DOI:10.13878/j.cnki.jnuist.20240311003

王珍意[1] 高道春[1] 莫熙[1] 戈本星[1] 路学刚[1] 郝靖彪[2] 谢桦[2] 张沛[2,3]

基于图数据库和图计算的源网荷储协同日内调度计算方法

摘要

新型电力系统需要“源网荷储一体化”协同优化调度.目前,调度自动化系统采用关系型数据库,基于多个关联表进行数据查询和存储,难以满足计算的快速性需求.本文提出一种基于图的源网荷储协同日内调度计算方法.首先,利用图数据库实现源网荷储时空数据的融合;其次,综合考虑火电机组、可调节负荷和储能等多种资源,构建源网荷储协同日内调度优化模型;然后,提出基于图计算的潮流计算方法,快速进行系统安全校核;最后,基于安全校核结果修正系统运行状态,直至满足所有的运行约束条件.通过对改进的IEEE118和IEEE1354节点系统算例进行分析,结果表明,本文提出的源网荷储协同优化方法能够提升计算效率.

关键词

图计算;时空数据融合;源网荷储协同;日内调度

中图分类号 TM711

文献标志码 A

收稿日期 2024-03-11

资助项目 云南电力调度控制中心科技项目(YNKJXM20222463)

作者简介

王珍意,男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统调度及自动化控制.adminhust@163.com

张沛(通信作者),男,博士,教授,研究方向为电力系统运行调度.peizhang166@qq.com

1 中国南方电网有限责任公司 云南电力调度控制中心,昆明,650000

2 北京交通大学 电气工程学院,北京,100044

3 天津大学 电气自动化与信息工程学院,天津,300072

0 引言

电力系统中可再生能源比例的提高,对系统的灵活性提出了更高的要求.当前的电网调度大多采取“源随荷动、只调整集中式发电”的传统调度模式,储能和负荷未纳入调度范围.国务院印发的《2030年前碳达峰行动方案》明确要求:积极发展“新能源+储能”、源网荷储一体化和多能互补,支持分布式新能源合理配置储能系统.

国内外学者对源网荷储协同优化调度进行了大量研究,取得了一系列成果 .源网荷储优化调度问题是高维非线性优化问题,求解源网荷储优化调度问题的现有方法包括常规求解方法[1-3]和人工智能求解方法[4-5].文献[1-2]将系统构建为混合整数规划模型,并使用商用求解器CPLEX进行求解.文献[6]利用具有二阶收敛速度的分布式牛顿算法实现了微电网群的运行优化.文献[7] 将源网荷储协同优化模型转化为马尔可夫决策过程,结合近似动态规划算法压缩状态空间与决策空间,进行快速求解.常规求解算法易陷入局部最优,且只适用于目标连续可微的情况,这种情况在实际问题中并不存在.文献[8]利用模拟退火算法对综合考虑阀点效应、传输线路损耗和备用约束的经济调度问题求解,起到了很好的效果.文献[9]提出的改进混合遗传算法适用于包含系统和运行约束的经济调度问题,能够提高精度和收敛速度.文献[10]采用综合随机模拟、神经元网络和遗传算法的混合智能算法求解含风电场随机机会约束经济调度模型.文献[11]分别利用基于动态交换和密度距离的混沌粒子群算法和二进制粒子群算法求解日前调度和实时调度模型.文献[12]利用差分进化和帝国竞争算法求解考虑源网荷储的主动配电网优化调度.文献[13]调整次胜者受罚的竞争学习算法的节点权值计算清洁能源互联网的可靠性,经引入收缩因子的粒子群算法对模型进行求解.文献[14]基于纳什均衡理论,构建源网荷三侧共赢的优化调度模型,所提策略有效提高了电网灵活性资源的配置能力.现有文献一般以系统运行和资源最优组合为重点,源网荷储各个环节之间不够,各类资源之间的互补性不够协调.源网荷储优化决策问题须考虑非线性因素,存在优化规模大、求解难度高的问题,还缺乏统一的模型[15],且模型约束考虑不够全面.此外,随着求解规模的不断增大,优化求解速度会大大降低,难以达到应用要求.

新型电力系统规模的增大和控制变量的增多,使得优化控制任务日趋复杂,对调度系统的计算规模和分析速度提出了更高的要求.目前普遍采用的关系型数据库涉及磁盘读写,而且计算时需要从不同表中读取数据,当成千上万节点的大规模电力系统进行潮流计算或优化调度计算时,从关系型数据库中读取数据的速度无法满足实时数据处理要求[16].图数据库中每个时间断面都是一张图,利用连续的时间轴形成电网的时空演化,可进行系统时空数据的存储与计算,从而进行快速求解[17-18].

图数据库技术在电力系统中已有一些应用.文献[19]提出了图数据库的"电网一张图"多源信息多源集成方法及架构优势.文献[20-21]验证了图计算技术在大规模电力系统优化中的计算优势.文献[22]提出基于图计算框架的大规模能源互联网一体化建模与计算框架,验证了以顶点为中心的图计算模式的可拓展性.文献[23]构建了图模型下交直流混合配电网的优化调度模型,并推导了基于交替方向乘子法的交直流混合配电网图计算方法.上述研究成果表明,图计算技术在处理大规模系统分析与计算中具有优势.

