

考虑资源共享的区域互联系统分布式调度

雷翌,刘继春,魏平校,季陈林,杨晶显,蒋万泉,卢炳文

(四川大学电气工程学院,四川成都610065)

摘要:随着风电的大量接入,传统的联络线交易模式将会导致严重的弃风现象,因此提出了一种基于发电资源和备用资源共享的分布式协调调度方法。首先通过联络线电力曲线可调和备用互济的方式来促进风电的消纳,进一步实现各区域发电资源的有效利用;然后以备用互联的方式来平抑源荷不确定性导致的预测误差;最后建立基于联络线功率和备用交互的分布式调度模型,求解出各区域的发电计划。算例分析以3区117节点系统为研究对象进行实验,验证了该方法的有效性和经济性。

关键词:备用互济;联络线;新能源消纳;分布式调度

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd22341

Distributed Scheduling of Regional Interconnection Systems Considering Resource Sharing

LEI Yi, LIU Jichun, WEI Pingan, JI Chenlin, YANG Jingxian, JIANG Wanxiao, LU Bingwen

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: With the large-scale access of wind power, the traditional tie-line transaction mode will lead to serious wind abandonment. Therefore, a distributed coordinated dispatch method based on the sharing of power generation resources and reserve resources was proposed. First of all, through the adjustment of the power curve of the tie-line and the reserve mutual aid, the consumption of wind power was promoted, and the effective use of the power generation resources of the regional distribution points was further realized. Then, a backup interconnection method was used to smooth out the prediction error caused by the uncertainty of the source and load. Finally, a distributed dispatch model based on the interaction of tie-line power and reserve was established to solve the power generation plan of each region. The calculation example analysis took the 3-zone 117-node system as the research object to conduct experiments, which verified the effectiveness and economy of the method.

Key words: reserve mutual aid; tie-line; new energy consumption; distributed dispatch

由于传统能源的匮乏和环境污染问题,风能等新能源作为环境友好型资源逐渐兴起,但风电出力极不稳定,易受风速等环境因素的影响,出力难以预测。大量的风电接入电网后,将对电网的稳定运行带来极大的挑战,因此在调度决策中一定要考虑出力的不确定性。同时由于我国风电与负荷在空间上分布的极不均衡,风电往往无法就地消纳,需要通过远距离外送才能解决该问题。并且风电在空间分布上呈现一定的互补特性,通过多区域的协调能够有效降低风电出力的波动性,不同地区的负荷之间也存在显著的互补

特性,多区互补的运行模式能够充分利用各区资源,实现电力资源的合理优化配置,从而促进风电的消纳。文献[1-2]以机组组合的方式来等效联络线电力曲线的优化过程,建立了联络线精细化模型;文献[3]采用单边最优、多边协调的方式制定联络线交易计划;文献[4]以日交易计划、峰谷差等约束来优化联络线电力曲线。但上述文献都侧重于联络线传输曲线的优化方案,未考虑到新能源的波动性问题。

为了应对新能源的随机波动,在调度决策中通常会配置一定的备用容量。文献[5]建立了基

基金项目:国家重点研发计划资助(分布式光伏与梯级小水电互补联合发电技术研究及应用示范)(2018YFB0905200)

作者简介:雷翌(1996—),男,硕士,Email:Leiyi00L@163.com

通讯作者:刘继春(1975—),男,教授,博士生导师,Email:jichunliu@scu.edu.cn

于成本效益法的旋转备用优化模型;文献[6-7]通过量化备用容量与可靠性指标之间的关系来建立系统经济优化模型,但可靠性评估指标大多为失负荷率、失负荷期望等。对于不确定性优化问题的处理,目前主要有场景法^[8]、鲁棒优化^[9-11]、机会约束^[12-13]等方法。由于场景法在求解过程中需要处理大量数据,求解速度缓慢,而鲁棒优化则是在最坏的场景下做出的最优决策,决策结果有失经济性。因此基于机会约束的优化方法近年来得到了大量应用。

上述考虑的随机优化问题均是在集中式调度的背景下进行的,调度中心需要搜集全网的数据,并对系统内所有的机组下达调度计划。但随着电网规模的不断扩大和电力市场的兴起,传统的集中式优化面临如下几个问题:1)调度中心收集的数据过于庞大,信息通道容易受阻并且信息的准确度难以保障;2)区域电力市场需要隐私保护,上传给上级调度中心容易造成隐私泄露;3)各区域独立调度符合我国分层分区的调度模式,本地区的调度方案应由该区域独自决策。

因此采用分布式的调度方法来解决随机优化问题符合电力系统发展的需要。目前已有大量文献致力于分布式调度方法的研究。文献[14-15]构建了上层协调器,采用目标级联分析法对主问题和子问题进行交替求解,但本质上仍需要一个上级协调中心;文献[16]提出了基于需求响应虚拟电厂的分布式经济调度模型,并通过交替方向乘子法(alternating direction method of multipliers, ADMM)建立计算框架,但并未考虑不确定性问题;文献[17]建立了考虑机组组合和线路传输损耗的两阶段分布式调度模型;文献[18]提出了基于源网荷互动的分布式协同优化策略;文献[19]考虑需求响应,建立了基于共识匹配的分布式协调调度模型。但上述文献都未考虑到区域间备用的支援。可以看出,ADMM在分布式计算问题中被广泛采用,该方法整合了乘子法的收敛性和对偶上升的可分解性,具有收敛性好、鲁棒性强、且不要求优化模型严格凸和有限的特点,已成为求解电力系统分布式优化问题的重要方法。

