(3) 运行管控机制。

针对风电场、光伏电站和水电站等数目庞大的下层多类型主体,如何充分发挥智能集控中心的协调指导作用,制定有效的协同合作模式和运行管理机制,实现系统整体优化与参与相关方的互利共赢,是WMCB协同优化调度落地实施的具体方案。

2 WMCB清洁能源时空多尺度出力建模

2.1 研究现状和局限

目前,已有大量的专家学者对风电、光伏发电和

水电机组的出力建模进行了研究。风电技术起步较早,对其出力特性建模的研究内容较多。从单一风电场建模^[10-11]、风速分布函数^[12]的研究,到风速序列时序相关性^[13]、空间相关性^[14]的研究都有所报道。其主流建模方法归纳如表1所示。

表1 风电机组出力建模

Table 1 Modeling of wind turbine output

方法	风速预测	特点	局限
解析法 ^[10]	实测风速	通过Markov链建立单机容量停运表和风电场多状态模型	大型风电场数学模型复杂,难以求解
概率分布函数法 ^[11]	威布尔分布抽样	利用风能资源情况和风电场运行水平的联合概率分布	部分风电场实际风速不服从威布尔分布
自回归移动平均法 ^[12]	ARMA	通过实测数据建立ARMA风电场出力模型,考虑风速时序特性和自相关性	没有考虑不同风电场的空间相关性
拉丁超立方抽样法 ^[13]	根据历史数据计算参数	打破样本分布类型的限制,考虑风速序列的相关性	没有考虑风速序列的时序性和自相关性
多元模拟法 ^[14]	威布尔分布抽样	考虑自相关性的同时,调整随机数种子,分析空间相关性	调整随机数种子的方法有待完善
多维时序风速相依建模法 ^[15]	Copula函数和Markov过程结合	计及风电自身时间尺度上的自相关性及不同风电场空间上的互相关性	对风电场概率性建模进行初步探索和尝试

对于光伏发电出力特性的研究起步稍晚,大多数研究还停留在提高光伏场站出力模型的精确度和准确性方面。文献[16]利用等频划分的多状态模型,提出了基于太阳辐照度波动和晴空指数的多状态转移抽样方法,使得光伏场站出力模型的预测结果更加符合实际的天气变化特性。文献[17]在考虑辐照强度时变特性的基础上,进一步利用自回归滑动平均(ARMA)模型,细化了环境温度的变化对光伏场站出力模型的影响。然而,目前对于光伏出力的建模多为针对单一光伏场站^[18],面向大规模广泛分布的光伏场站出力特性的建模还比较少见^[19]。

由于水电的不确定性相比风电、光伏发电较弱,其出力模型的发展较为成熟,已有大量文献针对水电厂出力的建模进行研究。文献[20]考虑水库水文预报系统的相关信息,建立基于径流预报特性的蒙特卡洛风险分析模型,定量分析水电厂申报电量的偏差风险。文献[21]借鉴虚拟机组技术,建立将机组工况转换成本等效为水当量的机组启停与负荷分配模型,在发电耗水成本与机组工况转换成本之间找到较好的平衡关系。文献[22]强调开停机和在水轮机效率之间的协调,应用遗传算法优化得到平稳的开停机计划,获得各机组最优的负荷匹配结果。文献[23]在实际入库水量和电网峰谷、电价丰枯的基础上,以年度发电效益为最大目标,优化计算水电厂理想发电收益动态线和电量动态线。文献[24]在风

水联合运行的基础上,分析大型水电调峰的原理,得到水电与风电协调运行的出力特性。可以看出,目前针对风光水 3 种清洁能源出力模型的研究已经取得了一定程度的进展。然而,之前的研究大多关注单一类型的清洁能源场站。如何针对沿流域广泛分布的多类型清洁能源场站,建立充分考虑时空多尺度相关特性的风光水机组出力模型,可供参考的研究成果较少。

2.2 可能的解决思路

本文基于 Copula 函数理论和 Markov 方法建立考虑时空相关性的清洁能源出力模型,实现时序出力模拟,并对清洁能源间的多能互补特性进行分析。

2.2.1 清洁能源特性建模

基于核密度估计法拟合确定风电、光伏出力的边际概率分布,然后通过联合密度函数、Copula 函数理论和 Markov 方法来研究同时具有时间和空间尺度相关性的风电、光伏出力模型,并采用蒙特卡洛方法抽样获得具有时空相关性的风电、光伏时序模拟出力曲线。考虑水电梯级利用,建立水电出力模型,通过状态持续时间抽样得到水电出力曲线。风电、光伏的出力受到大量随机因素和不同控制策略的影响,其真实概率分布往往难以较好地应用解析方法进行表征;而基于非参数核密度估计理论的概率模型,则可以在缺乏先验知识的条件下,较好地刻画这种随机变量的复杂统计特征。同时,位置、类型各不相同的风电、光伏,在时间和空间尺度上的相关关系也较为复杂,而利用 Copula 函数可以较好地刻画这种特性。与其他相关性概率模型相比, Copula 函数能够更好地保存风电、光伏出力数据的基本统计特征、概率分布特性以及包括线性与非线性在内的不同相关结构。

Copula 函数有许多不同类型可供选择,能适用于不同风电、光伏出力的相关性情况,能从空间和时间的角度分析不同风电、光伏出力之间的相关性,进而可以将两者统一建立更加准确地考虑时空相关性的风、光清洁能源出力模型。同时,利用这种综合模型抽样得到的清洁能源出力时序模拟数据更具有真实性。

2.2.2 多能互补特性建模

利用所得到的风光水清洁能源出力特性,构建资源丰富度、资源互补能力、联合调峰能力等指标,对清洁能源的多能互补特性进行量化分析,并探究风光水在不同时间尺度和空间尺度下的互补特性以及不同能源占比对指标的影响。采用多尺度综合分析的方法具体评估风光水的多能互补特性,针对多能互补分析缺乏客观评价指标的难点,设计多维评价指标,利用风功率密度、太阳辐射量、江水径流量等分析资源丰富程度,利用出力相关系数、功率波动