本文将面向大规模的新型电力系统研究源网荷储协同日内调度方法,将系统中储能、可调节负荷等资源建模于图数据库中.基于图数据库快速读取多源时空数据,建立源网荷储协同的日内优化调度模型,采用图计算技术,设计节点并行计算方法,实现大规模系统优化调度策略快速求解.最后,基于改进的IEEE118和IEEE1354节点算例验证了本文所提策略能够有效整合系统时空数据,快速计算源网荷储协同的日内调度计划.

1 图数据库

1.1 图数据库的概念

图数据库是一种可实现对复杂关联关系、海量数据分布式存储和并行处理的数据库.数据库由顶点、顶点之间的边构成,其中,"顶点"表示实体,"边"将顶点和顶点连接起来,表示实体之间的关联关系.图数据库很好地表达了数据之间的关联性,可从海量的数据中得到潜在的信息.图数据库的时空数据融合可分为拓扑融合和数据融合.拓扑融合是将系统内部的拓扑结构及其之间的连接关系装载进图数据库.数据融合将不同时间与空间维度的数据进行一体化融合,探索数据之间的关联关系.图数据库应用于电力系统数据存储与分析,不仅很好地表达了数据之间的关联性,而且图数据库模型能够直观地表达网络的结构、设备的连接方式,易于实现并行化访问,可提高大规模系统海量数据处理的计算效率.

1.2 电力图模型的构建方法

CIM/E模型是国家电网有限公司提出的一种描述电力系统模型的规范[24].CIM/E模型将电力系统分为控制区域类、同步发电机类等25类关系对象.在图数据库中,将CIM/E对象类建模为顶点,其关联关系建模为边.图数据库中发电机、负载、变电站等单端组件的参数被定义为顶点,输电线路、变压器、断路器等多端子元件定义为边,再连接相应的顶点和边形成系统拓扑.同时,开关、刀闸等数量是发电机、负荷、母线等设备数量的数倍,将开关、刀闸等转换为边,可大幅减少系统中顶点和边的数量,提升数据库访问效率.除拓扑的关联外,CIM/E模型还描述了设备的其他关联,例如负荷类所包含的电压等级标识、基准电压标识等.在图数据库中首先建立电压等级标识、基准电压标识类型的顶点,然后用边描述负荷类顶点与电压等级标识类顶点的关联.

网络拓扑结构可以利用元数据映射为图数据模式(Schema),形成图数据库.映射过程中,不仅需要展示电力系统在空间维度上的演化,还需要展示电力系统在时间维度上的演化.在Schema中,发电机、储能、可调节负荷的信息全部定义在BUS节点中,多时刻的负荷数据定义在Time节点中,拓扑结构中线路信息定义在Line边中,各时刻的可调节负荷价格数据、机组出力价格数据定在Time_connect边中.电力系统图数据模型如图1所示.

如图1所示,利用图数据库,将不同时刻的运行数据汇集,实现了从传统的存储"多张相互关联表"到存储"一张相互关联表"的转变,将电网的时空数据全部融合到"一张图"中,进行快速的数据存储、查询、更改,提升数据管理效率.

2 源网荷储日内优化调度

2.1 日内优化调度模型

在机组出力状态确定的情况下,日内优化调度考虑源网荷储不同主体的经济利益,对机组进行进一步优化.本文系统以运行成本为目标,建立以机组出力上下限约束、机组相邻时刻爬坡约束、功率平衡约束、安全运行约束为约束条件的优化模型.日内调

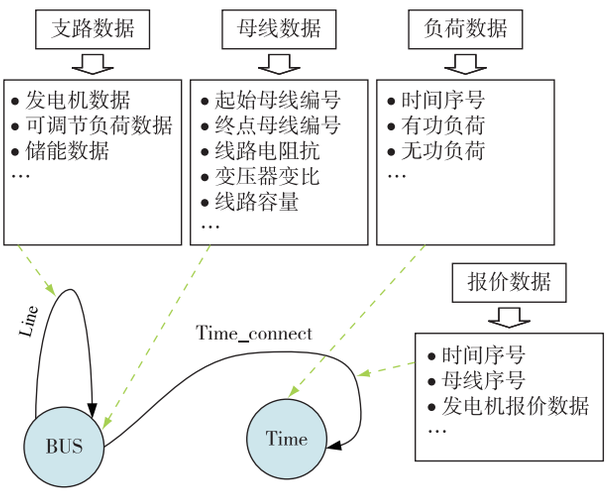

图 1　电力系统图数据模型

Fig. 1　Graph data model of power system

度模型以经济成本为目标函数,依据各类资源特性构建约束条件.

