

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201092

# 大规模风电汇聚外送的区域送端电力系统两级优化调度

李德鑫<sup>1</sup>, 宗崇林<sup>2</sup>, 黄大为<sup>2</sup>, 王佳蕊<sup>1</sup>, 张海锋<sup>1</sup>, 刘畅<sup>1</sup>

(1. 国网吉林省电力有限公司电力科学研究院, 吉林 长春 130021; 2. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林 吉林 132012)

**摘要:** 大规模可再生能源集中接入和电力汇聚外送是我国送端电力系统的重要特征之一。针对这一特征, 研究了由多个相对独立的子系统构成的含大规模可再生能源集中接入的区域送端电力系统的日前优化调度问题。基于目标级联方法构建了区域送端电力系统的两级优化调度模型, 上级调度解决各独立子系统联络线有功功率的协调优化问题; 而下级调度则为各子系统相对独立的日前发电计划子优化问题。在下级调度中, 根据各子系统的特点, 以运行成本最小和外送功率偏差最小为优化目标, 综合考虑直流汇聚外送、转运等约束。通过算例分析, 验证了方法的有效性。

**关键词:** 可再生能源消纳; 特高压直流; 目标级联分析; 汇聚外送

## Two-level optimal dispatching of regional sending-end power system for large-scale clustering wind power transmission

LI Dexin<sup>1</sup>, ZONG Chonglin<sup>2</sup>, HUANG Dawei<sup>2</sup>, WANG Jiarui<sup>1</sup>, ZHANG Haifeng<sup>1</sup>, LIU Chang<sup>1</sup>

(1. State Grid Jilin Electric Power Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Changchun 130021, China;

2. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin 132012, China)

**Abstract:** Large-scale centralized integration of renewable energy and clustering power transmission is one of the important characteristics of sending-end power system in China. Given this feature, the day-ahead optimal scheduling problem of a regional sending-end power system with large-scale renewable energy integration is studied. The system is composed of several relatively independent subsystems. Based on the analytical target cascading method, a two-level optimal scheduling model for the regional sending-end power system is constructed. The upper-level scheduling solves the coordinated optimization problem for the tie-line active power flow of each independent subsystem; the lower-level scheduling is the relatively independent day-ahead optimal dispatching for each subsystem. From the characteristics of each subsystem, the minimum operating cost and the minimum deviation of the power transmission are the optimization objective functions, and the constraints of DC clustering transmission and wheeling are comprehensively considered in the lower-level scheduling. Through the analysis of an example, the effectiveness of the method is verified.

This work is supported by the Major Special Projects of Industrial Innovation in Jilin Province (No. 2018C034-7) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 522300190009).

**Key words:** renewable energy consumption; ultra-high voltage direct current (UHVDC); analytical target cascading; clustering transmission

## 0 引言

我国的东北、西北和华北区域(通常所说的“三

北”地区), 风电资源丰富且远离负荷中心, 通过已建成的多条特高压直流(Ultra High Voltage Direct Current, UHVDC)输电线路实现大规模可再生能源的跨区域外送<sup>[1-2]</sup>。我国“三北”地区均为送端区域电力系统, 且具有大规模风电接入电力汇集中外送的特点, 针对含大规模风电的送端电力系统优化

基金项目: 吉林省产业创新重大专项(2018C034-7); 国网公司科技项目资助(522300190009)

运行问题，成为备受关注的研究热点之一<sup>[3-4]</sup>。

针对大规模风电接入的送端电力系统优化运行问题，国内外学者已经做了较多的研究工作<sup>[4-22]</sup>。研究工作主要聚焦于应对规模化风电功率不确定性给电力系统优化调度带来的挑战<sup>[4-6]</sup>，以及如何协调处理风火“打捆”外送的多个优化目标问题<sup>[8-11]</sup>。常用的风电不确定性建模方法主要基于风电的概率预测信息进行建模，例如：场景法<sup>[4-6]</sup>、机会约束规划<sup>[6-8]</sup>。

而区域送端电力系统通常由多个相对独立的子系统构成，且接入的风电需要经过大规模的汇聚后通过集中汇聚点经直流输电通道实现电力外送。相对独立的各子系统之间分散协调调度，亦成为众多学者关注的热点问题<sup>[15-19]</sup>。文献[15]提出采用 Benders 分解法将大规模复杂非线性问题分解为含直流输电功率优化的动态安全约束经济调度主问题和单时段交直流互联电网最优潮流子问题，以提升原模型计算效率。文献[16]采用 Dantzig-Wolfe 分解将高维问题分解为主问题和一系列子问题，避免了“维数灾”的问题。文献[17]基于改进的目标级联分析法建立直流跨区互联电网分散调度模型，上级主问题协调区域间联络线功率，下级子问题安排区域内经济调度，主子问题交替迭代以促进风电跨区域消纳。文献[18]应用交替方向乘子法建立了一种多区域完全分布式的动态经济调度模型。文献[19]基于同步型交替方向乘子法解决了多区域互联电网的分散优化问题。

上述分散协调方法主要是利用约束系数矩阵结构的特殊性，将计算复杂的原问题分解为不同的主子问题以降低求解复杂程度。区域送端电力系统通过 UHVDC 技术实现电能跨地区、大容量地输送。通常将 UHVDC 输电功率分成多个部分，采用叠加组合的思想建模<sup>[20-21]</sup>，也有学者根据其运行特性引入 0-1 变量将非线性模型转换成混合整数线性模型<sup>[22-23]</sup>。

上述研究工作主要聚焦于送端和受端电网之间通过跨区域电力外送及互联电网的协调优化问题，所建立模型以优化直流输电功率协同送受两端电网的调峰资源为侧重点，而对送端区域电网多主体协调汇聚外送的研究较少。我国的送端区域电网通常由多个相对独立的区域子网(如，省级电网)构成，其电力外送呈现汇聚外送特征，即区域子网通过联络线将电力汇入 UHVDC 换流站集中直流外送或通过超高压交流(Extra-High Voltage Alternating Current, EHVAC)线路集中外送，各子区域电网之间需签订电力转运合同。在实际生产中，子区域电网

可能同时面临自身可再生能源消纳、电力集中外送和电力转运的多重压力。

本文首先分析了我国含大规模风电的送端电力系统风能汇聚外送特点，基于改进目标级联分析法，构建适应各相互独立子系统协调运行的送端电力系统两级优化调度模型。将风电场功率作为随机变量，建立了以运行成本最小和外送功率偏差最小为目标的机会约束规划调度模型，并运用改进目标级联分析法，将该集中优化模型分解为以联络线有功功率为耦合变量的分散优化模型。算例分析验证了本文所提方法有效性。

