

考虑电-气-碳综合交易的跨国电网分散式电力调度——以规划的东北亚跨国电网为例

杨青润¹, 丁涛^{1*}, 曾子彧¹, 宁叶², 文亚²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西省 西安市 710049;

2. 全球能源互联网发展合作组织, 北京市 西城区 100031)

Distributed Power Dispatch of Transnational Power Grids Considering Power-gas-carbon Joint Transactions: an Example of Planned Northeast Asian Power Grid

YANG Qingrun¹, DING Tao^{1*}, ZENG Ziyu¹, NING Ye², WEN Ya²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China;

2. Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization, Xicheng District, Beijing 100031, China)

Abstract: To ensure the orderly development and coordinated operation of transnational power grids, it is crucial to organically combine transnational power trading, natural gas trading, and carbon trading. In this study, a transnational joint power-gas-carbon trading model is formulated in which the power system is regarded as the core element and the coupling factors of natural gas trading and carbon trading are considered. A dynamic power dispatching model for transnational power grid is formulated under the framework of the above joint transactions to maximize the overall benefits. Furthermore, a distributed transnational power dispatching algorithm is proposed to protect the industrial information privacy of each country. The global optimization problem is transformed into several sub-problems of each country, which can be solved iteratively to obtain a global optimal solution under a given accuracy. Finally, a simulation of the Northeast Asian transnational power grid is performed, and the transnational power dispatching is analyzed under different scenarios of power-gas-carbon joint trading. Results show that the joint power-gas-carbon trading framework in transnational power grid is conducive to the accommodation of renewable

energy resources and improvement of the operation economy. The uncertainties of renewable energy will be considered in the future, leading to more practical results.

Keywords: transnational power grid; joint transactions; power dispatch; distributed algorithm

摘要: 为了实现跨国电网的有序发展与协调运行, 跨国层面的电力交易、天然气交易和碳交易的有机结合十分关键。为此, 以电力系统为核心, 考虑天然气交易与碳交易的相关耦合因素, 建立了跨国电-气-碳综合交易模型。在上述综合交易的框架下, 建立了跨国电网的动态电力调度模型, 以实现全局效益的最大化。进一步地, 为了保护各个国家的工业信息隐私, 提出了分散式的跨国电力调度算法, 将全局优化问题转化为各个国家的子问题迭代求解, 得到满足给定精度的全局最优解。最后, 对东北亚跨国电网仿真算例进行测试, 分析讨论在不同电-气-碳综合交易情景下的跨国电力调度结果, 说明跨国电网中电-气-碳综合交易框架有利于可再生能源的消纳与运行经济性的提高。未来将进一步考虑可再生能源的不确定性, 得到更加符合实际的结果。

关键词: 跨国电网; 综合交易; 电力调度; 分散式算法

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0901900); 全球能源互联网集团有限公司科技项目(跨国跨洲电碳联合市场发展影响因素模型与市场运行模拟推演研究, SGGEIG00JYJS1900016)。

National Key Research and Development Program of China (2016YFB0901900); Science and Technology Foundation of GEIDCO (Development Impact Model and Market Operation Simulation for Transnational Combined Power and Carbon Markets, SGGEIG00JYJS1900016).

0 引言

现阶段, 全球能源互联网的发展以推进洲内电网互联为主。其中, 东北亚地区各国间经济联系紧密, 能源互补性强, 并于2016年签署了《东北亚电力联网合作备忘录》, 因此东北亚跨国电网是最具实现前景的洲内互联构想之一^[1-4]。

目前,已有以欧洲大陆电网、南部非洲电网等为代表的跨国电网工程^[5],对其他跨国电网互联互通也有一些研究和展望。文献[6]调研了海湾六国能源储量和电力供需现状,研究了未来海湾六国向北非、欧洲和南亚方向的输送清洁电力的联网规划。文献[7-8]分别设计了跨国电网的调度方法与长期交易模式,并针对东北亚跨国电网方案的可行性进行了仿真算例研究。文献[9]针对由中国新疆至德国贯穿哈萨克斯坦、俄罗斯、白俄罗斯和波兰四个国家的输电走廊,建立了投资规划模型,利用动态规划法研究了在不同目标函数下的最优策略。文献[10]主要从理论层面分析了跨国电力交易面临的挑战与机遇,重点针对邻国互联、跨多国远距离互联和区域一体化互联3种场景,提出对应的跨国电力交易机制。文献[11]设计了跨国电力交易市场的成熟度评价模型,重点针对欧洲、北美、中东、东亚4个区域研究跨境电力交易发展的关键措施。