标准差等度量资源互补能力,利用联合功率负荷追踪度、净负荷波动标准差等度量调峰能力,全面分析多能互补特性。在此基础上,可进一步对多能互补基地开发的潜力做出时空多尺度分析,如通过对出力日曲线和年曲线的对比分析各类能源在短期和长期的时序互补特性,以相邻电厂和上下游相距较远电厂间的出力关系分析不同空间尺度下的互补特性,探究不同能源类型及其比例对多能互补能力的影响等。

3 WMCB 协同优化调度模型和算法

3.1 研究现状和局限

WMCB 协同优化调度模型和算法的重点在于:针对大规模多类型清洁能源场站,建立合理的优化调度模型,提出快速高效的求解算法。下面将从模型和算法 2 个方面,分别介绍目前的研究现状。

3.1.1 协同优化调度模型

大规模多类型清洁能源场站的多级协同优化调度模型方面,大多数研究工作集中于建立单一类型清洁能源基地并网的优化调度模型。文献[25]综合考虑水电发电效率和调峰性能,基于模糊隶属度函数和混合整数建模方法,提出了多目标短期梯级水电优化调度模型。文献[26]在深入研究源荷协调运行特性的基础上,采用多目标差分算法求解考虑风电消纳电量和系统运行成本的源荷协调多目标优化模型。文献[27]提出在光伏电站优化调度模型中引入盒式集合鲁棒优化理论和不确定性预算概念,构建考虑可靠性与经济性的电力系统不确定区间可调节鲁棒优化调度模型。文献[28]在风速预测的基础上,应用随机规划理论建立考虑机组组合的电力系统经济调度模型,并应用综合随机模拟、神经网络和遗传算法的混合智能算法提高了搜索性能。文献[29-30]指出将需求侧资源管理和需求响应引入优化调度模型,可以有效弥补风电功率预测的不确定性。文献[31]引入鲁棒随机优化理论,建立基于需求响应的风电优化调度模型,克服风电不确定性,提高了系统风电消纳能力。文献[32]将包含风电、负荷及净负荷的场景集作为随机规划调度的输入,建立了基于 here-and-now 和 wait-and-see 的二阶段随机规划调度模型,并在模型中引入激励性需求响应,与火电机组的备用容量进行协同优化。文献[33]提出梯级水库在洪水期间水库调度与洪水演进相结合的问题,建立了考虑水流流动性滞后的有后效性的动态规划调度模型,并提出多维动态规划近似解法和有后效性动态规划逐次逼近算法。

然而,针对清洁能源场站分布范围广、层级多、类型复杂的 WMCB,智能集控的多级协同优化调度模型研究尚未实现突破性进展。

3.1.2 协同优化调度算法

在大规模多类型清洁能源场站集控调度模型的求解算法方面,场景聚类、场景削减、时空解耦以及 Benders 分解等算法得到了学者们的广泛认可。

新能源出力场景的生成、筛选与削减对协同优化调度模型的求解效率具有直接的影响。当前的研究工作对基于场景聚类^[34-36]、基于最小化场景概率距离^[37-39](如 Kantorovich 距离等)的等场景削减方法进行了丰富的研究。同时,部分研究提出利用子模块优化等方法构建场景削减目标函数和约束区间,以达到最小化削减前后场景的相关性偏差^[40]或减少场景生成基数^[41]的目的。主要方法如表 2 所示。

表 2 场景削减方法

Table 2 Methods of scenario reduction

方法	削减原理	特点
K-means 聚类 削减 ^[34]	威布尔分布抽样	需设定初始聚类中心及个数,并影响聚类结果的准确性,易受数据噪声干扰
快速搜索 密度聚类 削减 ^[35-36]	计算各数据点的局部密度和距离,绘制对应决策图,以筛选出的 2 个指标中较大的点作为聚类中心	改进 K-means 聚类,无需迭代求解。基本原则为保留概率最大的典型场景,小概率极端场景考虑不足
快速前推 法 ^[37]	最小化原始场景与设定的代表性场景之间的典型场景概率距离	迭代过程中,容易忽略小概率的极端场景 ^[38]
同步回代 法 ^[38-39]	最小化原始场景与设定的代表性场景之间的典型场景概率距离	能够较好地保留初始场景的分布特性,初始场景数量较大时收敛较快
最小化场 景相关性 损失 ^[40]	最小化场景削减前后的相关性损失	可以更好地捕捉场景的相关性对优化调度决策产生的影响
子模块优 化法 ^[41]	子模块优化生成场景数量,减少初始场景削减基数	目标函数的子模块属性和加速贪婪算法的应用提升了场景削减速度

文献[42-43]考虑节点功率相关性,研究了并行计算方法在电力系统稳态潮流计算和最优潮流计算中的应用。文献[44]在逐步优化算法并行性分析的基础上,结合 Fork / Join 框架提出多核并行逐步优化算法。文献[45]为降低时序蒙特卡洛法求解多分布式电源的主动配电网协调控制模型,设计了结合多机和多核运行的可靠性评估处理方案,提出了并行计算任务分配环节的数学模型与一维搜索求解算法。文献[46]提出了基于风电区间预测信息的随机安全约束机组组合模型,并提出了基于广义 Benders 分解的计算方法。文献[47]利用 Benders 分解算法求解包含网络约束的水火最优协调问题,主问题求解跨时段约束的机组组合,子问题决定每时段有功和无功的经济调度。

然而,如何进一步提高这些算法的求解速度,使其可以有效求解千万千瓦级多能互补清洁能源基地规模大、约束多的多级协同优化调度模型,是未来可以突破的理论重点之一。

3.2 可能的解决思路

为实现多能互补基地协同优化调度,本文给出思路为:基于双层优化方法,构建智能集控中心与各清洁能源场站的双层调度模型;基于场景聚类和场景削减技术,提出含不确定性清洁能源的多级协同调度模型的高效求解算法,提高模型求解精度与计算速度。