### 1 区域送端电力系统的电力汇聚外送

典型的区域送端电力系统如图 1 所示，其由多个相对独立的子系统构成。在区域送端电力系统中，各子系统均有大规模风电接入，各子系统盈余电能通过子系统间联络线汇聚至区域电网的直流汇聚外送点集中外送。根据区域内电能汇聚形式将送端系统的子系统分为两类：一类是源端型子系统，该类子系统没有电力汇入通道与之相连，只向其他区域内子系统输送电力；另一类是转运<sup>[24-26]</sup>型子系统，该类子系统既有电力汇入通道，又有与其他区域内子系统或区域外系统相连的电力输送线路。对于包含直流外送汇聚点(直流换流站)的转运型子系统，既承担着外送自身盈余电能的任务，又面临转运其他源端型子系统汇聚电能的任务。

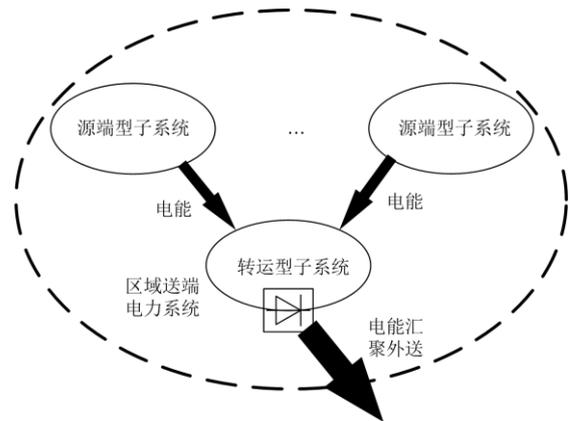


图 1 典型区域送端电力系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of typical regional sending-end power system structure

整个区域送端电力系统优化调度，需要实现区域内风电消纳利用和运行成本优化，同时还应满足电能规模外送的要求，以保证外送通道的利用率和协同受端电力系统优化运行。无论从系统结构还是从经济及信息的互动上看，各子系统内部的优化调

度是相互独立的; 但各子系统之间需要通过调控彼此之间的联络线功率实现整个送端电力系统的优化运行。因此, 区域送端电力系统的优化调度, 既需要协调系统优化运行中的多目标问题, 也要处理子系统之间相互独立分散决策的问题。

## 2 送端电力系统日前调度的两级优化模型

### 2.1 子系统分解与分散优化

区域送端电力系统内各子系统是相对独立的运营主体, 其优化运行问题适合运用大系统分解协调的思想, 将大系统集中优化问题分解为各子系统的子优化问题, 以分散协调优化的方式求解。

借鉴文献[17]改进目标级联分析法, 直接以各子系统间联络线有功功率作为耦合变量。每个子系统下级调度中心负责制定自身的发电计划, 而上级调度中心负责协调各子系统联络线有功功率传输计划, 联络线有功功率约束为上级调度中心主问题约束; 上级调度中心下发的联络线功率对于子系统下级调度中心而言可等效为相应的注入功率, 在子优化问题中进行处理。

以两相邻子系统为例, 如图2所示, 两相邻子系统  $a$  和  $\hat{a}$ , 子系统间任意一条联络线用  $z$  表示。将联络线分别复制到线路两端子电网中组成子系统  $a$  和子系统  $\hat{a}$ , 分解前的联络线功率  $P_{z,t}^L$  经过分解后, 转变为子系统  $a$  的边界线路功率  $P_{a,z,t}^L$  和子系统  $\hat{a}$  边界线路功率  $P_{\hat{a},z,t}^L$ 。为了保证分解前后各区域间的联络线功率一致, 必须满足子系统间耦合约束。

$$P_{a,z,t}^L = P_{\hat{a},z,t}^L \quad (1)$$

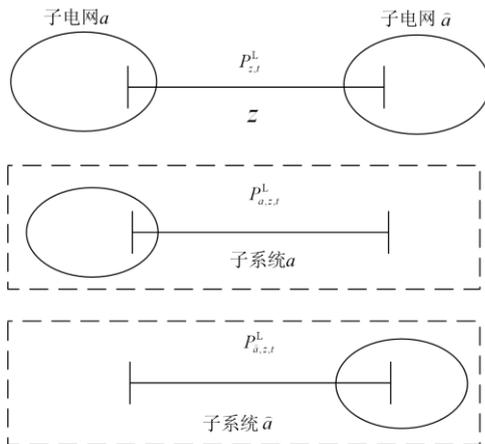


图2 相邻子系统分解示意图

Fig. 2 Schematic diagram of adjacent subsystems in the regional power system

子系统  $a$  与其相连的联络线拓扑关系可以用子系统与联络线关联矩阵  $A_a$  表示, 其为  $1 \times N_z$  矩阵,

$N_z$  为区域系统内各子系统间联络线总数。矩阵  $A_a$  中元素为 0, 表示相应联络线与子系统  $a$  不相连; 元素为 -1, 表示联络线有功功率流入子系统  $a$ ; 元素为 1, 表示联络线有功功率从子系统  $a$  流出。子系统  $a$  的功率平衡关系可以表示为

$$\sum_{i=1}^{N_g^a} P_{a,i,t}^G + \sum_{j=1}^{N_w^a} P_{a,j,t}^W = A_a P_t^L + I_a P_t^{DC} + \sum_{k=1}^{N_d^a} P_{a,k,t}^D \quad (2)$$

式中:  $N_g^a$ 、 $N_w^a$  和  $N_d^a$  分别为子系统  $a$  的火力发电机组总台数、风电场总数和负荷总数;  $P_{a,i,t}^G$ 、 $P_{a,j,t}^W$  和  $P_{a,k,t}^D$  分别为子系统  $a$  在  $t$  时段的火电机组有功功率、风电场有功功率和有功负荷;  $P_t^L$  为区域系统各子系统间联络线有功功率列向量;  $P_t^{DC}$  为送端电力系统在  $t$  时段的 UHVDC 外送有功功率;  $I_a$  表征区域  $a$  是否有直流外送换流站, 取 0 或 1,  $I_a$  取 1 表示与子系统  $a$  有直流外送换流站, 取 0 则相反。若矩阵  $A_a$  非零元素均为 1, 则子系统  $a$  为源端子系统; 若  $A_a$  中非零元素既有 1 也有 -1, 或非零元素均为 -1 而  $I_a$  取 1, 则子系统  $a$  为转运子系统。