在单纯的电力系统之外,天然气、碳排放等因素也会通过不同的耦合方式对电力系统的运行产生影响。目前,跨国天然气交易与碳交易正在逐步发展,这将成为跨国能源互联互通中值得关注的因素。天然气方面,中国与俄罗斯已于2014年签订了为期30年的天然气供应协议,最终交易量将达到每年380亿 m^3 ^[12]。碳排放方面,《京都议定书》《巴黎协定》等低碳发展规约的陆续签订,使得国际碳交易市场日趋完善^[13]。文献[14-15]研究了电-气互联系统的优化调度问题,并分别考虑了气电解耦的分散式算法与电转气消纳风电的运行方式。文献[16]在引入碳交易的基础上,应用随机规划理论,对含风电的电力系统建立了兼顾经济性和低碳性的经济调度模型。文献[17]针对电力跨区输送的碳排放产权界定问题,提出以公平性为基础的分摊原则,建立了碳流追踪数学模型。文献[18-19]研究了同时考虑碳排放与电-气互联系统的运行调度问题,前者还提出了一种计及时段粒化的大型系统快速求解策略。

然而,上述文献没有同时考虑跨国能源互联互通中电力交易、天然气交易与碳交易对电力调度的影响。因此,本文以东北亚跨国电网为背景,考虑天然气交易与碳交易的相关耦合因素,建立考虑电-气-碳综合交易跨国电网的动态电力调度模型。此外,为了保护各个国家的信息隐私,提出分散式的跨国电力调度算法,通过迭代得到满足精度的最优解。最后,建立东北亚跨国电网仿真算例,研究不同电-气-碳综合

交易情景对跨国电力调度的影响。

1 考虑电-气-碳综合交易的跨国电网动态电力调度模型

图1给出了跨国能源互联互通的示意图。在每个国家中,火力发电和可再生能源发电通过国内的电力传输线路向本国的负荷供电;在各个国家之间,通过跨国电力联络线相互联结成为跨国电力互联网,实现国家间的电力交易。同时,各个国家之间也存在着天然气交易和碳交易,这两种因素经由不同的耦合方式对电力系统产生不同的影响。需要说明的是,本文着眼于某一跨国互联系统内部的交易与调度,对其外部可能存在的更广泛的互联与带来的电-气-碳交易不予考虑。本文综合考虑电、气、碳三种因素的交易对电力调度的影响,建立相应的跨国电网动态电力调度模型,具体叙述如下。

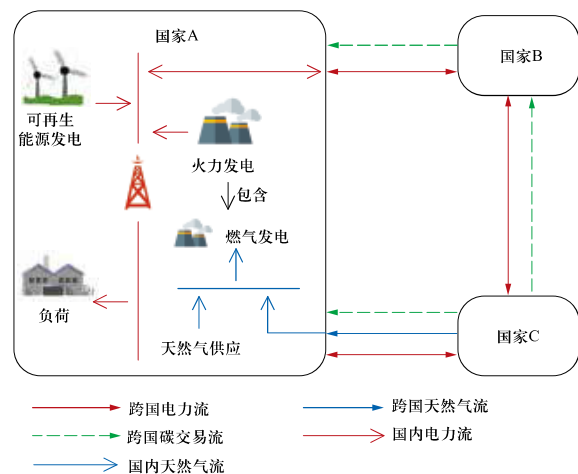


图1 跨国能源互联互通示意图

Fig. 1 Diagram of power dispatch in the transnational energy interconnection

1.1 跨国能源互联互通电-气-碳综合交易模型

图2给出了电-气-碳综合交易模型的示意图。在本文中,主要考虑三者的中长期交易对电力调度的影响。在电力系统内部,电力交易的中长期合约可以直接影响电力调度的结果;在电力系统外部,天然气交易与碳交易的中长期合约,通过与电力调度的耦合关系,可以间接影响电力调度的结果。

1.1.1 电力交易中长期合约

跨国电力交易必须建立在交易两国之间有物理联

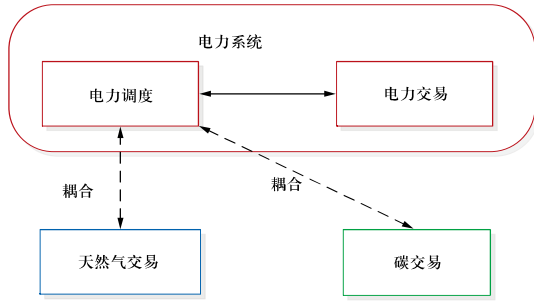


图2 电-气-碳综合交易模型示意图

Fig. 2 Diagram of power-gas-carbon joint transactions model

系（跨国电力流）的基础之上，且供需两端必须实时功率平衡。电力交易中长期合约为电力调度提供规定时段内的电量平衡条件，表示如下：

$$\sum_{t \in T} F_{l,t} = TF_l, \forall l \in \Psi \quad (1)$$

式中： t 、 T 分别为时段的编号和集合； l 为输电线路的编号； Ψ 为跨国电力联络线的集合； $F_{l,t}$ 为线路 l 在时段 t 的传输功率； TF_l 为在给定时段内跨国电力联络线 l 的合同交易电量。