本文致力于研究考虑资源共享的区域互联系统分布式调度方法。首先通过联络线在日交易计划受限的前提下优化联络线电力曲线,使

得联络线电力曲线在各时段灵活可调,促进风电的消纳。然后以备用互联的方式进行低成本备用资源的共享,提高互联系统运行的可靠性以及经济性。最后以ADMM为迭代框架建立区域互联系统分布式调度模型,采用3区117节点互联系统进行算例仿真,验证该方法的正确性和有效性。

1 多区域互联系统调度模式

图1为3区互联电网系统运行简易示意图。每个区域由常规机组和风电机组组成,其中A区和C区为多风电地区,B区为少风电地区。

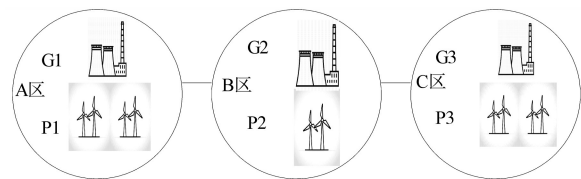


图1 多区互联系统运行示意图

Fig.1 Schematic diagram of multi-zone interconnection system operation

1.1 传统调度模式

在传统的调度模式下,三个区域统一由上级调度中心制定联络线功率传输计划。将这部分调度结果传达给A,B,C各区调度机构,子区域调度机构再按照这部分数据来制定本区域内部的发电计划。这种分层分区的调度方法导致了本地区的风电波动只能由本地区的常规机组来平衡。显然,对于接入大量新能源机组的地区需要更多的备用容量来平衡波动性,不能保证系统运行的经济性。

1.2 集中式调度模式

在该模式下,所有的区域都将由上级调度中心统一制定调度计划,联络线成为了系统内部线路,其功率可以在自身约束范围内自由变动。

这种集中式的调度方式可以有效利用发电资源P1,P2,P3的互补效应,使出力曲线平滑稳定,还能进一步减少调峰需求。但这一模式与我国电网“统一调度,分级管理”的原则相冲突,实际使用受到限制,当所管辖区域数量过多、面积过大时将面临搜集数据的准确性问题。在这种模式下,容易造成数据泄露的风险,阻碍了各区域的公平竞争。

1.3 基于联络线传输计划的分布式调度模式

文献[4]提出一种联络线受限优化的调度模式。该模式是指在满足跨区联络线日交易计划

的前提下,考虑联络线运行约束,使联络线功率在可调范围内变化,以此来促进区域间发电资源的协调利用,使新能源在更大空间上被消纳。

综上可知,传统调度模式不能最大化利用全网资源,集中式调度模式由于电网分层分区以及电网规模不断扩大的特点导致其实际使用受限。因此提出一种考虑互联电网资源共享的分布式调度方法。在日前调度决策中充分协调各区资源,以ADMM为框架执行分布式计算,使各区域独立制定调度计划。此外,考虑到源荷不确定性问题,通过各区域备用互济的手段,采用区域备用互联的方式最大化利用资源以节约成本,提高全网运行的经济性、可靠性。

2 考虑资源共享的分布式调度模型

2.1 考虑资源共享的集中式调度模型

对于多区互联系统,为了充分协调利用各区资源,基于联络线受限约束的运行模式,考虑源荷不确定性问题,以系统运行成本最小为目标建立考虑资源共享的集中式调度模型。其中第一项为常规机组运行成本,第二项为启停机成本,第三项为备用成本,第四项为风电运行成本,第五项为弃风成本,第六项为储能成本,如下式所示:

$$\min f = \sum_{t=1}^T [\sum_{i=1}^{N_h} f_h(p_{i,t}^h) + \sum_{i=1}^{N_u} f_{ud}(U_{i,t} + D_{i,t}) + \sum_{i=1}^{N_k} f_r(p_{i,t}^r) + \sum_{j=1}^{N_w} f_w(p_{j,t}^w) + \sum_{j=1}^{N_a} f_a(p_{j,t}^a) + \sum_{k=1}^{N_c} f_c(p_{k,t}^{bc} + p_{k,t}^{bd})] \quad (1)$$

$$f_h(p_{i,t}^h) = a_i (p_{i,t}^h)^2 + b_i p_{i,t}^h + c_i \quad (2)$$

$$f_{ud}(U_{i,t} + D_{i,t}) = c_i^{uu} U_{i,t} + c_i^{ud} D_{i,t} \quad (3)$$

$$f_r(p_{i,t}^r) = c_i^r p_{i,t}^r \quad (4)$$

$$\begin{cases} f_w(p_{j,t}^w) = c_{j,t}^w p_{j,t}^w \\ f_a(p_{j,t}^a) = c_a (p_{j,t}^{wmax} - p_{j,t}^w) \end{cases} \quad (5)$$

$$f_c(p_{k,t}^{bc} + p_{k,t}^{bd}) = c_k (p_{k,t}^{bc} + p_{k,t}^{bd}) \quad (6)$$

式中: t 为调度时段,取 $t=1 \cdots 24$; N_h, N_w, N_k 分别为常规机组、风电机组、储能设备的数量; $p_{i,t}^h, p_{i,t}^r, p_{j,t}^w, p_{k,t}^{bc}, p_{k,t}^{bd}$ 分别为常规机组 i 在 t 时段的出力、备用容量,风电机组 j 在 t 时段的出力,储能设备 k 在 t 时段的充、放电量; $U_{i,t}$ 为常规机组 i 的开机变量,为1时表示开机,为0时表示停机; $D_{i,t}$ 为常规机组的停机变量,为1时表示停机,为0时表示开机; $p_{j,t}^{wmax}$ 为风电机组 j 在 t 时段的出力上限; a_i, b_i, c_i 分别为常规机组 i 的二次项、一次项、常数项成本系数;