2.1.1　目标函数

日内优化调度旨在实现调度周期内各种可调节资源发电成本的最小化.

$$\min f=\sum_{t=1}^{T}\Big(\sum_{i=1}^{N_{\text{coal}}}C_{\text{coal},i}(P_{\text{coal},i,t})+\sum_{i=1}^{N_{\text{ESS}}}C_{\text{ESS},i}(P_{\text{ESS},i,t})+\sum_{i=1}^{N_{\text{PL}}}C_{\text{PL}}(\Delta P_{\text{L},i,t})\Big),\tag{1}$$

式中:i 为机组编号;T 为仿真总时段数,此处为 24;t 为时间段编号;N_{coal} 为火电机组数量;$C_{\text{coal},i}(*)$ 为火电机组 i 的发电成本函数;$P_{\text{coal},i,t}$ 为火电机组 i 在时间段 t 的有功出力值;N_{ESS} 为储能系统数量;$C_{\text{ESS},i}(*)$ 为储能系统 i 的发电成本函数;$P_{\text{ESS},i,t}$ 为储能系统 i 在时间段 t 的有功出力值;N_{PL} 为可调节负荷数;$C_{\text{PL}}(*)$ 为需求侧响应的成本函数;$\Delta P_{\text{L},i,t}$ 为需求侧负荷相应调整的负荷量.各种灵活性资源的发电成本函数如下:

$$C_{\text{coal},i}=\sum_{l=1}^{N_{\text{coal,BID}}}C_{\text{coal},i,l}\times P_{\text{coal},i,t,l},\tag{2}$$

$$C_{\text{ESS},i}=C_{\text{ch},i}\times P_{\text{ch},i,t}+C_{\text{dch},i}\times P_{\text{dch},i,t},\tag{3}$$

$$C_{\text{PL},i}=\sum_{l=1}^{N_{\text{PL,BID}}}C_{\text{PL},i,l}\times\Delta P_{\text{L},i,t,l}.\tag{4}$$

式中:$N_{\text{coal,BID}}$ 为机组分段个数;$C_{\text{coal},i,l}$ 为机组 i 在第 l 分段的功率报价;$P_{\text{coal},i,t,l}$ 为机组 i 在时刻 t 时第 l 分段的有功出力值;$C_{\text{ch},i}$ 为储能 i 的充电成本;$P_{\text{ch},i,t}$ 为储能 i 在时刻 t 时刻充电功率;$C_{\text{dch},i}$ 为储能 i 的放电成本;$P_{\text{dch},i,t}$ 为储能 i 在时刻 t 时第 l 段的放电功率;$N_{\text{PL,BID}}$ 为可调节负荷分段个数;$C_{\text{PL},i,l}$ 为可调节负荷 i 在第 l 分段的功率报价;$\Delta P_{\text{L},i,t,l}$ 为可调节负荷 i 在时刻 t 时第 l 分段的有功出力值.

2.1.2　约束条件

1)功率平衡约束

动态经济调度需满足每个调度时段中发电和用电的有功功率平衡.忽略系统网损,功率平衡约束如下:

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{load}}}P_{\text{demand},i,t}=\sum_{i=1}^{N_{\text{coal}}}P_{\text{coal},i,t}+\sum_{i=1}^{N_{\text{ESS}}}P_{\text{ESS},i,t}-\sum_{i=1}^{N_{\text{PL}}}\Delta P_{\text{L},i,t}.\tag{5}$$

式中:N_{load} 为负荷节点数;$P_{\text{demand},i,t}$ 为负荷 i 在时刻 t 的负荷需求.

2) 火电机组运行约束

常规火力机组应该在其上下限范围安排出力计划,如式(6) 所示:

$$P_{\text{coal},i,\min}\leqslant P_{\text{coal},i,\text{t}}\leqslant P_{\text{coal},i,\max}.\tag{6}$$

式中:$P_{\text{coal},i,\min}$、$P_{\text{coal},i,\max}$ 分别为火电机组 i 出力的下限和上限.

相邻时段的火电机组出力还应使爬坡约束成立,如式(7) 所示:

$$\begin{cases}-R_{\text{down,coal},i}\leqslant P_{\text{coal},i,t}-P_{\text{coal},i,(t-1)},\\ P_{\text{coal},i,t}-P_{\text{coal},i,(t-1)}\leqslant R_{\text{up,coal},i}.\end{cases}\tag{7}$$

式中:$P_{\text{coal},i,t}$ 为火电机组 i 在 t 时刻的有功出力值;$R_{\text{down,coal},i}$ 为火电机组 i 在时刻 t 的向下爬坡限值;$R_{\text{up,coal},i}$ 为火电机组 i 在时刻 t 的向上爬坡限值.

机组的出力应处于其最大/最小范围内,其中,火电机组分段出力约束如式(8) 所示:

$$P_{\text{coal},i,l,\min}\leqslant P_{\text{coal},i,l,t}\leqslant P_{\text{coal},i,l,\max}.\tag{8}$$

式中:$P_{\text{coal},i,l,\min}$、$P_{\text{coal},i,l,\max}$ 分别为发电机组 i 在机组分段 l 处机组出力的最小值、最大值;$P_{\text{coal},i,t}=\sum_{l=1}^{10}P_{\text{coal},i,l,t}$,即发电机的输出功率为各分段输出功率之和,由于分段出力价格 $p_{\text{coal},i,l+1}>p_{\text{coal},i,l}$,故 $P_{\text{coal},i,l,t}<P_{\text{coal},i,l,\max}$ 时,$P_{\text{coal},i,l+1,t}=0$ 恒成立,无需额外进行约束,可调节负荷分段出力同理.