### 2.2 送端电力系统集中优化模型

#### 2.2.1 模型目标函数

送端电力系统的集中优化模型以电能汇聚外送过程中各子系统火电机组煤耗成本的总和最小及 UHVDC 外送有功功率偏差最小为目标, 即

$$\min f = \sum_{t=1}^{N_T} \left[ \sum_{a=1}^N \sum_{i=1}^{N_g^a} C_{a,i}(P_{a,i,t}^G) + M(P_t^{DC} - P_{0,t}^{DC})^2 \right] \quad (3)$$

其中:

$$C_a(P_{a,i,t}^G) = a_{a,i}(P_{a,i,t}^G)^2 + b_{a,i}P_{a,i,t}^G + c_{a,i} \quad (4)$$

式中:  $N_T$  为调度周期的时段数;  $N$  为区域送端系统含子系统的个数;  $C_{a,i}(g)$  为子系统  $a$  火电机组  $i$  的成本函数;  $P_{0,t}^{DC}$  为 UHVDC 外送计划有功功率参考值, 区域送端和受端电力系统通过设定该功率参考值来调控外送功率水平;  $M$  为罚因子;  $a_{a,i}$ 、 $b_{a,i}$  和  $c_{a,i}$  为火电机组成本系数。

#### 2.2.2 模型约束条件

送端电网各子系统互相独立, 子系统间仅以联络线相连, 故以送端某一子系统  $a$  为例简要说明模型的约束条件。

##### (1) 火电机组约束

火电机组约束包含有功限值约束、功率爬坡约束。

$$P_{-a,i}^G \leq P_{a,i,t}^G \leq \bar{P}_{a,i}^G \quad (5)$$

$$|P_{a,i,t}^G - P_{a,i,t-1}^G| \leq \Delta \bar{P}_{a,i}^G \Delta t \quad (6)$$

式中： $P_{a,i}^G$ 和 $\bar{P}_{a,i}^G$ 分别为子系统 $a$ 火电机组 $i$ 的有功功率下限和上限； $\Delta \bar{P}_{a,i}^G$ 为子系统 $a$ 火电机组 $i$ 的最大爬坡功率； $\Delta t$ 为单位时段的时长。

#### (2) 功率平衡机会约束

根据由式(2)描述的子系统功率平衡关系，若将风电场有功功率视为服从某种概率分布的随机变量，则功率平衡的机会约束可表达为

$$\Pr\left\{\sum_{i=1}^{N_g^a} P_{a,i,t}^G + \sum_{j=1}^{N_w^a} \hat{P}_{a,j,t}^W \leq A_a P_t^L + I_a P_t^{DC} + \sum_{k=1}^{N_l^a} P_{a,k,t}^D\right\} \leq \varepsilon_{a,t} \quad (7)$$

式中： $\hat{P}_{a,j,t}^W$ 为子系统 $a$ 在 $t$ 时段风电场 $j$ 的有功功率，为随机变量； $\varepsilon_{a,t}$ 为子系统 $a$ 在 $t$ 时段有功功率机会约束的置信系数。 $\varepsilon_{a,t}$ 的取值表征子系统 $a$ 风能利用与调度方案修正风险之间的平衡关系，其取值越高表征子系统 $a$ 的风电消纳水平越高。

#### (3) 子系统内线路潮流约束

为降低模型复杂度，采用直流潮流的功率转移分布因子法描述线路功率约束。

$$\Pr\left\{\sum_{i \in \Omega_g^a} H_{li}^G P_{a,i,t}^G + \sum_{i \in \Omega_w^a} H_{lj}^W \hat{P}_{a,j,t}^W - \sum_{k \in \Omega_l^a} H_{lk}^D P_{a,k,t}^D - H_l^L A_a P_t^L - I_a H_l^D P_{a,t}^{DC} \leq \bar{F}_l\right\} \geq \sigma_{a,t} \quad (8)$$

式中： $\Omega_g^a$ 、 $\Omega_w^a$ 和 $\Omega_l^a$ 分别为子系统 $a$ 发电机节点集合、风电场并网节点集合和负荷节点集合； $H_{li}^G$ 、 $H_{lj}^W$ 、 $H_{lk}^D$ 、 $H_l^L$ 、 $H_l^D$ 分别为火电机组 $i$ 、风电机组 $j$ 、负荷 $k$ 、联络线及送端UHVDC的功率转移分布因子； $\bar{F}_l$ 为支路 $l$ 的传输功率上限； $\sigma_{a,t}$ 为机会约束的置信度。

#### (4) 子系统间联络线约束

为确保联络线两端的区域电网运行安全，联络线设置功率限值约束、功率波动约束以及总电量约束。

$$P_{a,z,t}^L \leq P_{a,z,t}^L \leq \bar{P}_{a,z,t}^L \quad (9)$$

$$|P_{a,z,t}^L - P_{a,z,t-1}^L| \leq \Delta \bar{P}_{a,z}^L \Delta t \quad (10)$$

$$|Q_a^D - \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{z=1}^{N_z} P_{a,z,t}^L \Delta t| \leq \delta Q_a^D \quad (11)$$

式中： $P_{a,z,t}^L$ 和 $\bar{P}_{a,z,t}^L$ 为 $P_{a,z,t}^L$ 的下限和上限； $\Delta \bar{P}_{a,z}^L$ 为联络线 $z$ 允许的功率最大波动量； $Q_a^D$ 为子系统 $a$ 与其他子系统约定的联络线总电量； $\delta$ 为实际电量与约定电量允许波动百分比。

#### (5) 子系统间耦合约束

$$P_{a,z,t}^L = P_{\hat{a},z,t}^L \quad (12)$$

式中：下标 $\hat{a}$ 代表子系统 $a$ 通过某条联络线 $z$ 相连的其他子系统。式(12)代表通过边界线路 $z$ 相连的子系统 $a$ 的功率和子系统 $\hat{a}$ 的功率相等。