$c_{i,t}^r, c_i^{uu}, c_i^{ud}$ 分别为常规机组 i 在第 t 时段的备用成本和开停机成本系数; $c_{j,t}^w$ 为风电机组 j 在 t 时段的弃风成本系数; c_a 为风电机组 j 的弃风成本系数; c_k^c 为储能设备 k 的运行成本系数。

以下为约束条件。

功率平衡约束:

$$\sum_{i=1}^{N_h} p_{i,t}^h + \sum_{j=1}^{N_w} p_{j,t}^w + \sum_{k=1}^{N_k} p_{k,t}^{bd} = \sum_{m=1}^{N_m} p_{m,t}^L + \sum_{k=1}^{N_k} p_{k,t}^{bc} + \sum_{l \in \Omega^A} p_l^A \quad (7)$$

式中: $p_{m,t}^L$ 为负荷 m 在 t 时段的功率; Ω^A 为与A区域相邻的区域集合; p_l^A 为A区域与周围区域交换的联络线功率,方向以指向A为正。

常规机组约束:

$$U_{i,t} p_i^{hmin} \leq p_{i,t}^h \leq U_{i,t} p_i^{hmax} \quad (8)$$

$$\begin{cases} p_{i,t}^h - p_{i,t-1}^h \leq U_{i,t} p_i^{hmin} + [1 - U_{i,t}] R_i^{up} \\ p_{i,t-1}^h - p_{i,t}^h \leq D_{i,t} p_i^{hmin} + [1 - D_{i,t}] R_i^{down} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} U_{i,t} + D_{i,t} \leq 1 \\ U_{i,t} - D_{i,t} = u_{i,t} - u_{i,t-1} \end{cases} \quad (10)$$

式中, $u_{i,t}$ 为与机组组合相关的二进制变量; R_i^{up}, R_i^{down} 分别为第 i 台常规机组上、下坡率; p_i^{hmin}, p_i^{hmax} 分别为第 i 台常规机组的出力上、下限。

式(8)为常规机组出力上下限约束,式(9)为常规机组上下爬坡约束,式(10)为常规机组启停机转换约束。

常规机组最小开停机约束表达式见文献[20]。

常规机组备用容量约束:

$$p_{i,t}^r + p_{i,t}^h \leq p_i^{hmax} \quad (11)$$

$$0 \leq p_{i,t}^r \leq R_i^{up} t_1 \quad (12)$$

$$p_i \{ \sum_{i=1}^{N_i} p_{i,t}^r \geq \xi^w + \xi^L \} \geq \alpha \quad (13)$$

式中: t_1 为机组 i 的爬坡时间,取 $t_1=15 \text{ min}$; $p_i \{ \}$ 为概率函数; α 为子区域可靠性要求。

风电机组约束:

$$p_j^{wmin} \leq p_{j,t}^w \leq p_j^{wmax} \quad (14)$$

式中: p_j^{wmin}, p_j^{wmax} 分别为风电机组 j 最小和最大出力。

区域内部潮流约束:

$$-F_l \leq \sum_n G_{ln} (\sum_i I_{ni}^1 p_{i,t}^h + \sum_j I_{nj}^2 p_{j,t}^w + \sum_k I_{nk}^3 (p_{k,t}^{bd} - p_{k,t}^{bc}) + \sum_m I_{nm}^4 p_{m,t}^L + \sum_{z \in \Omega^A} I_{nz}^5 p_{z,t}^A) \leq F_l \quad (15)$$

式中: F_l 为线路最大传输容量; G_{ln} 为节点 n 对线路 l 的功率转移分布因子; $I_{ni}^1, I_{nj}^2, I_{nk}^3, I_{nm}^4, I_{nz}^5$ 分别为常规机组 i ,风电机组 j ,储能 k ,负荷节点 m ,联络线节点 z 对节点 n 的关联系数。

联络线约束:

$$p^{Amin} \leq p_l^A \leq p^{Amax} \quad (16)$$

$$-\Delta p \leq p_i^{Al} - p_{i-1}^{Al} \leq \Delta p \quad (17)$$

$$\sum_{l \in \Omega^A} \sum_{t=1}^T p_t^{Al} = A^{Al} \quad (18)$$

式中: $p^{Al_{\min}}, p^{Al_{\max}}$ 分别为联络线传输功率上、下限; Δp 为联络线最大功率变化率; A^{Al} 为联络线通道一天的电力总交易总量。

式(16)为联络线功率约束,式(17)为联络线功率变化率约束,式(18)为联络线交易计划约束。

储能设备约束:

$$S_{k,\min} \leq S_{k,t} \leq S_{k,\max} \quad (19)$$

$$S_{k,t+1} = S_{k,t}(1 - \delta_k) + \frac{p_{k,t}^{bc} \eta_k^c \Delta t}{E_k} - \frac{p_{k,t}^{bd} \Delta t}{E_k \eta_k^d} \quad (20)$$

$$S_{k,0} = S_{k,T} \quad (21)$$

$$\begin{cases} p_k^{bc_{\min}} \leq p_{k,t}^{bc} \leq p_k^{bc_{\max}} \\ p_k^{bd_{\min}} \leq p_{k,t}^{bd} \leq p_k^{bd_{\max}} \end{cases} \quad (22)$$

式中: $S_{k,t}$ 为储能设备 k 在第 t 时段的 SOC 值, δ_k 为该设备的放电率; η_k^c 和 η_k^d 分别为储能设备 k 的充电和放电系数; Δt 为充放电时间间隔; E_k 为储能设备 k 的容量; $S_{k,\min}, S_{k,\max}$ 为 SOC 上、下限值; $p_k^{bc_{\min}}, p_k^{bc_{\max}}, p_k^{bd_{\min}}, p_k^{bd_{\max}}$ 分别为该储能充电最大、最小量和放电最大、最小量。