3) 储能运行约束

此系统考虑配置电池储能装置,储能的荷电状态如式(9) 所示:

$$S_{\text{E},i,(t+1)}=S_{\text{E},i,t}+\left(\eta_{\text{ch},i}P_{\text{ch},i,t}-\frac{P_{\text{dch},i,t}}{\eta_{\text{dch},i}}\right)\Delta t.\tag{9}$$

式中:$S_{\text{E},i,t}$ 为储能 i 在时刻 t 的能量;$\eta_{\text{ch},i}$、$\eta_{\text{dch},i}$ 分别为储能 i 的充电效率、放电效率.

为延长储能设备的循环使用寿命,应将电池的

能量控制在合理范围内:

$$n_1 S_{\mathrm{E},i,\max} \leqslant S_{\mathrm{E},i,t} \leqslant n_2 S_{\mathrm{E},i,\max}. \tag{10}$$

式中:$S_{\mathrm{E},i,\max}$ 为储能 i 的最大有效容量;n_1、n_2 分别为电池允许的能量上下限比例,此处分别取 0.2、0.8.

储能充放电行为还应满足上下限约束:

$$\begin{cases} 0 \leqslant P_{\mathrm{ch},i,t} \leqslant P_{\mathrm{ch},i,\max}, \\ 0 \leqslant P_{\mathrm{dch},i,t} \leqslant P_{\mathrm{dch},i,\max}. \end{cases} \tag{11}$$

式中:$P_{\mathrm{ch},i,\max}$、$P_{\mathrm{dch},i,\max}$ 分别为储能 i 的最大允许充放电功率.由式(3)可知,储能同时充电放电将增加老化成本,优化模型天然满足 $P_{\mathrm{ch},i,t} \times P_{\mathrm{dch},i,t} = 0$ 的约束.

4)可调节负荷约束

采用激励型负荷,考虑用相关优惠政策来激励用户响应调度信号,设定其激励性负荷响应时长为 15 min ~ 2 h.可调节负荷在运行过程中应满足其负荷需求上下限约束:

$$P_{\mathrm{L},i,\min} \leqslant P_{\mathrm{L},i,t} \leqslant P_{\mathrm{L},i,\max}. \tag{12}$$

式中:$P_{\mathrm{L},i,\min}$、$P_{\mathrm{L},i,\max}$ 分别为可调节负荷需求下限及上限.

可调节负荷在运行过程中应满足可调节负荷分段调节能力上下限约束:

$$\Delta P_{\mathrm{L},i,l,\min} \leqslant \Delta P_{\mathrm{L},i,l,t} \leqslant \Delta P_{\mathrm{L},i,l,\max}. \tag{13}$$

式中:$\Delta P_{\mathrm{L},i,l,\min}$、$\Delta P_{\mathrm{L},i,l,\max}$ 分别为可调节负荷 i 在调节能力分段 l 的调节能力下限和上限;$P_{\mathrm{L},i,t} = \sum_{l=1}^{3} \Delta P_{\mathrm{L},i,l,t}$,即负荷调节能力为可调节负荷分段调节能力之和.

5)线路越限约束

为保证线路安全运行,其传输功率不应超过线路限值:

$$P_{l,\min} \leqslant P_{l,t} \leqslant P_{l,\max}. \tag{14}$$

式中:$P_{l,\min}$、$P_{l,\max}$ 分别为线路 l 的潮流下限和上限;$P_{l,t}$ 为线路 l 在时刻 t 的潮流.

依据直流潮流模型推断 $P_{l,t} = \sum_{i=1}^{N} F_{l-i}(P_{\mathrm{coal},i,t} + P_{\mathrm{ESS},i,t} - P_{\mathrm{demand},i,t} + \Delta P_{\mathrm{L},i,t})$,其中,$F$ 为功率转移分布因子,表示为

$$F_{l-i} = \frac{\Delta P_l}{\Delta P_{\mathrm{G},i}} = \frac{X_{mi} - X_{ni}}{x_l}. \tag{15}$$

式中:F_{l-i} 为 F 第 l 行、第 i 列的值;ΔP_l 为支路 l 有功潮流变化量;$\Delta P_{\mathrm{G},i}$ 为节点 i 发电机有功出力变化量;m 和 n 分别是支路 l 的首末节点;X_{mi} 和 X_{ni} 分别是电抗矩阵中第 m 行 i 列和第 n 行 i 列元素;x_l 是支路 l 的电抗.

2.2 基于图潮流计算的模型求解方法

基于图潮流计算的日内调度优化模型主要包括优化调度求解和图交流潮流校验两部分.源网荷储日内调度模型求解过程如下:

1)在图数据库定义相应的顶点和边,包括拓扑顶点、时间顶点以及相连接边,并定义顶点和边所包含的属性;

2)建立电力系统图拓扑模型,并将数据加载进行图数据库中;

3)对电力系统中源网荷储资源进行建模,并建立无线路约束的源网荷储优化调度模型;

4)求解优化模型,利用图计算对计算结果进行交流潮流计算,检查线路潮流的越限情况;

5)若存在越限情况,则添加相应的越限线路安全约束,重复步骤 2),若无线路越限情况,则输出计算结果.