#### (6) 区域送端电力系统汇聚外送约束

本模型借助特高压直流输电实现电能汇聚外送。将直流输电功率作为待优化变量的同时，增加反映直流输电线路功率调节的两组0-1变量。以直流限值约束、爬坡约束、阶梯化约束、功率变动次数约束、日外送电量约束及逻辑约束为条件建立特高压直流输电的混合整数线性方程。

$$P_{t-1}^{DC} \leq P_t^{DC} \leq \bar{P}^{DC} \quad (13)$$

$$U_t \Delta P_{t-1}^{DC} \Delta t \leq P_t^{DC} - P_{t-1}^{DC} \leq U_t \Delta \bar{P}^{DC} \Delta t \quad (14)$$

$$D_t \Delta P_{t-1}^{DC} \Delta t \leq P_{t-1}^{DC} - P_t^{DC} \leq D_t \Delta \bar{P}^{DC} \Delta t \quad (15)$$

$$U_t + D_t + \sum_{l=t+1}^{t+T^{\min}-1} (U_l + D_l) \leq 1 \quad (16)$$

$$\sum_{t=1}^{N_T} (U_t + D_t) \leq N^{dc} \quad (17)$$

$$|Q^{\text{out}} - \sum_{t=1}^{N_T} P_t^{DC} \Delta t| \leq \delta Q^{\text{out}} \quad (18)$$

$$0 \leq U_t + D_t \leq 1 \quad (19)$$

$$\frac{P_t^{DC} - P_{t-1}^{DC}}{\Delta \bar{P}^{DC}} \leq U_t < \left(1 + \frac{P_t^{DC} - P_{t-1}^{DC}}{\Delta \bar{P}^{DC}}\right) \quad (20)$$

$$\frac{P_{t-1}^{DC} - P_t^{DC}}{\Delta \bar{P}^{DC}} \leq D_t < \left(1 + \frac{P_{t-1}^{DC} - P_t^{DC}}{\Delta \bar{P}^{DC}}\right) \quad (21)$$

式中： $P_{t-1}^{DC}$ 、 $\bar{P}^{DC}$ 分别为调度机构允许的直流输电系统输电功率的下限和上限； $U_t$ 为0-1变量， $U_t=1$ 表示 $t$ 时刻UHVDC输电功率上调，反之没有上调； $D_t$ 为0-1变量， $D_t=1$ 表示 $t$ 时刻UHVDC输电功率下调，反之没有下调； $\Delta \bar{P}^{DC}$ 、 $\Delta \bar{P}^{DC}$ 分别为直流功率调整下限和上限； $T^{\min}$ 为相邻两次直流功率调整最小时间间隔； $N^{dc}$ 为调度周期内直流功率允许的调整次数； $Q^{\text{out}}$ 为UHVDC外送总电量，其取值由区域送端和受端电力系统交易电量总量的日滚动分摊值决定。

### 2.3 基于目标级联分析的两级优化模型

上述集中优化模型可表示为

$$\begin{cases} \min & f(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \\ \text{s.t.} & h(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 0 \\ & g(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq 0 \end{cases} \quad (22)$$

式中： $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_a, \dots, x_N]^T$ 为各子系统可分离的优化变量向量； $\mathbf{y} = [P_1^L, P_2^L, \dots, P_t^L, \dots, P_{N_T}^L]^T$ 为各子系统联络线功率构成的耦合优化变量向量。

由于模型是以子系统间联络线为边界列写约束

条件,因此简化模型约束条件的系数矩阵呈对角型,利用结构的特殊性,采用目标级联分析的方法将原问题分解成上级协调主问题和下级优化子问题,分别协调子系统间联络线功率和子系统内的经济调度问题。主子问题交替迭代,直到收敛即完成模型求解。

上述送端系统集中优化模型可分解为 1 个上级优化主问题和  $N$  个下级独立优化子问题,以主问题优化变量  $\tilde{\mathbf{y}} = [\tilde{P}_1^L, \tilde{P}_2^L, \dots, \tilde{P}_t^L, \dots, \tilde{P}_{N_r}^L]^T$  和各子问题优化变量  $\mathbf{y} = [P_1^L, P_2^L, \dots, P_t^L, \dots, P_{N_r}^L]^T$  交替迭代求解。

下级子优化问题如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \quad \sum_{t=1}^{N_r} \left[ \sum_{i=1}^{N_g^a} C_a(P_{a,i,t}^G) + I_a M (P_t^{\text{DC}} - P_{0,t}^{\text{DC}})^2 + \right. \\ \quad \left. \sum_{z \in \Pi_a} \alpha_{z,t}^a (\tilde{P}_{a,z,t}^L - P_{a,z,t}^L) + \beta_{z,t}^a (\tilde{P}_{a,z,t}^L - P_{a,z,t}^L)^2 \right] \quad (23) \\ \text{s.t.} \quad h_a(\mathbf{x}_a, \mathbf{y}) = 0 \\ \quad g_a(\mathbf{x}_a, \mathbf{y}) \leq 0 \end{array} \right.$$

式中:  $\tilde{P}_{a,z,t}^L$  为上级协调主问题下发的联络线  $z$  的功率参考值;  $P_{a,z,t}^L$  为下级子优化问题中联络线功率优化值;  $\Pi_a$  为子系统  $a$  所关联联络线集合;  $\alpha_{z,t}^a$  和  $\beta_{z,t}^a$  分别为目标级联分析算法乘子一次项和二次项。下级子优化模型中的约束条件包含式(5)一式(8),对于子系统  $a$  有直流外送的情况( $I_a$  取值为 1),约束条件还包含式(13)一式(21)及式(24)。

$$\sum_{t=1}^{N_r} \sum_{z \in \Pi_a} P_{a,z,t}^L - \sum_{t=1}^{N_r} P_t^{\text{DC}} \leq 0 \quad (24)$$

上级协调主问题协调送端区域内子系统间联络线功率,其目标函数为

$$\min \sum_{a=1}^N \sum_{t=1}^{N_r} \sum_{z \in \Pi_a} [\alpha_{z,t}^a (\tilde{P}_{a,z,t}^L - P_{a,z,t}^L) + \beta_{z,t}^a (\tilde{P}_{a,z,t}^L - P_{a,z,t}^L)^2] \quad (25)$$

式中:  $\tilde{P}_{a,z,t}^L$  为上级协调主问题优化变量;  $P_{a,z,t}^L$  则为下级子优化问题上传的线路功率参考值。主问题的约束条件由形如式(9)一式(12)所描述的联络线功率约束。

## 2.4 模型求解

步骤 1: 基于可信性理论的电力平衡约束的确定性转化。借鉴文献[27-28]的研究成果,按各时段风速历史数据进行分组,分别对各时段的风速概率密度函数进行估计;利用风速-风电功率函数和风速概率分布可得风电功率的分布函数,根据风电输出的分布函数式,可将机会约束等效为确定性约束。确定性约束可表示为

$$\sum_{i=1}^{N_g^a} P_{a,i,t}^G \geq A_a P_t^L + I_a P_t^{\text{DC}} + \sum_{k=1}^{N_d^a} P_{a,k,t}^D - w_r^a h_t^a \quad (26)$$

$$\sum_{i \in \Omega_a^G} H_{li}^G P_{a,i,t}^G \geq \bar{F}_l + \sum_{k \in \Omega_a^D} H_{lk}^D P_{a,k,t}^D + H_l^L A_a P_t^L + I_a H_l^{\text{DC}} P_{a,t}^{\text{DC}} - \sum_{i \in \Omega_a^W} H_{ij}^W w_r^a h_t^a \quad (27)$$

$$\sum_{i \in \Omega_a^G} H_{li}^G P_{a,i,t}^G \leq -\bar{F}_l + \sum_{k \in \Omega_a^D} H_{lk}^D P_{a,k,t}^D + H_l^L A_a P_t^L + I_a H_l^{\text{DC}} P_{a,t}^{\text{DC}} - \sum_{i \in \Omega_a^W} H_{ij}^W w_r^a h_t^a \quad (28)$$