2.2 考虑资源共享的分布式调度模型

根据 ADMM 算法,建立目标函数式(1)的增广拉格朗日形式,如下式所示。

$$\begin{aligned} F = \min & \sum_{t=1}^T \left[\sum_{i=1}^{N_h} f_h(p_{i,t}^h) + \sum_{i=1}^{N_h} f_{ud}(U_{i,t} + D_{i,t}) + \sum_{i=1}^{N_h} f_r(p_{i,t}^r) + \right. \\ & \left. \sum_{j=1}^{N_w} f_w(p_{j,t}^w) + \sum_{j=1}^{N_w} f_a(p_{j,t}^a) + \sum_{k=1}^{N_k} f_e(p_{k,t}^{bc} + p_{k,t}^{bd}) \right] + \\ & \frac{\rho_{l,t}^K}{2} \|p_{i,t}^{Al} - (p_{i,t}^{Al'})^K\|_2^2 + \sum_{t=1}^T \sum_{l \in \Omega^A} (\lambda_{l,t}^A)^K [p_{i,t}^{Al} - (p_{i,t}^{Al'})^K] + \\ & \frac{\rho_{r,t}^K}{2} \|p_{i,t}^{Ar} - (p_{i,t}^{Ar'})^K\|_2^2 + \sum_{t=1}^T \sum_{l \in \Omega^A} (\lambda_{r,t}^A)^K [p_{i,t}^{Ar} - (p_{i,t}^{Ar'})^K] \end{aligned} \quad (23)$$

式中: p_i^{Ar} 为备用传输功率; $p_{i,t}^{Al'}, p_{i,t}^{Ar'}$ 分别为联络线传输功率和备用传输功率的辅助变量; $\rho_{l,t}^K, \rho_{r,t}^K, \lambda_{l,t}^A, \lambda_{r,t}^A$ 为相应的惩罚因子和拉格朗日乘子。

约束条件为式(13)、式(16)作如下变化:

$$p_i^{Al} + p_i^{Ar} \leq p^{Al_{\max}} \quad (24)$$

$$p_r \left\{ \sum_{i=1}^{N_h} p_{i,t}^r + p_i^{Ar'} \geq \xi_{w,t} + \xi_{l,t} \right\} \geq \alpha \quad (25)$$

$$\sum_{i=1}^{N_h} p_{i,t}^r + p_i^{Ar} \geq \inf \{ MN = \Phi_{w,l,t}^{-1}(\alpha) \} \quad (26)$$

$$\xi_{w,l,t} = \xi_{w,t} + \xi_{l,t} \quad (27)$$

式中: $\xi_{w,t}, \xi_{l,t}$ 分别为风电和负荷预测误差,它们是满足均值为0、方差为 $\sigma_{w,t}^2$ 和 $\sigma_{l,t}^2$ 的正态分布函数; $\xi_{w,l,t}$ 为负荷和风电联合预测误差的概率密度函数,满足均值为0、方差为 $\sigma_{w,t}^2 + \sigma_{l,t}^2$ 的正态分布函数; $\inf \{ \}$ 为下界; $\Phi_{w,l,t}$ 为随机变量 $\xi_{w,l,t}$ 的累计分布函数。

式(24)为联络线功率受限约束,式(25)为考虑区域备用互济后子区域的机会约束,式(26)将含随机变量的机会约束式(25)线性化。

$$\begin{cases} (p_{i,t}^{Al'})^{K+1} = (p_{i,t}^{Al} + p_{i,t}^{Bl})/2 \\ (p_{i,t}^{Ar'})^{K+1} = (p_{i,t}^{Ar} + p_{i,t}^{Br})/2 \end{cases} \quad (28)$$

$$\begin{cases} S_{l,t}^K = |(p_{i,t}^{Al})^{K+1} - (p_{i,t}^{Al'})^K| \leq \varepsilon_1^l \\ S_{r,t}^K = |(p_{i,t}^{Ar})^{K+1} - (p_{i,t}^{Ar'})^K| \leq \varepsilon_1^r \end{cases} \quad (29)$$

$$\begin{cases} R_{l,t}^K = |(p_{i,t}^{Al'})^{K+1} - (p_{i,t}^{Al'})^K| \leq \varepsilon_2^l \\ R_{r,t}^K = |(p_{i,t}^{Ar'})^{K+1} - (p_{i,t}^{Ar'})^K| \leq \varepsilon_2^r \end{cases} \quad (30)$$

$$\begin{cases} (\lambda_{l,t}^A)^{K+1} = (\lambda_{l,t}^A)^K + \rho_{l,t}^K [(p_{i,t}^{Al})^K - (p_{i,t}^{Al'})^{K+1}] \\ (\lambda_{r,t}^A)^{K+1} = (\lambda_{r,t}^A)^K + \rho_{r,t}^K [(p_{i,t}^{Ar})^K - (p_{i,t}^{Ar'})^{K+1}] \end{cases} \quad (31)$$

$$\rho_{l,r,t}^{K+1} = \begin{cases} \tau \times \rho_{l,r,t}^K & S_{l,r,t}^K > \mu \times R_{l,r,t}^K \\ \rho_{l,r,t}^K / \tau & R_{l,r,t}^K > \mu \times S_{l,r,t}^K \\ \rho_{l,r,t}^K & \text{其他} \end{cases} \quad (32)$$