3.2.1 协同优化调度模型

协同优化调度模型可分为下级调度模型和上级调度模型。其中,下级调度模型的具体原理^[48]为各清洁能源场站根据自身风电、光伏出力预测结果,以最大化自身收益为目标,向智能集控中心上报发电计划;上级调度模型的具体原理为智能集控中心根据各发电场站上报的发电计划,以提高系统清洁能源消纳能力和系统运行优化为目标,综合考虑水电、风电及光伏的多能互补特性,清洁能源外送通道容量约束,水电调度与防汛安排等,确定各清洁能源场站的实际发电调度策略。

(1) 下级调度模型。

为使系统总成本最低,下级调度模型优化的目标函数可表述为:

$$\min z = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [c_i^p(t) + C_{u,i} y_i^t] \quad (1)$$

其中, z 为系统总成本; $c_i^p(t)$ 为燃煤机组 i 在 t 时段的运行成本; $C_{u,i}$ 为燃煤机组 i 的开机成本; y_i^t 为由二进制表示的燃煤机组开机状态变量,燃煤机组 i 在 t 时段开机,则 $y_i^t=1$,否则 $y_i^t=0$; N 为燃煤机组台数; T 为调度时段个数。

以水电机组为例,相关运行约束如下。

a. 水电机组出力约束。

$$P_h^{\min} \leq P_h^t \leq P_h^{\max} \quad (2)$$

其中, $P_h^{\min}$ 和 $P_h^{\max}$ 分别为水电机组 h 的最小和最大出力; P_h^t 为水电机组 h 在 t 时段的出力。

b. 水-电转换效率约束。

$$P_h^t = A \xi_h Q_h^t h_h^t \quad (3)$$

其中, A 为水-电转换常数; ξ_h 为水电机组转换效率; Q_h^t 为水电机组在 t 时段的平均流量; h_h^t 为 t 时段水电机组的上游水头。

c. 日流量限制约束。

$$Q_h^{\min} \leq Q_h^t \leq Q_h^{\max} \quad (4)$$

其中, $Q_h^{\min}$ 和 $Q_h^{\max}$ 分别为水电机组日流量的下限值和上限值。日流量限制约束由上级调度部门安排制定,控制水电站的发电用水量,以保证上下游安全。

(2) 上级调度模型。

为使弃风、弃光、弃水量最小,上级调度模型优化的目标函数可表述为:

$$\min \alpha = \sum_{t=1}^T \sum_{k \in \{w, s, h\}} \omega_k (P_{k,f}^t - P_k^t) \quad (5)$$

其中, α 为总弃风、弃光、弃水量; $k \in \{w, s, h\}$, w, s, h 分别为风电场、光伏电站和水电站的编号; ω_k 为风光水弃量的惩罚系数; $P_{k,f}^t$ 为机组 k 在 t 时段的预测发电量; P_k^t 为机组 k 在日前调度计划中 t 时段的发电量。

系统负荷平衡约束条件为:

$$\sum_{i=1}^N p_{i,t} + \sum_{k \in \{w, s, h\}} P_k^t = D_t \quad (6)$$

其中, $p_{i,t}$ 为 t 时段燃煤机组 i 的出力值; D_t 为 t 时段系统的基本负荷需求。

旋转备用约束:

$$\sum_{i=1}^N (p_{i,t}^{\max} - p_{i,t}) y_i^t + \sum_{h=1}^H (P_h^{\max} - P_h^t) \geq R_t \quad (7)$$

其中, $p_{i,t}^{\max}$ 为燃煤机组 i 的最大出力值; R_t 为 t 时段的旋转备用需求量; H 为水电机组台数。为提高系统运行稳定性和可靠性, 减缓负荷波动性和新能源随机性的影响, 需设置相应旋转备用约束。

3.2.2 协同优化调度算法

协同优化调度算法的研究思路为基于场景聚类 and 场景削减技术, 生成系统调度典型场景, 降低协同优化调度优化模型的计算规模, 加快模型求解速度, 提高系统多能互补和运行优化效率。

在求解 WMCB 协同优化调度模型时, 多能互补基地的各风电场和光伏电站出力的不确定性加大了其求解难度。在对考虑时空相关性的概率分布进行状态抽样时, 往往生成大量清洁能源出力场景, 为避免遍历全部场景带来的巨大计算量, 可以利用场景聚类的方法将相似场景加以聚类削减, 实现模型加速求解。

以风电出力场景的 K -means 聚类削减为例, 其核心思想是: 将初始生成的风电出力场景划分为 R 类典型场景 (每类典型场景对应一个聚类中心), 并以风速场景到聚类中心的欧氏距离最小为优化目标, 尽可能提升每个类别内数据对象的相似度, 不断移动修正典型场景聚类中心、最终使相似场景收敛于相应典型场景以完成削减。具体算法如下。

场景聚类目标函数为:

$$\min \sum_{m=1}^R \sum_{n=1}^M u_{mn} d^2(c_m, x_n) \quad (8)$$

其中, M 为场景总数目; $d(c_m, x_n)$ 为第 m 类的聚类中心 c_m 到第 n 个场景 x_n 的欧氏距离; u_{mn} 为第 n 个场景属于第 m 类典型场景的二进制变量, $u_{mn}=0$ 时表示第 n 个场景不属于第 m 类典型场景, $u_{mn}=1$ 时表示第 n 个场景属于第 m 类典型场景。

为保证每个场景能且只能被划分到某一类中,

u_{mn} 需满足:

$$\min \sum_{m=1}^R u_{mn} = 1 \quad n \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (9)$$