其中:

$$h_t^a = \frac{C_{0t}}{v_r - v_{\text{in}}} \{-\ln[1 + \exp(-\frac{v_{\text{out}}^{k_t}}{C_{0t}^{k_t}}) - \varepsilon_t]\}^{\frac{1}{k_t}} - \frac{v_{\text{in}}}{v_r - v_{\text{in}}} \quad (29)$$

式中:  $w_r^a$  为子系统  $a$  内所有风电机组的额定功率;  $h_t^a$  为子系统  $a$  的中间参数;  $k_t$  和  $c_{0t}$  为威布尔分布的参数;  $v_r$  为额定风速;  $v_{\text{in}}$ 、 $v_{\text{out}}$  分别为切入、切出风速。 $\varepsilon_t$  对于不同的机会约束表达,其取值不同,对于式(7),  $\varepsilon_t = \varepsilon_{a,t}$ ; 对于式(8),  $\varepsilon_t = 1 - \sigma_{a,t}$ 。

步骤 2:  $\tau = 0$  模型初始化。设置子系统间联络线初始功率和送端 UHVDC 功率初值,初次迭代的收敛因子  $\alpha_0$ 、 $\beta_0$ 。

步骤 3: 并行求解各下级子优化问题。运用 Matlab 并行求解技术并行求解各子系统下级优化问题(23),并将结果  $\tilde{P}_{a,z,t}^L$  上传到上级协调主问题中。

步骤 4: 上级协调主问题求解。以各下级子优化问题上传的计算结果为参考值求解上级协调主问题(25)。

步骤 5: 收敛判断及乘子更新。根据式(30)判断主子问题交替的线路功率差值是否满足收敛条件。若满足则结束迭代,反之  $\tau = \tau + 1$ ,根据式(31)和式(32)更新收敛因子转步骤 3 进行下一次迭代。

$$\frac{\max\{|\tilde{P}_{a,z,t}^L - P_{a,z,t}^L|\}}{\bar{P}_z^L} \leq \zeta \quad (30)$$

$$\alpha_{z,t}^a(\tau + 1) = \alpha_{z,t}^a(\tau) + 2(\beta_{z,t}^a)^2 (\tilde{P}_{a,z,t}^L - P_{a,z,t}^L) \quad (31)$$

$$\beta_{z,t}^a(\tau + 1) = \gamma \beta_{z,t}^a(\tau) \quad (32)$$

式中:  $\zeta$  为收敛阈值;  $\gamma$  为常数,介于 1~2。

## 3 算例分析

### 3.1 算例数据

以 3 个相互连接的 IEEE6 节点系统为例,模拟 3 个互联子系统构成的区域送端电力系统的优化运行,系统结构如图 3 所示。根据本文对于子系统的分类,子系统 A 和 B 为源端子系统,子系统 C 为

转运子系统。两个源端子系统分别与转运子系统通过联络线#1 和#2 相连，联络线传输容量均为 300 MW。UHVDC 的额定容量  $\bar{P}^{DC}$  取 600 MW，外送合同约定电量  $Q^{out}$  取 8 400 MWh，最小变动时间  $T^{min}$  取 3 h，直流最大调节功率限值  $\Delta\bar{P}^{DC}$  取 60 MW，最小调节功率限值  $\Delta\underline{P}^{DC}$  取 5 MW，调度初始时段直流传输功率初始值为 355 MW，且初始时段刚进行调节，总调节次数  $N^{dc}$  取 6，日前调度周期的总时段数为 96 个时段。

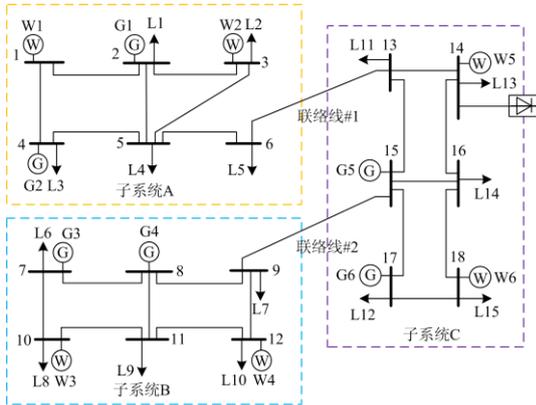


图3 送端区域电力系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the regional sending-end power system

火电机组参数如表 1 所示。各子系统的日前有功负荷曲线如图 4 所示，节点负荷按 IEEE6 节点系统原负荷等比例分配。考虑到“三北”地区风电出力冬季呈反调峰特性，设定各子系统的峰腰荷时段为时段 32 至 80 时段，其余为谷荷时段。假设相同子系统中风电场的风速概率密度函数参数相同，分别采用峰腰荷时段和谷荷时段的风速样本数据估计各子系统风电场风速概率密度函数，其参数如表 2 所示。各风电场风电机组的额定风速、切入风速和切出风速相同，分别为 15 m/s、3 m/s 和 25 m/s；W1—W6 的装机容量分别为 300 MW、300 MW、300 MW、300 MW、350 MW 和 350 MW。

表 1 火电机组参数

Table 1 Thermal power unit parameters

参数	G1	G2	G3	G4	G5	G6
$a_{a,i} / (\$/MW^2)$	$2.3 \times 10^{-3}$	$2.8 \times 10^{-3}$	$3.9 \times 10^{-3}$	$2.5 \times 10^{-3}$	$2.5 \times 10^{-3}$	$2.1 \times 10^{-3}$
$b_{a,i} / (\$/MW)$	16.67	22.2	19.8	22.44	22.26	22.7
$c_{a,i} / \$$	280	560	300	400	250	600
$\bar{P}^G / MW$	130	300	160	220	80	350
$P^G / MW$	20	100	25	80	20	120
$\Delta\bar{P}^G / (MW/h)$	50	80	50	60	40	100