具体策略流程如图 2 所示.

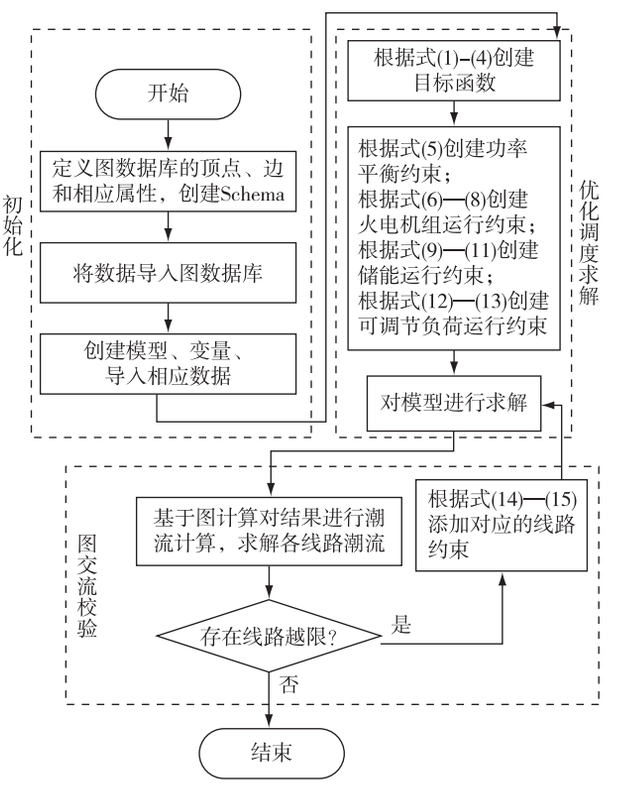

图 2 源网荷储日内优化调度模型求解过程

Fig. 2 Processes of solving the optimal scheduling model for generation-grid-load-storage

优化调度求解利用图数据建立模型,将调度问题转化为线性优化问题.其中,基于直流潮流计算过程利用功率转移因子快速估算线路的潮流,代入约

束中.图交流潮流求解利用图并行计算能力,进行系统潮流快速求解,检查潮流越限情况,并反馈给优化调度求解部分.

3 基于图计算的潮流计算

图计算能够解决传统计算模式下关联查询效率低、成本高的问题,并且具有丰富、高效和敏捷的数据分析能力.图计算可以分为图基本计算、图节点并行计算和图分层并行计算.图节点并行计算是指图中每个节点的计算相互独立、互不依赖,可以并行进行.图分层并行计算是指将图中的节点按计算相关性进行分层,排序较高的层的节点的计算依赖于排序较低的层的节点的计算,但同一层的节点的计算相互独立,可以并行进行[25].

图节点并行计算遵循整体同步并行模式,整个计算过程由若干超级步组成,系统从一个"超级步"迈向下一个"超级步".并行计算过程中,每个节点都可以修改自身以及关联边的状态,接收前一个超级步发送给他的消息,无向边两节点互相传递信息,有向边沿方向单独传递信息.进行判断后,将计算结果或信息发送给其他节点,这些信息会在下一个超级步中被目标节点接收.图模型中,每个节点仅与相邻的少数节点相连,极短时间内就可以遍历所有节点.节点并行计算过程如下:

1)所有节点都处于活跃状态,接收沿边传递过来的消息.

2)对信息进行判断、计算,符合条件的节点状态设置为停滞状态,不继续传递消息,除非该节点接收到其他节点传递的消息,否则不再执行该节点的计算;另外的节点设置为活跃状态,继续传递消息.

3)重复第二步,直至所有节点达到停滞状态,结束计算.

基于图计算的牛顿潮流算法采用图节点并行计算.与修正方程求解相关部分在计算过程中变量的计算与矩阵中元素的排列位置有关,需要遵循一定的计算次序,不采用图节点并行计算;其余计算部分包括修正方程形成、母线净注入功率计算、母线电压幅值相角修正、ΔP、ΔQ 收敛性判断等,每个计算母线的相应计算与其他母线无关,完全可以同时进行独立计算.

基于图数据库查询的牛顿潮流算法的计算步骤如下:

1) 母线电压初始化,基于图节点并行算法,计算残差 ΔP、ΔQ:

$$\Delta P_i = (P_{G,i} - P_{D,i}) - \sum_{j\in i} V_i V_j (G_{ij}\sin\theta_{ij} + B_{ij}\cos\theta_{ij}), i = 1,2,\cdots,n, \tag{16}$$

$$\Delta Q_i = (Q_{G,i} - Q_{D,i}) - \sum_{j\in i} V_i V_j (G_{ij}\cos\theta_{ij} - B_{ij}\sin\theta_{ij}), i = 1,2,\cdots,n. \tag{17}$$

2)基于图节点并行算法,测试 ΔP、ΔQ 是否达到收敛标准 ε, 达到判为收敛,否则转 4).