式中: $p_i^{Al}, p_i^{Ar}, p_i^{Bl}, p_i^{Br}$ 分别为区域 A 流向周围区域的功率、备用和周围区域流向区域 A 的功率、备用; $S_{l,t}^K, S_{r,t}^K$ 为第 K 次迭代时的原始残差; $R_{l,t}^K, R_{r,t}^K$ 为第 K 次迭代时的对偶残差; $(\lambda_{l,t}^A)^K, (\lambda_{r,t}^A)^K$ 为第 K 次迭代时的拉格朗日乘子; τ, μ 为补偿系数。

各个区域独自计算区域内部的经济调度问题,通过耦合约束交换边界传输信息,由式(29)~式(32)迭代计算直至收敛得出最优结果。

模型的求解过程如下:

步骤1:初始化每个区域的相关参数,例如迭代次数 K 、辅助变量 $(p_{i,t}^{Al'})^K$ 和 $(p_{i,t}^{Ar'})^K$ 、拉格朗日乘子 $(\lambda_{l,t}^A)^K$ 和 $(\lambda_{r,t}^A)^K$ 、惩罚因子 $\rho_{l,t}^K$ 和 $\rho_{r,t}^K$ 以及原始残差和对偶残差。

步骤2:每个区域单独计算式(23),然后向相邻区域交换边界信息 $p_i^{Al}, p_i^{Ar}, p_i^{Bl}$ 和 p_i^{Br} 。

步骤3:由式(28)更新辅助变量。

步骤4:式(29)、式(30)表示 $S_{l,t}^K, S_{r,t}^K$ 以及 $R_{l,t}^K, R_{r,t}^K$ 小于收敛的阈值 ε_1^l 和 ε_1^r , 以此判断收敛的情况。如果不满足则进入步骤5,否则停止计算,输出最优解。

步骤5:引入可变的惩罚因子可以加速收敛的情况,由式(31)、式(32)分别迭代计算拉格朗日

日乘子和惩罚因子。最后,迭代次数 $K=K+1$,返回步骤2。

对偶残差为每次耦合变量和全局变量的差值,反应了不同区域对同一边界节点的优化结果,差值越小,则区域之间信息的传输越精准。原始残差为相邻两次迭代的全局变量之差,差值越小,则说明两次迭代变化幅度越小。

3 算例分析

为了验证本文模型和算法的有效性,采用3区117节点互联系统进行仿真模拟,在Matlab环境下调用CPLEX求解器进行模型求解。计算机CPU为intel-i5 8300H,主频2.3 GHz,4 GB内存。

本文采用3个IEEE 39节点系统互联进行仿真分析,区域A电网39节点与区域B电网24节点相连,区域A电网26节点与区域C电网20节点相

连。其中A区由5台常规机组、3台风电机组构成,风电机组接入节点为35、36、39;B区和C区由5台常规机组和2台风电机组构成,风电接入节点均为38、39。假设区域A和区域B之间的日交易计划总量为5 000 MW,区域A和区域C之间的日交易计划总量为4 500 MW。取备用成本价格为发电成本价格的1/3。为了更好地模拟实际情况,采用甘肃某区域风电及气象相关数据和负荷数据,利用堆栈自编码器特征提取并进行K-means聚类之后得到两类典型场景。第一类如图2a所示,高比例风电地区A波动性较大,区域B,C风电出力平滑;第二类如图2b所示,区域A,B,C风电出力都较为平滑。负荷的预测误差取0.05%,风电的预测误差取8%。整个调度周期为24 h,时间间隔为1 h,耦合变量的初始值设置为0,惩罚因子的初始值设置为0.6,对偶残差和原始残差的收敛阈值取为 10^{-2} 。

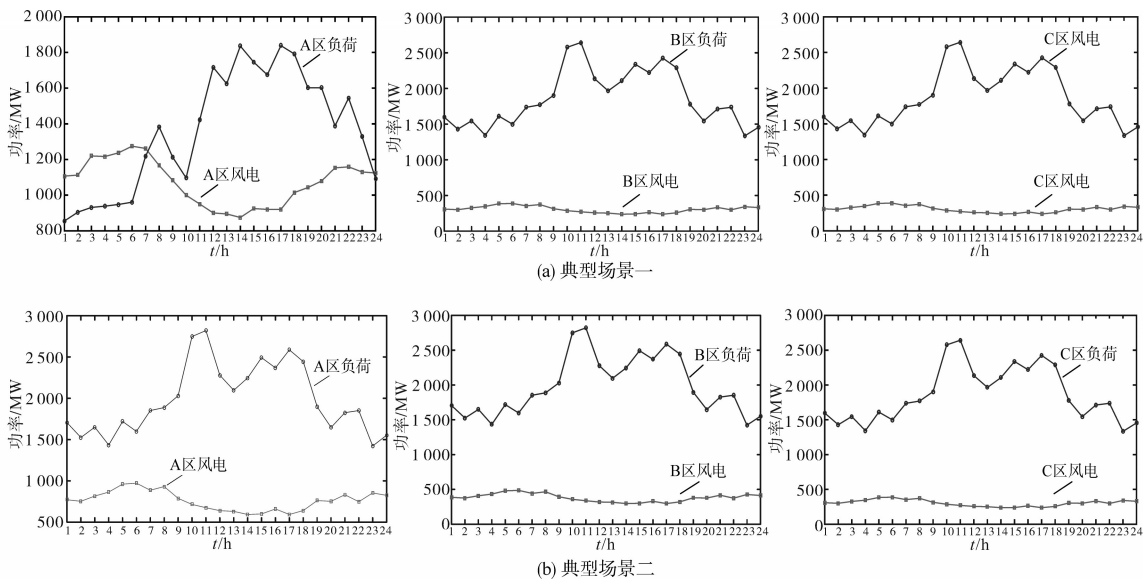


图2 风电和负荷预测值

Fig.2 Wind power and load forecast value

为了分析本文所提的两阶段优化模型的有效性,本节分别采用如下策略进行仿真,分别为:

策略1:区域间联络线传输计划给定,为了方便计算,联络线各时刻传输值取交易计划总量的平均值;

策略2:区域间联络线日交易计划给定,进行集中式计算;

策略3:区域间联络线日交易计划给定,进行分布式计算。

3.1 算法有效性验证

以下为场景1优化结果。通过对比策略2和

策略3的优化结果,进行分布式算法有效性的验证。表1为集中式调度和分布式调度的运行成本计算结果,计算误差仅为3.5%,证明了分布式算法的有效性,相比于集中式算法,分布式算法更为灵活、迅速,使用范围更为广泛。

表1 运行费用

Tab.1 Operating costs

策略	区域			总费用/万元
	A/万元	B/万元	C/万元	
2	63.83	95.08	97.31	256.22
3	65.54	91.28	90.36	247.18

图3表示迭代过程中运行费用的变化情况。由图3可见,A区域为多风地区,其运行成本低于其他区域,起初A区向B区和C区供给多余的风电,随后A区风电减少,降低了这一部分外送量,因此B区和C区的成本曲线呈现上升趋势,最后各区域的成本曲线趋于稳定直至收敛。

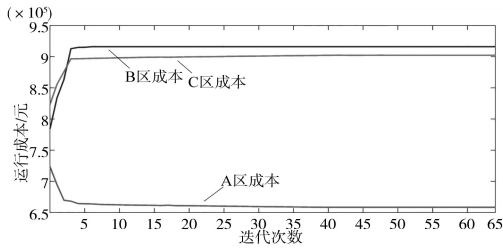


图3 系统运行成本收敛图

Fig.3 System operation cost convergence diagram

3.2 调度结果分析

在可靠性要求为0.9的条件下计算本节的调度结果。策略1和策略3下,经优化得出的运行成本费用和弃风情况如表2所示。

表2 不同场景的运行费用

Tab.2 Operating costs of different scenarios

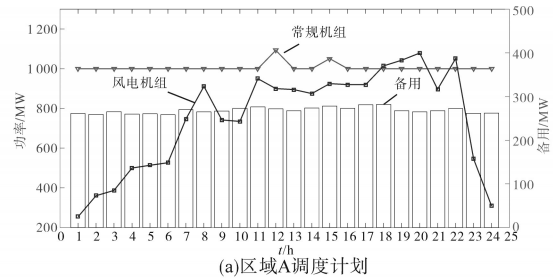
策略	区域			总费用/万元	弃风率/%
	A/万元	B/万元	C/万元		
1	71.89	98.67	99.40	269.97	25.31
3	65.54	91.28	90.36	247.18	17.24

从表2可以看出,策略3的运行费用为247.18万元,相对于策略1运行费用降低了8.44%,并且弃风率降低了8.07%,这说明通过采用联络线可调的方式能提高风电的利用率,减少弃风现象,进一步提升了系统运行的经济性。

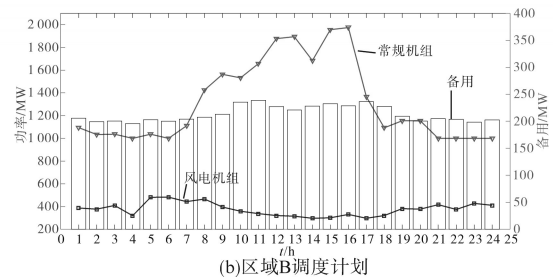
图4、图5为场景1的调度结果,可见,在1:00~10:00的时段区域A由于火电机组开停机计划的原因存在大量弃风现象,当互联系统的联络线交易计划固定时,区域A的风电机组将无法外送更多的风电,通过对联络线灵活优化能为区域A带来更多的外送量,减少该地区的弃风情况。(12:00~20:00时段区域A内部存在大量风电,区域B和区域C增大了备用的支援量,而在9:00~11:00时段由于联络线通道受阻,备用的交互无法进行。另一方面区域A为多风电地区,所需的备用资源将会更大,而区域B和区域C为少风电地区,对备用资源的需求较小,通过备用互济可以将多余的成本较低的备用资源传输给A区域,进而减少系统的运行成本。图6为场景2联络线和备用交互的结果。该场景相对于图

5,功率和备用的支援量降低,因此对于风电波动较大的极端情况,采用互联互通的方式能有效减少系统所需备用。

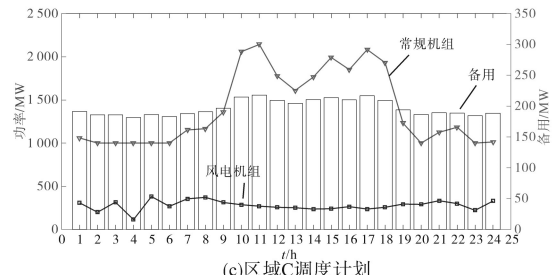
图7表示系统可靠性要求分别为0.9~0.95所需的备用容量。从图中可以看出,当可靠性要求在0.9~0.95之间增长时,系统所需的备用有明显增大,但并不是线性递增的关系,对于可靠性要求越高,备用增长的幅度也越高,对于低可靠性要求所配置的备用相对较少,此时经济性更优;而高可靠性要求下,系统则需要大量的备用,此时安全性更优。此外备用在0.94~0.95之间增长较为缓慢,是因为少风地区B和C有多余的备用向A区供给,说明通过备用互联的方法能够减少互联系统所需求的备用,在提高系统运行可靠性的同时也保证了系统运行的经济性。