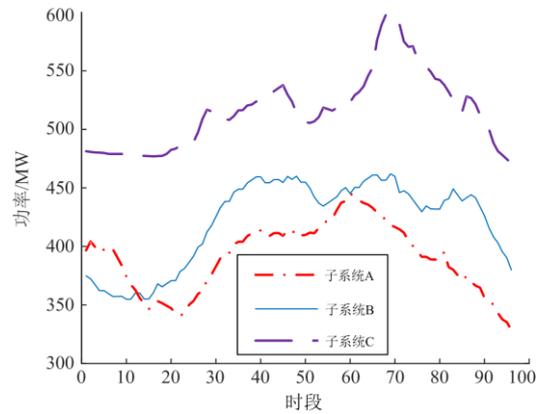


图 4 负荷预测功率曲线

Fig. 4 Load forecast power curve

表 2 风速概率密度函数参数

Table 2 Parameters of wind speed probability density function

子系统	时段	形状参数 $k$	尺度参数 $c_0$
A	峰腰荷时段	2.42	7.63
	谷荷时段	1.93	8.41
B	峰腰荷时段	2.39	7.71
	谷荷时段	1.87	8.87
C	峰腰荷时段	2.36	8.02
	谷荷时段	1.77	9.04

### 3.2 结果分析

#### 3.2.1 两级优化调度方法有效性分析

考虑外送功率恒为 350 MW 的情况，罚因子  $M$  取 1 000，采用本文两级调度模型分散优化方法进行求解， $\alpha$  和  $\beta$  的初值统一取 0.2， $\gamma$  取 1.2， $\zeta$  取 0.5%， $\delta$  取 5%， $\varepsilon_a$  取 0.75。基于目标级联分析的两级优化调度的目标函数值与迭代次数的关系如图 5 所示。

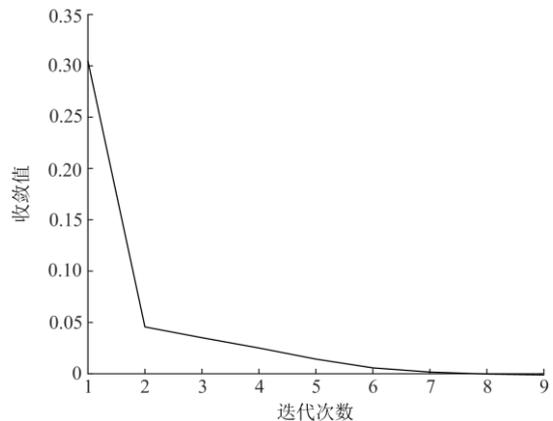


图 5 区域送端电力系统两级调度迭代收敛曲线

Fig. 5 Convergence curve of two-level dispatching iteration in regional sending-end power system

从图 5 可以看出, 模型收敛值和迭代次数的关系曲线, 经过 9 次迭代目标值收敛, 显示出良好的收敛性。

为了比较基于目标级联分析的两级优化调度方法与集中优化调度方法的差异。从目标函数值的差异进行比较。为便于比较, 给出两种方法的目标函数值差异性指标  $I$ , 见式(33)。

$$I = \frac{f - f_0}{f_0} \times 100\% \quad (33)$$

式中,  $f$  和  $f_0$  分别为两级优化调度计算得到式(22)中的目标函数值和集中优化调度计算得到的式(22)中的目标函数值。

取不同的罚因子  $M$ , 计算差异化指标  $I$ , 其结果如表 3 所示。

表 3 不同  $M$  值下差异化指标的对比  
Table 3 Comparison of differentiated indicators under different  $M$  values

$M$ 取值	$I/\%$
100	0.13
1 000	0.11
10 000	0.12

由表 3 可知, 两级优化调度的解与集中优化调度的目标函数值相差较小, 优化结果趋同。

### 3.2.2 不同影响因素对调度结果的影响

置信度的大小代表不确定环境下机会约束满足的程度。为反映谷荷时段风电功率较大的实际情况, 各子系统谷荷时段与峰腰荷时段的置信度取不同值, 其值越大表征该时段的弃风可能性越小。仅改变模型机会约束中置信度取值(各子系统取值相同), 外送功率不变仍为恒定 350 MW, 分别计算 4 种情况下的优化调度结果, 4 种情形下的总发电成本如表 4 所示。

表 4 不同情况下的置信度和发电成本

Table 4 Confidence and generation cost in different situations

情况	峰腰荷时段置信度	谷荷时段置信度	发电成本/\$
情况 1	0.75	0.65	535 155.69
情况 2	0.85	0.65	534 973.34
情况 3	0.85	0.75	474 875.48
情况 4	0.75	0.75	475 287.96

比较情况 1 和情况 2, 谷荷置信度相同时, 峰腰荷置信度增加 0.1, 情况 2 的发电成本较情况 1 减少, 但减少值较少; 情况 3 和情况 4 的比较, 也有相类似的结果。这表明, 风电出力水平在峰腰荷时段增加与负荷变化趋同, 此时功率平衡的机会约束对目标函数的敏感性相对较小。而比较情况 1 和

情况 4, 峰腰荷置信度相同, 谷荷置信度增加时, 情况 4 较情况 1 的发电成本降低幅度较大; 情况 2 和情况 3 的比较, 也可得到相同的结论。这表明风电出力水平在谷荷时段增加与负荷变化相反(反调峰现象), 此时功率平衡的机会约束对目标函数的敏感性非常大。这也从功率平衡机会约束的角度说明了提高系统负荷低谷时段向下调节能力的重要性。

为了说明外送功率的参考曲线对调度结果的影响, 设置三种外送功率参考曲线模式进行对比, 按情况 4 设置置信度, 其他条件与 3.2.1 节相同。模式 1: 外送功率参考曲线恒定为 350 MW。模式 2: 外送功率参考曲线与送端系统负荷变化趋同, 即在 1—24 时段和 72—96 时段参考功率为 300 MW, 其他时段为 400 MW。模式 3: 外送功率参考曲线与送端系统负荷变化相反, 即 1—24 时段和 72—96 时段参考功率为 400 MW, 其他时段为 300 MW。三种外送模式下, 优化调度的发电成本如表 5 所示。从表中可以看出模式 3 送端电力系统发电成本最低, 相比其他两种模式送端电力系统消纳了更多的风电。

表 5 不同外送功率参考模式下的送端发电成本

Table 5 Generation cost of sending-end system in

different reference transmission modes	
功率参考模式	发电成本/\$
模式 1	475 490.16
模式 2	477 432.73
模式 3	475 008.36