为保证 R 类典型场景均不为空集, 还需满足:

$$\min \sum_{m=1}^R u_{mn} > 0 \quad n \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (10)$$

整体流程如下。

(1) 初始化。

随机选取 R 个出力场景作为 R 类典型场景的初始聚类中心。

(2) 样本归类。

将各场景划分到离其距离最近的典型场景聚类中心处, 聚类中心相同的场景即为一类:

$$u_{mn} = \begin{cases} 1 & x_n \in \text{Cluster } m \\ 0 & x_n \notin \text{Cluster } m \end{cases} \quad (11)$$

其中, Cluster m 表示第 m 类典型场景, $m=1, 2, \dots, R$ 。

(3) 类中心更新。

根据前一步的划分结果, 更新各类典型场景的聚类中心:

$$c_m = \frac{\sum_{n=1}^M u_{mn} x_n}{\sum_{n=1}^M u_{mn}} \quad (12)$$

聚类结束后, 令典型场景概率为该场景中所有场景概率之和, 并去除低概率场景, 从而形成有限数量的具有较大概率值的典型场景集合。上述场景聚类过程可以显著减少评估场景的数量, 降低协同优化调度优化模型的计算规模, 进而有效地减少计算时间。

4 WMCB 运行管控机制

4.1 研究现状和局限

WMCB 运行管控机制是基地协同优化调度落地的保障, 关键在于针对数量庞大的下层多类型清洁能源场站主体, 提出可行的运行方案、有效的管控机制。目前, 国内外学者对此已经进行了部分研究和探索。文献[49]立足于雅砻江流域水电开发现状和梯级电站远程集控新形势, 介绍了雅砻江流域梯级电站远程集控方式设计及实现。文献[50]结合雅砻江流域集控中心控制系统的实际建设, 重点探讨了集中控制系统的通信系统和综合自动化系统的配置和功能设计。文献[51]在智能联合调度的基础上, 对流域梯级电站远程集控中心进行信息化管理构建, 优化了水电企业运载生产, 提高了生产管理水平。文献[52]在水电企业流域化电站群管理的要求下, 提出建设一个统一的电力生产信息平台, 实现对流域电力生产的统一管理、集中控制、经验共享、持续优化。文献[53]在智能水电厂的研究基础上, 结

合大型流域梯级水电站的自动化、信息化系统需求,阐述了智能集控系统的体系架构设计。文献[54]利用和谐管理理论,从组织结构、管控模式、管理流程和组织职能的优化设计,相关机制和适宜组织文件的建立,以及两者围绕水电开发企业管理模式的构建三方面探讨相关企业的管理模式研究。文献[55-56]通过对风电场群远程集控系统的研究和应用,实现对风电场的信息化管理。

然而,针对WMCB中数量庞大的下层多类型主体,实现有效的信息传递,完善现有的运行机制和管控模式,仍有待进一步的探索。

4.2 可能的解决思路

运行管控机制基于相关大数据技术,搭建流域型多能互补基地的多层优化运行信息交互系统框架;按照集中控制和分散协调相结合的方法,构建由智能集控中心-区域调度中心-清洁能源场站组成的多级运行管控模式。

4.2.1 多能互补基地的信息交互模式

清洁能源基地电力调度的信息交互较为复杂,呈现出多源、高维、多尺度等大数据特点^[57]。涉及智能集控中心、各级调度机构、各类清洁能源场站等众多对象,以及电量、负荷、地理、气象等多维信息的处理,覆盖多个时空尺度上的调度、交易和新能源消纳等协同优化需求,对海量数据的存储和处理方式提出了很高要求。

基于现有大数据技术,可引入其服务器集群概念和多平台协同存储、多维数据融合处理等技术,形成协同优化调度信息交互系统框架,如图1所示。

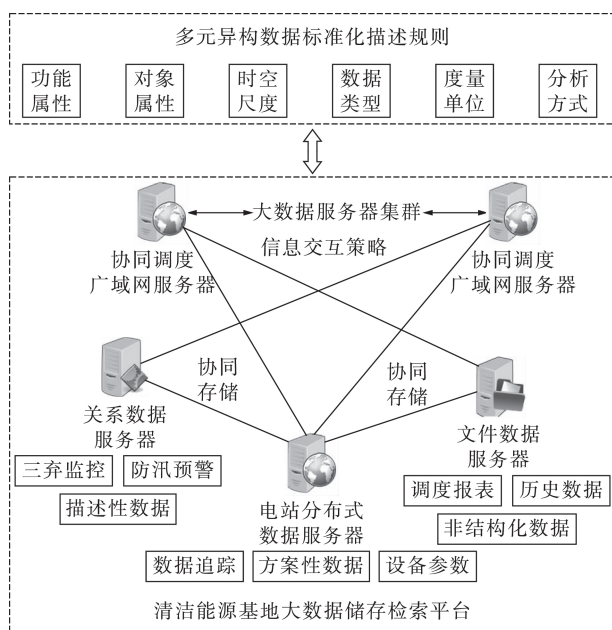


图1 多能互补运行优化信息交互系统框架

Fig.1 Framework of information interaction for multi-energy complementary operation

多源多维数据融合处理通过定义标准化的数据集成管理和分析描述规则,从数据描述规则、分布式分流处理、高频数据缓存等方面,解决时空数据差异化、多源数据高效调用和精准决策计算等关键问题,提供统一、高效的数据共享结构^[57]。

大数据储存检索平台依靠协同优化调度服务器集群、关系和文件数据服务器以及各电站的分布式数据服务器之间的多平台协同存储,大幅提高信息交互的可靠性和运行效率。其中,各类电站、机组的特征参数、运行曲线等量级较小的结构化数据主要存储于关系数据服务器,以实现高效访问;分布式数据服务器用以解决智能集控中心-区域调度中心-清洁能源场站间,多时空尺度数据的存储和访问效率问题,基于上述标准化数据描述规则,利用分布式并发处理机制实现海量数据的高效查询与处理;文件服务器主要用于处理调度报表、图片、视频等半结构化和非结构化数据;另一方面,引入的协同优化调度服务器集群概念,通过设置权重参数对全系统数据储存和计算的任务进行分配,考虑各数据服务器的性能差异,以保证多能互补和新能源消纳的实时效果^[57]。