(a)区域A调度计划



(b)区域B调度计划



(c)区域C调度计划

图4 系统出力曲线

Fig.4 System output curves

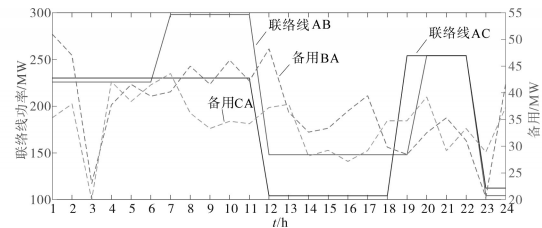


图5 场景一下联络线和备用交互功率

Fig.5 Tie line and standby interactive power under scenario 1

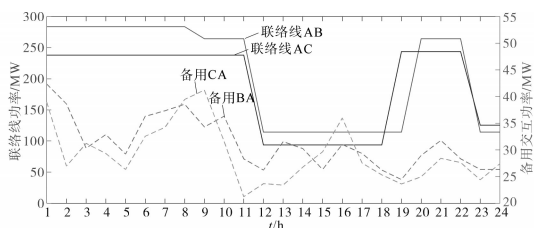


图6 场景二下联络线和备用交互功率

Fig.6 Tie line and standby interactive power under scenario 2

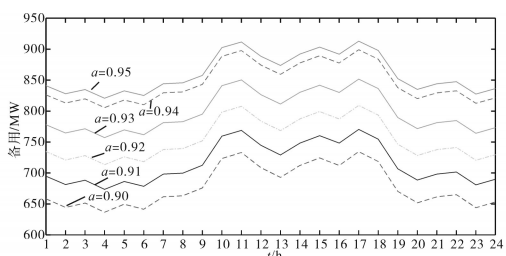


图7 不同可靠性要求下系统备用情况

Fig.7 System standby under different reliability requirements

4 结论

本文提出了一种考虑资源共享的区域互联系统分布式经济调度模型,采用ADMM算法构建分布式计算框架。首先以系统的运行费用最低为目标,采用联络线传输曲线受限优化的方式,然后通过机会约束处理风电和负荷的预测误差,建立基于功率和备用交互的分布式经济调度模型,调用CPLEX进行模型的求解。仿真结果表明,通过优化联络线的运行方式能有效提高风电的利用率,减少系统的弃风量,实现资源的合理配置。采用互联互备的方式能有效降低系统的运行成本,最大化利用低成本资源,在提高系统可靠性的同时也保障了运行的经济性。

参考文献

[1] 钟海旺,夏清,丁茂生,等.以直联络线运行方式优化提升新能源消纳能力的新模式[J].电力系统自动化,2015,39(3):36-42.
Zhong Haiwang, Xia Qing, Ding Maosheng, *et al.* A new mode of HVDC tie-line operation optimization for maximizing renewable energy accommodation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(3): 36-42.

[2] 王斌,夏叶,夏清,等.直流跨区互联电网发电计划模型与方法[J].电力系统自动化,2016,40(3):8-13,26.
Wang Bin, Xia Ye, Xia Qing, *et al.* Model and methods of generation and transmission scheduling of inter-regional power grid via HVDC tie-line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(3): 8-13,26.

[3] 许丹,丁强,黄国栋,等.考虑安全约束的联络线供需协调计划模型[J].电网技术,2015,39(9):2591-2596.
Xu Dan, Ding Qiang, Huang Guodong, *et al.* Modeling for tie-line scheduling plan based on security constraints and supply-demand coordination[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2591-2596.

[4] 曾方迪,李更丰,别朝红,等.考虑跨区联络线交易计划的多区域互联系统分散调度方法[J].电力系统自动化,2018,42(16):32-40.
Zeng Fangdi, Li Gengfeng, Bie Zhaohong, *et al.* Decentralized dispatch method for multi-area interconnected power systems considering cross-area tie-line transaction strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(16): 32-40.

[5] 苏鹏,刘天琪,李兴源.含风电的系统最优旋转备用的确定[J].电网技术,2010,34(12):158-162.
Su Peng, Liu Tianqi, Li Xingyuan. Determination of optimal spinning reserve of power grid containing wind[J]. Power System Technology, 2010, 34(12): 158-162.

[6] 梁子鹏,陈皓勇,雷佳,等.考虑风电不确定度的风-火-水-气-核-抽水蓄能多源协同旋转备用优化[J].电网技术,2018,42(7):2111-2119.
Liang Zipeng, Chen Haoyong, Lei Jia, *et al.* A multi-source coordinated spinning reserve model considering wind power uncertainty[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2111-2119.

[7] 张刘冬,殷明慧,卜京,等.基于成本效益分析的风电-抽水蓄能联合运行优化调度模型[J].电网技术,2015,39(12):3386-3392.
Zhang Liudong, Yin Minghui, Bu Jing, *et al.* A joint optimal operation model of wind farms and pumped storage units based on cost-benefit analysis[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3386-3392.

[8] 张放,刘继春,高红均,等.基于风电不确定性的电力系统备用容量获取[J].电力系统保护与控制,2013,41(13):14-19.
Zhang Fang, Liu Jichun, Gao Hongjun, *et al.* Reserve capacity model based on the uncertainty of wind power in the power system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 14-19.

[9] 董军,聂麟鹏,聂仕麟,等.考虑需求响应与风电不确定性的两阶段鲁棒旋转备用容量优化模型[J].电力建设,2019,40(11):55-64.
Dong Jun, Nie Linpeng, Nie Shilin, *et al.* Two-stage robust optimization model for spinning reserve capacity considering demand response and uncertainty of wind power[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(11):55-64.