图 6 给出不同外送模式下送端区域电力系统外送功率优化曲线对比图, 其中子图 6(a)、6(b)和 6(c)分别对应外送模式 1、2 和 3。由图 6(a)可知, 初始时段直流功率为 355 MW 且刚进行调节, 其最小变动时间为 3 h, 在时段 12 处实现对外送功率的跟踪; 由图 6(b)和 6(c)可知, 由于直流调节功率限值不能满足在一次调节过程中跟踪计划功率变化, 则需要两次调节, 优化的外送功率在满足相关约束条件下能够很好地跟随功率参考曲线进行调整。外送模式 3 由于其参考功率与负荷变化相反, 有利于提高风电利用水平, 同时功率平衡的机会约束在此模式下较松弛, 因此相对于其他外送模式, 优化调度的外送功率曲线与参考功率曲线最为接近。

图 7 给出外送模式 3 下区域送端系统直流外送功率曲线和子系统间联络线转运功率变化曲线。由图可知, 联络线转运功率曲线相对平缓, 在电力转运过程中能够协调好源端型子系统和转运型子系统之间的供需关系, 但在部分时段存在着功率波动。对比图 7 中的子图 7(a)和子图 7(b)可知, 联络线转

运电力的波动受到区域直流外送功率调整的影响。而联络线#2 在 1—8 时段的波动, 则主要受到子系统 B 和 C 的负荷变化趋势相反的影响。

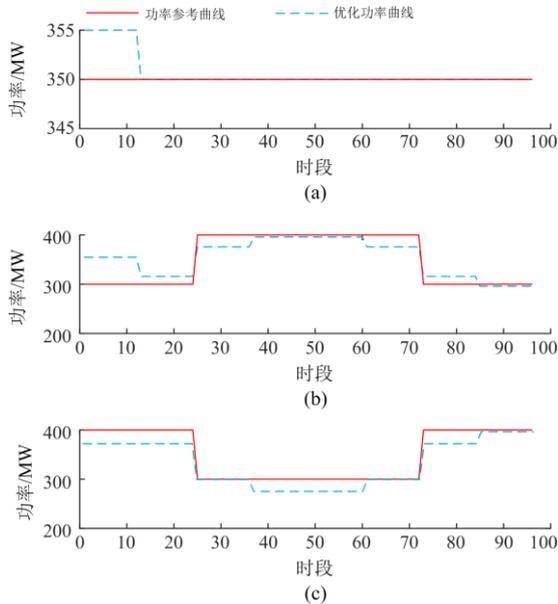


图 6 不同外送模式下外送功率曲线对比

Fig. 6 Comparison of transmission power curves in different transmission modes

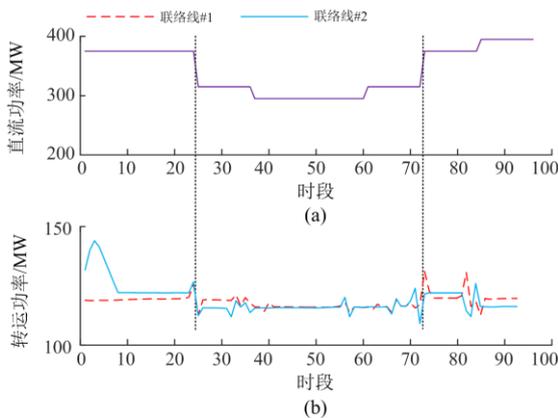


图 7 区域直流外送和联络线转运功率变化曲线

Fig. 7 Variation curve of regional DC transmission power and tie line wheeling power

### 4 结论

针对含多个子系统的送端电力系统, 以联络线为边界进行网络分解, 并基于目标级联法构建了送端电力系统的两级优化调度模型, 上级调度解决各独立子系统联络线有功功率的协调优化问题, 下级调度则为各子系统相对独立的日前发电计划子优化问题。在下级调度中, 根据各子系统的特点, 以运行成本最小和外送功率偏差最小为优化目标, 综合考虑直流汇聚外送、转运等约束。最后利用优化引

擎 CPLEX 进行求解。通过算例分析, 得出以下结论。

(1) 本文所提的送端电力系统两级优化调度模型能够较好地替代传统的集中优化模型, 在相互独立的电网运营主体间适应性更强。

(2) 模型可通过设置不同时段的置信度来体现该时段的风电消纳水平(弃风水平); 当置信度达到一定水平时, 谷荷时段置信度的变化对发电成本的影响更为显著, 凸显增加系统谷荷时段调峰能力的重要性。

(3) 若外送参考功率若变化趋势与送端系统负荷变化趋势相反, 则更有利于送端系统风电消纳; 直流外送功率调节直接影响子系统间联络线功率变化。

### 参考文献

[1] 张瑶, 王傲寒, 张宏. 中国智能电网发展综述[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 180-187.  
 ZHANG Yao, WANG Aohan, ZHANG Hong. Overview of smart grid development in China[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 180-187.

[2] 崔杨, 庄妍, 陈志, 等. 基于蓄热式电锅炉电-热时移特性的弃风消纳方案经济性分析[J]. 热力发电, 2019, 48(6): 9-17.  
 CUI Yang, ZHUANG Yan, CHEN Zhi, et al. Economic analysis of abandoned wind power consumption schemes based on electric-thermal time shift characteristics of regenerative electric boiler[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(6): 9-17.

[3] 黄大为, 曹康洋永, 张旭鹏. 基于风速相关性的风电场群汇聚效应分析[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(2): 18-23.  
 HUANG Dawei, CAO Kangyangyong, ZHANG Xupeng. Clustering effect analysis of wind power stations based on correlation of wind speed[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35(2): 18-23.

[4] 刘振亚, 张启平, 董存, 等. 通过特高压直流实现大型能源基地风、光、火电力大规模高效率安全外送研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2513-2522.  
 LIU Zhenya, ZHANG Qiping, DONG Cun, et al. Efficient and security transmission of wind, photovoltaic and thermal power of large-scale energy resource bases through UHVDC projects[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2513-2522.