4.2.2 多能互补基地的运行管控机制

WMCB不但涉及多时空尺度上的风、光、水信息交互,还需考虑多个运营对象间的运行管控。

目前,WMCB还处于探索阶段,管控机制案例较少;考虑到我国市场监管方面的经验较为成熟,多能互补基地的运行管控可充分发挥政府的监管作用以及智能集控中心的统筹协调职能。因此,可按照集中控制和分散协调相结合的方法,综合考虑1个运营管理主体,构建智能集控中心-区域调度中心-清洁能源场站的贯通式多级运行管控模式。

根据文献[57]中面向多能互补系统大数据管理功能体系的设计原则,结合上述协同优化调度的实际业务需求,未来可构建的WMCB的运行管控机制如图2所示。

该模式按照集中控制和分散协调相结合的方法,构建智能集控中心-区域调度中心-清洁能源场站的贯通式多级运行管控模式,并将数据集成管理、多能互补运行优化等智能集控调度应用需求统一于智能集控中心的统筹协调职能。

利用数据集成管理,为协同优化调度的各类应用场景提供决策支持。通过构建统一多源多维数据的采集和管理规则,实现不同时空尺度、不同业务维度数据的一体化查询与维护;同时,囊括优化决策多源依据、消纳指标计算、多源数据关联分析等分析工具和分类手段,可以满足消纳信息的实时查询及其优化调度决策支撑需求。

基于协同优化调度的各类应用场景,对多源集

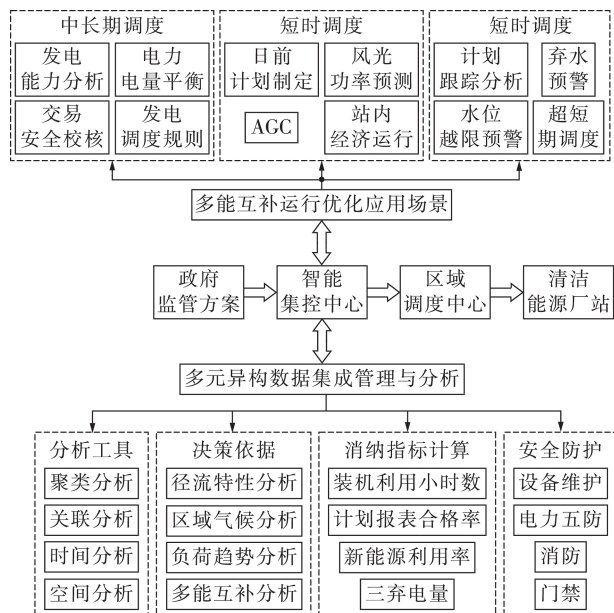


图2 WMCB运行管控模式

Fig.2 Operation and control mode of WMCB

成数据及分析工具按需调取。在中长期-短时-实时3类应用场景下,通过集成数据和分析工具,实现包括新能源出力分析、计划制定及追踪、自动发电控制(AGC)、防汛预警等业务功能,确保智能集控中心及各级调度机构指令准确快速下达,实现安全的运行管控和新能源沿流域高效消纳。

5 结论及展望

本文结合我国WMCB的发展情况,从模型、算法和运行管控机制等方面,归纳总结了国内外针对WMCB的研究现状,最后针对目前存在的问题提出了可能的解决思路,展望了清洁能源场站时空多尺度互补模型、协同优化调度模型算法和运行管控机制的研究方向,未来的相关研究将为全国WMCB的发展建设奠定基础,为清洁低碳、安全高效的能源体系建设提供支持。

(1)对于清洁能源时空多尺度出力建模方面,应突破现有清洁能源出力模型对大规模沿流域分布风电、光伏出力的随机因素考虑不全面、相关性模型维度单一、出力预测误差较大、对多能互补特性的分析不够全面的局限,建立综合考虑流域时间与空间相关性的风电、光伏出力概率模型,从时空多尺度定量刻画流域型风光水多能互补特性。

(2)对于WMCB协同优化调度模型和算法方面,应克服现有能源基地集中调度无法计及不同时空分布、不同类型清洁能源的多能互补特性、调度效率低下不足,提出智能集控中心与各清洁能源场站之间分级协同优化调度的模型和求解加速算法,发挥风光水多能互补优势,有效降低调度中心的运算负担,提高大规模多能互补清洁能源基地的优化

调度效率。

(3)对于WMCB运行管控机制方面,应突破以往大规模清洁能源基地调度模式和运行机制中人工交互模式效率低下,多级协同优化调度困难的局限,构建大规模清洁能源多能互补开发的协同优化调度模式和运行机制,从而优化各参与相关方之间的信息交互和运行管控,实现系统整体优化与参与相关方的互利共赢。

参考文献:

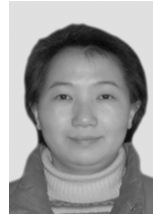
- [1] 史立山. 中国能源现状分析和可再生能源发展规划[J]. 可再生能源, 2004(5): 17-21.
SHI Lishan. Analysis of present energy condition and renewable energy development plan in China[J]. Renewable Energy, 2004(5): 17-21.
- [2] RIFKIN J. The third industrial revolution: how lateral power is transforming energy, the economy, and the world[M]. New York, USA: Palgrave Macmillan, 2013: 1-5.
- [3] 李俊峰, 时璟丽. 国内外可再生能源政策综述与进一步促进我国可再生能源发展的建议[J]. 可再生能源, 2006(1): 1-6.
LI Junfeng, SHI Yuli. International and chinese incentive policies on promoting renewable energy development and relevant proposals[J]. Renewable Energy, 2006(1): 1-6.
- [4] 国家可再生能源中心. 国际可再生能源发展报告[M]. 北京: 中国经济出版社, 2013: 10-40.
- [5] 杨学伟. 楚雄风光水互补协调运行及新能源建设运行管理初探[J]. 水电站机电技术, 2016, 39(8): 4-9.
YANG Xuewei. Preliminary study on the complementary operation of Chuxiong scenery and water and the operation management of new energy construction[J]. Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station, 2016, 39(8): 4-9.
- [6] 国家能源局. 水电发展“十三五”规划[EB/OL]. (2016-11-30)[2019-03-18]. <http://news.bjx.com.cn/html/20161107/786734.shtml>.
- [7] 冷刚, 顾文钰, 杜敦萌, 等. 乌江流域水资源综合利用面临形势及对策分析[J]. 科技展望, 2017, 27(3): 223-224.
LENG Gang, GU Wenyu, DU Dunmeng, et al. Analysis on the situation and countermeasures of comprehensive utilization of water resources in Wujiangriver basin [J]. Technology Outlook, 2017, 27(3): 223-224.
- [8] 陈刚, 曹雪娟, 王钰捷. 多能互补在大渡河水电基地的实践与探索[J]. 四川水力发电, 2018, 37(2): 85-88.
CHEN Gang, CAO Xuejuan, WANG Yujie. Practice and exploration of multi-energy complementary in Dadu river hydropower base[J]. Sichuan Hydropower, 2018, 37(2): 85-88.
- [9] 吴世勇, 周永, 王瑞, 等. 雅砻江流域建设风光水互补千万千瓦级清洁能源示范基地的探讨[J]. 四川水力发电, 2016, 35(3): 105-108.
WU Shiyong, ZHOU Yong, WANG Rui, et al. Discussion on the construction of a demonstration base of complementary energy of 10 million kilowatts of scenery water in the Yalong river basin[J]. Sichuan Hydropower, 2016, 35(3): 105-108.
- [10] 姜文, 严正, 杨建林. 基于解析法的风电场可靠性模型[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(10): 79-83.

- JIANG Wen, YAN Zheng, YANG Jianlin. Wind farm reliability model based on analytical method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(10): 79-83.
- [11] 吴林伟, 张建华, 刘若溪. 考虑风电机组故障的风电场可靠性模型及其应用[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(16): 31-35.
- WU Linwei, ZHANG Jianhua, LIU Ruoxi. A wind farm reliability model considering wind turbine faults and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(16): 31-35.
- [12] 姜文, 严正. 含风电场的发电组合系统可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(4): 5-9.
- JIANG Wen, YAN Zheng. Reliability assessment of composite generation and transmission system with wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(4): 5-9.
- [13] 秦志龙, 李文沅, 熊小伏. 含具有风速相关性风电场的发电系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(20): 27-33.
- QIN Zhilong, LI Wenyuan, XIONG Xiaofu. Reliability assessment of composite generation and transmission systems with wind farms considering wind speed correlations[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(20): 27-33.
- [14] 李玉敦, 谢开贵. 含多个风电场的电力系统可靠性评估[J]. 电力科学与技术学报, 2011, 26(1): 73-76, 103.
- LI Yudun, XIE Kaigui. Reliability assessment of power systems containing multiple wind farms[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2011, 26(1): 73-76, 103.
- [15] 李玉敦, 谢开贵, 胡博. 基于Copula函数的多维时序风速相依模型及其在可靠性评估中的应用[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 840-846.
- LI Yudun, XIE Kaigui, HU Bo. A Copula function-based dependent model for multivariate wind speed time series and its application in reliability assessment[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 840-846.
- [16] 王敏, 宗炫君, 袁越, 等. 含光伏电站的发电系统可靠性分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 42-49.
- WANG Min, ZONG Xuanjun, YUAN Yue, et al. Reliability analysis of generation systems with photovoltaic stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 42-49.
- [17] 汪海瑛, 白晓民, 马纲. 并网光伏电站的发电可靠性评估[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 1-5.
- WANG Haiying, BAI Xiaomin, MA Gang. Reliability assessment of grid-integrated solar photovoltaic system[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 1-5.
- [18] PARK J, WU Liang, CHOI J, et al. A probabilistic reliability evaluation of a power system including solar/photovoltaic cell generator[C]//Power & Energy Society General Meeting. Alberta, Canada: IEEE, 2009: 3849-3854.
- [19] 高英, 谢开贵, 胡博, 等. 考虑光伏出力与负荷相关性的光伏电站容量可信度评估[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 1-6.
- GAO Ying, XIE Kaigui, HU Bo, et al. Photovoltaic power capacity credit evaluation model considering the correlation between photovoltaic power generation and system load[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 1-6.
- [20] 张验科, 王丽萍, 李安强, 等. 水电厂竞价电量的风险分析模型及应用[J]. 水电自动化与大坝监测, 2006, 30(6): 27-30.
- ZHANG Yanke, WANG Liping, LI Anqiang, et al. Risk analysis model of bidding energy for hydropower plants and its application[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2006, 30(6): 27-30.
- [21] 李洪斌, 李承军, 周燕屏. 一种实用的水电厂机组启停与负荷分配模型[J]. 水电自动化与大坝监测, 2003, 27(2): 1-3.
- LI Hongbin, LI Chengjun, ZHOU Yanping. A practical unit commitment and load distribution model for hydropower plants[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2003, 27(2): 1-3.
- [22] 王立明, 马光文, 过夏明. 基于降低开停机成本的水电厂“节水增效”模型[J]. 水电能源科学, 2004, 22(2): 33-35.
- WANG Liming, MA Guangwen, GUO Xiaming. Model of saving discharge and increasing benefit based on reducing start-up/shut-down cost at hydroelectric plant[J]. Water Resource Power, 2004, 22(2): 33-35.
- [23] 李英海, 万元. 水电厂发电效益评级模型及其应用[J]. 水电能源科学, 2012, 30(3): 71-73.
- LI Yinghai, WAN Yuan. Hydropower generation benefit evaluation model and its application[J]. Water Resource Power, 2012, 30(3): 71-73.
- [24] 衣立东, 朱敏奕, 魏磊. 风电并网后西北电网调峰能力的计算方法[J]. 电网技术, 2010, 30(2): 129-132.
- YI Lidong, ZHU Minyi, WEI Lei. A computing method for peak load regulation ability of northwest China power grid connected with large-scale wind farms[J]. Power System Technology, 2010, 30(2): 129-132.
- [25] 葛晓琳, 张粒子, 王春丽. 多目标短期梯级水电优化调度混合整数模型[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 55-60.
- GE Xiaolin, ZHANG Lizi, WANG Chunli. Mixed integer model for multi-objective short-term cascaded hydropower optimal scheduling[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 55-60.
- [26] 刘文颖, 文晶, 谢昶, 等. 考虑风电消纳的电力系统源荷协调多目标优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5): 1079-1088.
- LIU Wenyong, WEN Jing, XIE Chang, et al. Multi-objective optimal method considering wind power accommodation based on source-load coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5): 1079-1088.
- [27] 彭春华, 谢鹏, 陈臣. 大规模光伏电站介入电网可调节鲁棒优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4324-4332.
- PENG Chunhua, XIE Peng, CHEN Chen. Adjustable robust optimal dispatch of power system with large-scale photovoltaic power stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4324-4332.
- [28] 孙元章, 吴俊, 李国华. 基于风速预测和随机规划的含风电场电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(4): 41-47.
- SUN Yuanzhang, WU Jun, LI Guohua. Dynamic economic dispatch considering wind power penetration based on wind speed forecasting and stochastic programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(4): 41-47.
- [29] MOURA P S, ALMEIDA A T D. The role of demand-side management in the grid integration of wind power[J]. Applied Energy, 2010, 87(8): 2581-2588.