[10] 陈庆攀,刘洋,杨得洋.考虑风电不确定性的电力系统鲁棒优化调度[J].电工技术,2019(11):37-39,43.
Chen Qingpan, Liu Yang, Yang Deyang. Robust optimal scheduling of power system considering uncertainty of wind power[J]. Electric Engineering, 2019(11): 37-39,43.

[11] 晋宏杨,孙宏斌,牛涛,等.考虑风电与高载能负荷调度不确定性的鲁棒机组组合[J].电力系统自动化,2019,43(22):

- 13-20.
- Jin Hongyang, Sun Hongbin, Niu Tao, *et al.* Robust unit commitment considering uncertainties of wind and energy intensive load dispatching[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(22): 13-20.
- [12] 王乐,余志伟,文福拴.基于机会约束规划的最优旋转备用容量确定[J].*电网技术*,2006,30(20):14-19.
- Wang Le, Yu Zhiwei, Wen Fushuan. A chance-constrained programming approach to determine requirement of optimal spinning reserve capacity[J]. *Power System Technology*, 2006, 30(20): 14-19.
- [13] 蒋万泉,刘继春,韩晓言,等.离网条件下考虑短时间尺度的水光蓄多能互补发电系统备用容量确定方法[J].*电网技术*, 2020, 44(7): 2492-2502.
- Jiang Wanxiao, Liu Jichun, Han Xiaoyan, *et al.* Reserve optimization for offline multi-energy complementary generation system in short time scale[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(7): 2492-2502.
- [14] 赵文猛,刘明波,周保荣,等.含风电接入多区域电力系统的分散式随机动态经济调度方法[J].*中国电机工程学报*, 2017, 37(24):7087-7098.
- Zhao Wenmeng, Liu Mingbo, Zhou Baorong, *et al.* Decentralized stochastic dynamic economic dispatch for multi-area power systems with wind power integrated[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(24): 7087-7098.
- [15] 文云峰,郭创新,郭剑波,等.多区互联电力系统的分散协调风险调度方法[J].*中国电机工程学报*,2015,35(14):3724-3733.
- Wen Yunfeng, Guo Chuangxin, Guo Jianbo, *et al.* Coordinated decentralized risk-based dispatch of multi-area interconnected power systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(14): 3724-3733.
- [16] 陈厚合,王子璇,张儒峰,等.含虚拟电厂的风电并网系统分布式优化调度建模[J].*中国电机工程学报*,2019,39(9):2615-2624.
- Chen Houhe, Wang Zixuan, Zhang Rufeng, *et al.* Decentralized optimal dispatching modeling for wind power integrated power system with virtual power plant[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(9): 2615-2624.
- [17] Zhou X, Ai Q. An integrated two-level distributed dispatch for interconnected microgrids considering unit commitment and transmission loss[J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2019, 11(2):025504.
- [18] 李华东,李勇,李文博.考虑源网荷互动的虚拟发电厂分布式协同控制[J].*电气传动*,2019,49(3):72-77.
- Li Huadong, Li Yong, Li Wenbo. Distributed cooperative control for virtual power plants considering interaction of source, network and load[J]. *Electric Drive*, 2019, 49(3): 72-77.
- [19] Qin Jiahu, Wan Yanni, Yu Xinghuo, *et al.* Consensus-based distributed coordination between economic dispatch and demand response[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(4): 3709-3719.
- [20] 税月,刘俊勇,高红均,等.考虑风电不确定性的电气能源系统两阶段分布鲁棒协同调度[J].*电力系统自动化*,2018,42(13):43-50,75.
- Shui Yue, Liu Junyong, Gao Hongjun, *et al.* Two-stage distributed robust cooperative dispatch for integrated electricity and natural gas energy systems considering uncertainty of wind power[J].*Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(13): 43-50, 75.

收稿日期:2020-08-24

修改稿日期:2020-09-10

(上接第53页)

- [13] 张强,张崇巍,张兴,等.风力发电用大功率并网逆变器研究[J].*中国电机工程学报*,2007,35(16):54-59.
- Zhang Qiang, Zhang Chongwei, Zhang Xing, *et al.* Study on grid-connected inverter used in high-power wind generation system[J]. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2007, 35(16): 54-59.
- [14] 韩京清.自抗扰控制器及其应用[J].*控制与决策* 1998, 13(1):19-23.
- Han Jingqing. Active disturbance rejection controller and its application[J]. *Control and Decision*, 1998, 13(1): 19-23.
- [15] Blaabjerg F, Teodorescu R, *et al.* Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2006, 53(5): 1398-1409.
- [16] Yao Jun, Li Hui, Liao Yong, *et al.* An improved control strategy of limiting the DC-link voltage fluctuation for a doubly fed induction wind generator[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2008, 23(3): 1205-1213.
- [17] Gao Zhiqiang. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning[C]/*IEEE American Control Conference*. Denver, USA, 2003:4989-4996.
- [18] 王新华,陈增强,袁著祉.基于扩张观测器的非线性不确定系统输出跟踪[J].*控制与决策*,2004(10):1113-1116.
- Wang Xinhua, Chen Zengqiang, Yuan Zhuzhi. Output tracking based on extended observer for nonlinear uncertain systems[J]. *Control and Decision*, 2004(10):1113-1116.
- [19] Khalil H K. *Nonlinear systems 3rd edition*[M]. New Jersey, Upper Saddle River:Prentice hall, 2002.
- [20] 王新华,刘金琨.微分器设计与应用—信号滤波与求导[M].北京:电子工业出版社,2010.
- Wang Xinhua, Liu Jinkun. Design and application of differentiator—signal filtering and derivation[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2010.

收稿日期:2020-07-30

修改稿日期:2020-09-09