3)依据母线-支路图,计算雅可比矩阵元素,进行因子表分解.

4)计算修正向量 $\Delta\theta$、ΔV:

$$\begin{bmatrix}\Delta P\\ \Delta Q\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\dfrac{\partial\Delta P}{\partial\theta} & \dfrac{\partial\Delta P}{\partial V}\\ \dfrac{\partial\Delta Q}{\partial\theta} & \dfrac{\partial\Delta Q}{\partial V}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\theta\\ \Delta V\end{bmatrix}. \tag{18}$$

5)基于图节点并行算法,进一步修正迭代值,并进行步骤 2),继续迭代.

利用潮流计算检验日内调度优化调度结果是否满足系统运行要求,判断是否存在线路功率或节点电压越限情况.对于越限的支路和节点,利用灵敏度因子转换成式(14)描述的约束条件,再重新进行优化求解,如图 2 所示.

4 算例分析

为了验证基于图计算的源网荷储协同优化日内调度模型的性能,本文选取 IEEE118 和 IEEE1354 节点系统作为算例,并在系统中添加可调节负荷节点和储能节点的改进模型进行验证分析.IEEE118 节点系统包含 54 台同步发电机、10 个可调节负荷、7 个储能单元,系统基准功率 100 MW;IEEE1354 系统中包含 247 台同步发电机、20 个可调节负荷和 16 个储能单元,系统基准功率 100 MW.

利用 Tigergraph 建立图数据库,IEEE118 节点电力系统图模型中包括 118 个 BUS 节点、24 个 Time 节点、171 条 Line 边以及 4 104 条 Time_connect 边;IEEE1354 节点电力系统图模型中包括 1354 个 BUS 节点、24 个 Time 节点、3 420 条 Line 边以及 32 496 条 Time_connect 边.其中,相连 BUS 节点之间会存在两条 Line 边,两条 Line 边中线路方向属性的信息不一致,利用 1、-1 分别表示 Line 边的正反方向,其余的阻抗、长度、线路类型等属性信息相同

利用 GSQL 语言编写日内调度程序,采用商业求解器进行优化求解,编写潮流计算程序检验节点电压和线路潮流是否越限.优化调度策略如图 3 所

示,系统中常规机组运行负责主要的负荷需求,受激励性电价影响,可调节负荷主动削减负荷消耗.同时,当负荷需求进一步增大时,储能系统参与系统调度,保证系统供需平衡.模型中,可调节负荷为可削减负荷,当发电机的边际成本高于可调节负荷的激励成本时,可调节负荷积极参与系统优化调度.

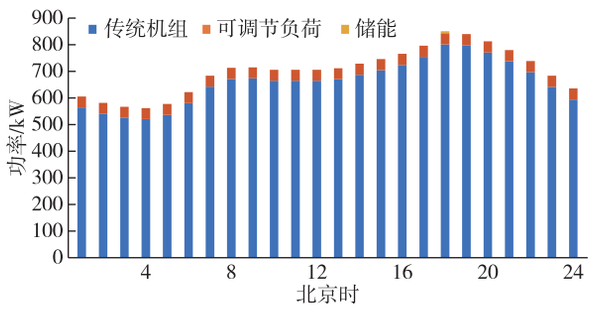

图 3　不同时刻机组出力

Fig. 3　Unit outputs at different time

为验证图计算方法对源网荷储协同控制的计算性能,分别采用图数据和关系数据验证 IEEE1354 和 IEEE118 节点系统,其结果如表 1 所示.

由表 1 可知,采用基于时空数据融合的图数据库求解模型时,模型的运算时间明显减少.基于图数据库的数据读取时间小于基于关系数据库数据的读取时间.在数据读取速度方面,IEEE1354 节点系统基于图数据库的数据读取时间较基于关系数据库的数据读取时间减少了 55%,IEEE118 节点系统数据读取时间减少了 74%.同样地,采用图数据库的核心计算时间也远小于关系数据库的核心计算时间.算例中火电机组和可调节负荷采取分段报价的形式进行计算,所以系统运行约束数量有一定增长,系统计算量增大,运算时间较长.数据存储过程中,IEEE118 节点系统基于图数据库的存储时间较基于关系数据库存储时间减少了 42%,提升效果明显.IEEE1354 节点系统在关系数据库中存储时直接保存了新的表格,并未将原有的表格进行修改,所以提升效果不明显.从结果来看,利用图计算进行优化调度有助于提高系统的运行效率.

表 1　不同数据库下运算效率及成本比较

Table 1　Comparison of operation cost and computational efficiency under different databases

节点系统	数据读入时间/s		核心计算时间/s		结果输出时间/s		运行成本/万元	
	图数据库	关系数据库	图数据库	关系数据库	图数据库	关系数据库	图数据库	关系数据库
IEEE1354	0.028	0.062	402.514	507.813	0.070	0.078	3 471.30	3 471.30
IEEE118	0.008	0.031	12.919	27.250	0.018	0.031	19.06	19.06

5　结论

为应对新型电力系统带来的计算挑战,本文提出一种基于图计算的源网荷储协同优化的日内调度模型,并进行仿真验证了如下结论:

1)以电网拓扑为基础的图建模方法能够完整、一致地表示电力系统中各种设备及网络拓扑,并能利用图数据库进行大规模电力系统时空数据一体化存储,进行快速检索、修改、存储.