- [30] HANANEH F, ALIREZA Z, SHAHRAM J. The role of demand response in single and multi-objective wind-thermal generation scheduling: stochastic programming[J]. Energy, 2014, 64: 853-867.
- [31] TAN Z, JU L, REED B, et al. The optimization model for multi-type customers assisting wind power consumptive considering uncertainty and demand response based on robust stochastic theory[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 105(11): 1070-1081.
- [32] 仇梦林, 胡志坚, 王小飞, 等. 基于动态场景集和需求响应的二阶段随机规划调度模型[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 68-76.
ZHANG Menglin, HU Zhijian, WANG Xiaofei, et al. Two-stage stochastic programming scheduling model based on dynamic scenario sets and demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 68-76.
- [33] 梅亚东. 梯级水库优化调度的有后效性动态规划模型及应用[J]. 水科学进展, 2000, 11(2): 194-198.
MEI Yadong. Dynamic programming model without Markov property of cascade reservoirs operation and its application[J]. Advances in Water Science, 2000, 11(2): 194-198.
- [34] 洪绍云, 程浩忠, 曾平良, 等. 基于相关场景聚类的发输电联合扩展规划[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(22): 71-76, 92.
HONG Shaoyun, CHENG Haozhong, ZENG Pingliang, et al. Coordinated generation and transmission expansion planning with clusters of correlative scenarios[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 71-76, 92.
- [35] 薛友, 李杨, 高滢. 计及风电出力随机特性的电-气综合能源系统随机优化[J]. 电力建设, 2018, 39(12): 2-12.
XUE You, LI Yang, GAO Ying. Stochastic optimization in integrated electricity-gas energy systems considering stochastic characteristics of wind power outputs[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(12): 2-12.
- [36] YANG H, ZHANG J, QIU J, et al. A practical pricing approach to smart grid demand response based on load classification[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 9(1): 179-190.
- [37] 张文韬, 王秀丽, 吴雄, 等. 大规模风电接入下含大用户直购电的电力系统调度模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12): 2927-2935.
ZHANG Wentao, WANG Xiuli, WU Xiong, et al. An analysis model of power system with large-scale wind power and transaction mode of direct power purchase by large consumers involved in system scheduling[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 2927-2935.
- [38] 马溪原, 郭晓斌, 雷金勇. 面向多能互补的分布式光伏与气电混合容量规划方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 55-63.
MA Xiyuan, GUO Xiaobin, LEI Jinyong. Capacity planning method of distributed PV and P2G in multi-energy coupled system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 55-63.
- [39] 娄素华, 胡斌, 吴耀武, 等. 碳交易环境下含大规模光伏电源的电力系统优化调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 91-97.
LOU Suhua, HU Bin, WU Yaowu, et al. Optimal dispatch of power system integrated with large scale photovoltaic generation under carbon trading environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 91-97.
- [40] WANG Y, LIU Y, KIRSCHEN D S. Scenario reduction with submodular optimization[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3): 2479-2480.
- [41] BERALDI P, BRUNI M E. A clustering approach for scenario tree reduction: an application to a stochastic programming portfolio optimization problem[J]. TOP, 2014, 22(3): 934-949.
- [42] LIU J, HAO X D, CHENG P F, et al. A parallel probabilistic load flow method considering nodal correlations[J]. Energies, 2016, 9(12): 1041-1056.
- [43] YE C J, HUANG M X. Multi-objective optimal power flow considering transient stability based on parallel NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(2): 857-866.
- [44] 冯仲恺, 牛文静, 廖胜利. 水电系统中长期发电调度多核并行逐步优化方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(11): 75-81.
FENG Zhongkai, NIU Wenjing, LIAO Shengli. Multi-core parallel progressive optimization algorithm for mid-/long-term generation dispatch of hydropower system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(11): 75-81.
- [45] 陈鹏伟, 陶顺, 肖湘宁. 主动配电网可靠性评估源荷模型改进及并行处理[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 68-75.
CHEN Pengwei, TAO Shun, XIAO Xiangning. Source-load model improvement and parallel computing for reliability evaluation of active distributed networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 68-75.
- [46] 夏新华, 高宗和, 李恒强, 等. 考虑时空互补特性的风光水火多能源基地联合优化调度[J]. 电力工程技术, 2017, 36(5): 59-65.
XIA Xinhua, GAO Zonghe, LI Hengqiang, et al. Combined optimization dispatching of multi-source hybrid power bases considering the time-space complementary characteristics[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(5): 59-65.
- [47] 汪超群, 韦化, 吴思缘. 计及风电不确定性的随机安全约束机组组合[J]. 电网技术, 2017, 41(5): 1419-1427.
WANG Chaoqun, WEI Hua, WU Siyuan. Stochastic-security-constrained unit commitment considering uncertainty of wind power[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1419-1427.
- [48] 丁仁山, 孙锐. 雅砻江流域梯级电站远程集控方式设计及实现[J]. 水电自动化与大坝监测, 2013, 37(5): 14-17.
DING Renshan, SUN Rui. The method design and implementation for remote control of Yalong River cascade hydropower station[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2013, 37(5): 14-17.
- [49] 王刚, 窦海妮. 流域水电站群集中控制系统设计及应用[J]. 人民长江, 2015, 46(11): 93-95.
WANG Gang, DOU Haini. Design and application of centralized control system for hydropower station group in Yalong River Basin[J]. Yangtze River, 2015, 46(11): 93-95.
- [50] 王全亮, 张晓林, 戈鹏. 基于智能联合调度的流域梯级电站集控中心信息化管理[J]. 中国管理信息化, 2016, 19(3): 96-98.
WANG Quanliang, ZHANG Xiaolin, GE Peng. Information management of centralized control center of river cascade hydropower station based on intelligent joint scheduling[J]. China Management Informationization, 2016, 19(3): 96-98.
- [51] 罗戎, 刘广宇. 夯实信息基础支撑流域集控[J]. 水电站机电技术, 2015, 38(7): 20-22.