[5] 罗翼婷, 杨洪明, 牛犇, 等. 考虑多风能预测场景的虚拟电厂日内滚动柔性优化调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 51-59.  
 LUO Yiting, YANG Hongming, NIU Ben, et al. Day-ahead flexible rolling optimization dispatch of virtual power

- plant based on multi-wind forecasting results[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(2): 51-59.
- [6] ALABDULWAHAB A, ABUSORRAH A, ZHANG X, et al. Coordination of interdependent natural gas and electricity infrastructures for firming the variability of wind energy in stochastic day-ahead scheduling[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2015, 6(2): 606-615.
- [7] 龙川, 张文涛, 叶圣永, 等. 计及源荷相关性含电动汽车的分布式电源选址定容规划[J]. *热力发电*, 2020, 49(6): 97-104.
- LONG Chuan, ZHANG Wentao, YE Shengyong, et al. Optimal planning for siting and sizing of distributed generator including electric vehicles considering correlations of source and load[J]. *Thermal Power Generation*, 2020, 49(6): 97-104.
- [8] AI Qian, FAN Songli, PIAO Longjian. Optimal scheduling strategy for virtual power plants based on credibility theory[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2016, 1(1): 48-55. DOI: 10.1186/s41601-016-0017-x.
- [9] 邓强, 詹红霞, 杨孝华, 等. 考虑风电不确定性和大用户直购电的电力系统经济调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(14): 131-139.
- DENG Qiang, ZHAN Hongxia, YANG Xiaohua, et al. Power system economic dispatching considering the uncertainty of wind power and large consumers direct purchasing[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(14): 131-139.
- [10] 刘明, 曾成碧, 苗虹. 基于分布鲁棒机会约束的机组组合模型[J]. *电测与仪表*, 2021, 58(1): 32-36.
- LIU Ming, ZENG Chengbi, MIAO Hong. Unit commitment model based on distributionally robust chance constraints[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2021, 58(1): 32-36.
- [11] 李文莉, 付聪聪, 张海波. 考虑风电不确定性的风火打捆直流外送系统的日前机组组合模型[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2018, 30(8): 38-43.
- LI Wenli, FU Congcong, ZHANG Haibo. Day-ahead unit commitment models considering uncertainties in wind power for wind power bundled with thermal power transmitted by DC[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2018, 30(8): 38-43.
- [12] 朱子琪, 张文松, 李洛, 等. 考虑弃风限电风险的风火打捆外送多目标优化调度方法[J]. *可再生能源*, 2019, 37(7): 1034-1041.
- ZHU Ziqi, ZHANG Wensong, LI Luo, et al. Multi-objective optimization scheduling method for wind-thermal-bundled transmitted system considering wind curtailment and power shortage risk[J]. *Renewable Energy Resources*, 2019, 37(7): 1034-1041.
- [13] 许丹, 王斌, 张加力, 等. 特高压直流外送风光火电力一体化调度计划模型[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(6): 25-29.
- XU Dan, WANG Bin, ZHANG Jiali, et al. Integrated transmission scheduling model for wind-photovoltaic-thermal power by ultra-high voltage direct current system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(6): 25-29.
- [14] 黄旭锐, 苏亚纳, 侯宏娟, 等. 计及综合需求侧响应的能源枢纽多目标运行优化方法[J]. *热力发电*, 2021, 50(4): 23-29.
- HUANG Xurui, SU Yana, HOU Hongjuan, et al. Multi-objective optimization method of energy hub operation considering integrated demand response[J]. *Thermal Power Generation*, 2021, 50(4): 23-29.
- [15] 王斌, 夏叶, 夏清, 等. 基于 Benders 分解法的交直流互联电网安全约束经济调度[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(6): 1588-1595.
- WANG Bin, XIA Ye, XIA Qing, et al. Security-constrained economic dispatch with AC/DC interconnection system based on benders decomposition method[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(6): 1588-1595.
- [16] MCNAMARA P, MCLOONE S. Hierarchical demand response for peak minimization using Dantzig-Wolfe decomposition[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, 6(6): 2807-2815.
- [17] ZHOU Ming, ZHAI Junyi, LI Gengyin, et al. Distributed dispatch approach for bulk AC/DC hybrid systems with high wind power penetration[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(3): 3325-3336.
- [18] 杨青润, 李澄, 丁涛, 等. 基于交替方向乘子法的电力系统完全分布式动态经济调度方法[J]. *控制理论与应用*, 2018, 35(5): 709-716.
- YANG Qingrun, LI Cheng, DING Tao, et al. Fully distributed dynamic economical dispatching method for power system based on alternating direction multiplier method[J]. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(5): 709-716.
- [19] 马飞龙, 张宝群, 宫成, 等. 考虑风电不确定性的多区电力系统分散式随机调度方法[J]. *电测与仪表*, 2019, 56(11): 68-74.
- MA Longfei, ZHANG Baoqun, GONG Cheng, et al. Decentralized stochastic dispatch approach for multi-area power system considering wind power uncertainty[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, 56(11): 68-74.

- [20] 王斌, 夏叶, 夏清, 等. 直流跨区互联电网发输电计划模型与方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(3): 8-13.  
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.
- [21] 钟海旺, 夏清, 丁茂生, 等. 以直流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.
- [22] 崔杨, 赵玉, 邱丽君, 等. 改善受端电网调峰裕度的特高压直流外送风火协调调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(1): 126-132.  
CUI Yang, ZHAO Yu, QIU Lijun, et al. Coordinated scheduling method of wind-thermal power transmitted by UHVDC system for improving peak-shaving margin of receiving-end power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1): 126-132.
- [23] 韩红卫, 涂孟夫, 张慧玲, 等. 考虑跨区直流调峰的日前发电计划优化方法及分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(16): 138-143.  
HAN Hongwei, TU Mengfu, ZHANG Huiling, et al. Day-ahead generation scheduling method considering adjustable HVDC plan and its analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(16): 138-143.
- [24] HAPP H H. Cost of wheeling methodologies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(1): 147-156.
- [25] 韩放, 柳焯. 电网的转运及其成本[J]. 电网技术, 1997, 21(1): 72-75.  
HAN Fang, LIU Zhuo. Power wheeling and its cost[J]. Power System Technology, 1997, 21(1): 72-75.
- [26] 梁才, 刘文颖, 李扬, 等. 电网多区域间过网网损实用化分摊[J]. 现代电力, 2013, 30(3): 1-6.  
LIANG Cai, LIU Wenying, LI Yang, et al. Practical wheeling loss allocation among multiple regions of power grids[J]. Modern Electric Power, 2013, 30(3): 1-6.
- [27] CARTA J A, RAMIREZ P. A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis: case studies in the Canary Islands[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(5): 933-955.
- [28] LIU X, XU W. Economic load dispatch constrained by wind power availability: a here-and-now approach[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2010, 1(1): 2-9.

收稿日期: 2020-09-07; 修回日期: 2021-02-03

作者简介:

李德鑫(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统稳定分析、新能源并网技术; E-mail: lidexin0323@163.com

宗崇林(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化运行、新能源并网技术; E-mail: zongcl0088@163.com

黄大为(1976—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向电力系统运行与控制, 可再生能源综合利用。E-mail: hdw76@163.com

(编辑 许威)