2)计算交流潮流采用图并行计算,适应源网荷储协同的日内调度优化计算,提高求解效率.

3)源网荷储协同调度能够充分调度系统中可调节资源,具有良好的经济性.

参考文献

References

[1] 周安平,杨明,翟鹤峰,等.计及风电功率矩不确定性的分布鲁棒实时调度方法[J].中国电机工程学报,2018,38(20):5937-5946
ZHOU Anping, YANG Ming, ZHAI Hefeng, et al. Distributionally robust real-time dispatch considering moment uncertainty of wind generation [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(20): 5937-5946

[2] Zhong J, Li K J, Sun K Q, et al. Source-load-storage coordinated optimization dispatch for distribution networks considering source-load uncertainties [C]//2022 4th Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES). March 25-28, 2022, Chengdu, China. IEEE, 2022: 819-824

[3] Alsac O, Stott B. Optimal load flow with steady-state security[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1974, PAS-93(3): 745-751

[4] 张晓辉,董兴华.含风电场多目标低碳电力系统动态经济调度研究[J].电网技术,2013,37(1):24-31
ZHANG Xiaohui, DONG Xinghua. Research on multi-objective scheduling for low-carbon power system with wind farms[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 24-31

[5] 胡永强,刘晨亮,赵书强,等.基于模糊相关机会规划的储能优化控制[J].电力系统自动化,2014,38(6):20-25
HU Yongqiang, LIU Chenliang, ZHAO Shuqiang, et al. Optimal control of energy storage based on fuzzy correlated-chance programming [J]. Automation of Electric

Power Systems,2014,38(6):20-25
[6] 陈刚,杨毅,杨晓梅,等.基于分布式牛顿法的微电网群分布式优化调度方法[J].电力系统自动化,2017,41(21):156-162
CHEN Gang,YANG Yi,YANG Xiaomei,et al.Distributed optimization scheduling method for microgrid cluster based on distributed Newton method[J].Automation of Electric Power Systems,2017,41(21):156-162
[7] 朱涛,陈嘉俊,段秦刚,等.基于近似动态规划的工业园区源-网-荷-储联合运行在线优化算法[J].电网技术,2020,44(10):3744-3752
ZHU Tao, CHEN Jiajun, DUAN Qingang, et al. Approximate dynamic programming-based online algorithm for combination operation of source-network-load-storage in the industrial park[J]. Power System Technology,2020,44(10):3744-3752
[8] Yuan X H,Su A J,Yuan Y B,et al.An improved PSO for dynamic load dispatch of generators with valve-point effects[J].Energy,2009,34(1):67-74
[9] Li F,Morgan R,Williams D.Hybrid genetic approaches to ramping rate constrained dynamic economic dispatch[J].Electric Power Systems Research,1997,43(2):97-103
[10] 孙元章,吴俊,李国杰,等.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 Guojie,et al.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
[11] 高亚静,李瑞环,梁海峰,等.考虑间歇性电源与负荷不确定性情况下基于多场景技术的主动配电系统两步优化调度[J].中国电机工程学报,2015,35(7):1657-1665
GAO Yajing,LI Ruihuan,LIANG Haifeng,et al.Two step optimal dispatch based on multiple scenarios technique considering uncertainties of intermittent distributed generations and loads in the active distribution system[J].Proceedings of the CSEE,2015,35(7):1657-1665
[12] 罗金满,刘丽媛,刘飘,等.考虑源网荷储协调的主动配电网优化调度方法研究[J].电力系统保护与控制,2022,50(1):167-173
LUO Jinman, LIU Liyuan, LIU Piao, et al. An optimal scheduling method for active distribution network considering source network load storage coordination[J].Power System Protection and Control,2022,50(1):167-173
[13] 石蓉,王雪妍,陆鑫,等.基于改进聚类算法的清洁能源互联网源网荷储协调控制研究[J].电网与清洁能源,2023,39(7):134-139,146
SHI Rong,WANG Xueyan,LU Xin,et al.A study on the load and storage coordination control of clean energy internet source network based on improved clustering algorithm[J].Power System and Clean Energy,2023,39(7):134-139,146
[14] 黄慧,李永刚,刘华志.基于改进 Nash-Q 均衡迁移算法的源网荷储协同优化策略[J].电力自动化设备,2023,43(8):71-77,104
HUANG Hui,LI Yonggang,LIU Huazhi.Collaborative optimization strategy of source-grid-load-energy storage based on improved Nash-Q equilibrium transfer algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(8):71-77,104
[15] 孙长平,刘瑞阔,张玮,等.区域源网荷储一体化调控管理模式[J].电力大数据,2023,26(9):86-92
SUN Changping, LIU Ruikuo, ZHANG Wei, et al. Integrated control and management model of regional generation, grid, load, and storage[J]. Power Systems and Big Data,2023,26(9):86-92
[16] 张志浩,孙保华,韩韬,等.基于图数据库的配电网供电范围分析应用研究[J].机电信息,2023(3):1-5
ZHANG Zhihao,SUN Baohua,HAN Tao,et al.Research and application of power supply range analysis of distribution network based on graph database[J].Mechanical and Electrical Information,2023(3):1-5
[17] 刘克文,张国芳,袁琛,等.基于图计算的快速非线性迭代法求解潮流计算[J].电力信息与通信技术,2018,16(10):19-24
LIU Kewen, ZHANG Guofang, YUAN Chen, et al. Fast nonlinear iterative method based on graph calculation for power flow calculation[J].Electric Power Information and Communication Technology,2018,16(10):19-24
[18] 张显,汤亚宸,李达,等.考虑绿电交易的电力碳排放定量测算[J].电网技术,2024,48(5):1957-1966
ZHANG Xian, TANG Yachen, LI Da, et al. Carbon emission evaluation for green power transaction[J].Power System Technology,2024,48(5):1957-1966
[19] 刘广一,王继业,李洋,等."电网一张图"时空信息管理系统[J].电力信息与通信技术,2020,18(1):7-17
LIU Guangyi,WANG Jiye,LI Yang,et al."One graph of power grid" spatio-temporal information management system[J].Electric Power Information and Communication Technology,2020,18(1):7-17
[20] Liu G Y,Liu K W,Shi D,et al.Graph computation and its applications in smart grid[C]//2017 IEEE International Congress on Big Data (BigData Congress).June 25-30,2017,Honolulu,HI,USA.IEEE,2017:507-510
[21] 刘广一,戴仁昶,路轶,等.电力图计算平台及其在能源互联网中的应用[J].电网技术,2021,45(6):2051-2063
LIU Guangyi,DAI Renchang,LU Yi,et al.Electric power graph computing platform and its application in energy Internet[J].Power System Technology,2021,45(6):2051-2063
[22] 韩赫,张沛超,柴博,等.基于图计算的区域热电系统建模与运行优化方法[J].中国电机工程学报,2022,42(19):7113-7126
HAN He,ZHANG Peichao,CHAI Bo,et al.Modeling and operational optimization methods for district heat-electricity systems based on graph computing[J].Proceedings of the CSEE,2022,42(19):7113-7126
[23] 马智刚,卫志农,陈胜,等.基于图计算的交直流混合配电网优化调度[J].电力系统自动化,2023,47(18):161-170
MA Zhigang,WEI Zhinong,CHEN Sheng,et al.Optimal dispatch of AC/DC hybrid distribution network based on graph computing[J].Automation of Electric Power Systems,2023,47(18):161-170