- LUO Rong, LIU Guangyu. Mechanical & electrical technique of hydropower station[J]. Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station, 2015, 38(7): 20-22.
- [52] 华涛, 芮钧, 刘观标. 流域智能集控体系架构研究[J]. 水电厂自动化, 2018, 39(1): 21-25.
- HUA Tao, RUI Jun, LIU Guangbiao. Design and application of overall system structure of intelligent centralized control center of basin cascade hydropower stations[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2018, 39(1): 21-25.
- [53] 李子叶, 席酉民, 葛京. 流域化水电开发企业管理模式研究——以雅砻江流域水电开发为例[J]. 科学学与科学技术管理研究, 2009(5): 163-169.
- LI Ziyue, XI Youmin, GE Jing. Study on management model of hydropower development enterprise-taking Ertan Company for example[J]. Science of Science and Management of Science & Technology, 2009(5): 163-169.
- [54] HANS C G, YVONNE S, THOMAS P, et al. Integrated modeling of variable renewable energy-based power supply in Europe[J]. Energy, 2017, 123: 173-188.
- [55] GUNGOR V C, SAHIN D, KOC AK T, et al. Smart grid technologies: communication technologies and standards[J]. IEEE Transactions on Industrial Informations, 2011, 7(4): 529-539.
- [56] WILFREDO S S, ALBERTO V. Hydrothermal scheduling using benders decomposition: accelerating techniques[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 1351-1359.
- [57] 申建建, 曹瑞, 苏承国, 等. 水火风光多源发电调度系统大数据平台架构及关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(1): 43-55, 319.
- SHEN Jianjian, CAO Rui, SU Chengguo, et al. Big data platform architecture and key techniques of power generation scheduling for hydro-thermal-wind-solar hybrid system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(1): 43-55, 319.

作者简介:



程海花

程海花(1977—),女,湖北黄州人,高级工程师,硕士,研究方向为电力市场和电力系统优化调度(E-mail: chenghaihua@epri.sgcc.com.cn);

寇宇(1992—),男,陕西咸阳人,博士研究生,研究方向为电力系统优化运行、清洁能源消纳(E-mail: kyallen@stu.xjtu.edu.cn);

周琳(1977—),女,陕西西安人,高级工程师,硕士,研究方向为电力市场交易运营(E-mail: zhou-lin@sgcc.com.cn)。

Collaborative optimal dispatching mode and mechanism of watershed-type wind-solar-water multi-energy complementary bases for clean energy absorption

CHENG Haihua¹, KOU Yu², ZHOU Lin³, ZHENG Yaxian¹, ZHANG Shuo³,
FENG Shuhai¹, YUAN Hanjie², LI Gengfeng²

(1. Nanjing Branch of China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Smart Grid, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. Beijing Power Exchange Center, Beijing 100031, China)

Abstract: Aiming at the problems of collaborative optimal dispatching of WMCB (Watershed-type wind-solar-water Multi-energy Complementary Bases) for clean energy consumption, the related researches on optimal dispatching mode and mechanism are summarized and prospected. The problems mainly include space-time multi-scale correlation analysis of clean energy, multi-energy complementary characteristics, efficient absorption and safety control of large-scale and multi-type clean energy. Firstly, the development status of WMCB is analyzed, and the bottlenecks of its collaborative optimal dispatching are summarized. Then, the research status of WMCB is summarized from the aspects of space-time multi-scale complementary characteristics, collaborative optimal dispatching mode and mechanism. Finally, the solutions of the problems related to the collaborative optimal dispatching of WMCB are explored, in order to promote the construction and development of WMCB and the complementary development and efficient absorption of large-scale clean energy.

Key words: absorption of high proportion clean energy; multi-energy supplement; watershed-type; coordination dispatching; optimization