[24] 崔丽,王占国,吴奕.基于 CIM/E 的电网模型解析[J].计算机系统应用,2018,27(1):168-173
CUI Li,WANG Zhanguo,WU Yi.Analysis of power grid-model based on CIM/E[J].Computer Systems & Applications,2018,27(1):168-173
[25] 刘广一,戴仁昶,路轶,等.基于图计算的能量管理系统实时网络分析应用研发[J].电工技术学报,2020,35(11):2339-2348
LIU Guangyi,DAI Renchang,LU Yi,et al.Graph computing based power network analysis applications[J].Transactions of China Electrotechnical Society,2020,35(11):2339-2348

Intra-day scheduling computing of coordinated generation-grid-load-storage based on graph database and graph computing

WANG Zhenyi[1] GAO Daochun[1] MO Xi[1] GE Benxing[1] LU Xuegang[1]
QIE Jingbiao[2] XIE Hua[2] ZHANG Pei[2,3]

1 Yunnan Electric Power Dispatching Control Center,China Southern Power Grid Company Limited,Kunming 650000,China
2 School of Electrical Engineering,Beijing Jiaotong University,Beijing 100044,China
3 College of Electrical Automation and Information Engineering,Tianjin University,Tianjin 300072,China

Abstract The new power system requires cooperative and optimized scheduling in the integration of Generation-Grid-Load-Storage (GGLS).At present,the scheduling automation system employs a relational database that relies on multiple associated tables for data query and storage,making it difficult to meet the rapid computation demands. Here,we propose a graph-based computing method for intra-day scheduling of coordinated GGLS.Firstly,the graph database is used to integrate the spatiotemporal data from power generation,grid,loads,and storage.Secondly,a comprehensive optimization model of intra-day scheduling of coordinated GGLS is formulated,taking into account various resources such as thermal power units,adjustable loads,and energy storage.Thirdly,a graph-based power flow calculation approach is proposed to quickly perform system security checks.Finally,based on the security check results,the system operating status is corrected until all operational constraints are satisfied.Through analysis of improved examples on the IEEE118-node and IEEE1354-node systems,it is verified that the proposed coordinated optimization strategy for GGLS can improve computational efficiency.

Key words graph computing;spatiotemporal data fusion;generation-grid-load-storage (GGLS) coordination;intra-day scheduling