需要说明，跨国电力联络线中的功率可以双向流动，只需保证规定时段内的电量平衡即可。

1.1.2 天然气交易中长期合约及其与电力系统的耦合

跨国天然气交易可以建立在交易两国之间的物理联系（跨国天然气流）之上，也可以通过货运等手段完成交易，没有供需实时平衡的要求。天然气交易中长期合约可表示为：

$$\sum_{t \in T} G_{m,t} = -\sum_{t \in T} G_{n,t} = TG_{mn}, \forall m, n \in A, m \neq n \quad (2)$$

式中： m 、 n 为国家的编号； A 为国家的集合； $G_{m,t}$ 为国家 m 在时段 t 内与国家 n 交易的天然气量，供给为正，接收为负； TG_{mn} 为在给定时段内国家 m 、 n 间的合同交易天然气量。

需要说明， $G_{m,t}$ 与 $G_{n,t}$ 没有必然相等关系。

天然气交易合约与电力系统通过燃气轮机相互耦合，耦合关系表示为：

$$P_{i,t} = \eta_i G_{i,t} \quad \forall i \in \Pi \quad (3)$$

式中： i 为火电机组的编号； Π 为燃气机组的集合； $P_{i,t}$ 为火电机组 i 在时段 t 的出力； $G_{i,t}$ 为燃气机组 i 在时段 t 的天然气耗量； η_i 为燃气机组 i 的天然气发电效率。

1.1.3 碳交易中长期合约及其与电力系统的耦合

跨国碳交易无需交易两国的物理联系，只需保证

规定时段内的碳排放总量平衡，没有供需实时平衡的要求。碳交易中长期合约可表示为：

$$\sum_{t \in T} EC_{m,t} = -\sum_{t \in T} EC_{n,t} = TEC_{mn}, \forall m, n \in A, m \neq n \quad (4)$$

式中： $EC_{m,t}$ 为国家 m 由于与国家 n 交易而在时段 t 内变化的碳排放量，出售为正，购买为负； TEC_{mn} 为在给定时段内国家 m 、 n 之间的合同交易碳排放量。需要说明， $EC_{m,t}$ 与 $EC_{n,t}$ 没有必然相等关系。

碳交易合约与电力系统通过火电机组相互耦合，耦合关系表示为：

$$EC_{i,t} = \xi_i P_{i,t}, \quad \forall i \in N \quad (5)$$

式中： N 为火电机组的集合； $EC_{i,t}$ 为火电机组 i 在时段 t 的碳排放量； ξ_i 为火电机组 i 的碳排放系数。

最后，表1总结了电力、天然气和碳交易在物理基础层面上的不同，并对比了交易合同履行过程中的其他特点。

表1 电力、天然气、碳交易特点对比

Table 1 Characteristic comparison of power-gas-carbon trading

交易对象	物理连接	交易形式	实时平衡	交易方向
电力	有	实物	需要	允许双向
天然气	有	实物	不需要	一般为单向
碳	无	无实物	不需要	一般为单向

1.2 跨国电网动态电力调度模型

以上述电-气-碳综合交易框架为基础，建立跨国电网动态电力调度模型如下。

1.2.1 目标函数

目标函数为电力调度的总成本，分为两个部分：第一部分为系统的总运行费用，主要考虑火电机组的运行成本，忽略可再生能源发电的运行成本；第二部分为碳超量排放的惩罚成本。目标函数的具体表达式如下：

$$C = \sum_{t \in T} \sum_{i \in N} (a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i) + p \sum_{m \in A} OEC_m \quad (6)$$

式中： C 为目标函数值； a_i 、 b_i 、 c_i 为火电机组 i 二次出力特性的系数； p 为碳超量排放的惩罚系数； OEC_m 为国家 m 的碳排放超量。

1.2.2 约束条件

1) 功率平衡约束：

$$\sum_{i \in N} P_{i,t} + \sum_{j \in M} R_{j,t} = \sum_{i \in Q} D_{n,t}, \quad \forall t \in T \quad (7)$$

式中： j 、 n 分别可再生资源机组和系统节点的编号； M 、 Q 分别为可再生资源机组、系统节点的集合； $R_{j,t}$ 为可再生资源机组 j 在时段 t 的出力； $D_{n,t}$ 为系统节点 n 在时段 t 的负荷。

2) 火电机组出力上下限约束：

$$P_i^{\min} \leq P_{i,t} \leq P_i^{\max}, \forall i \in N, t \in T \quad (8)$$

式中： P_i^{\min} 、 P_i^{\max} 分别为火电机组 i 的出力下限和出力上限。

3) 火电机组爬坡上下限约束：

$$-\Delta P_i^{\text{down}} \leq P_{i,t+1} - P_{i,t} \leq \Delta P_i^{\text{up}}, \forall i \in N, t \in T \quad (9)$$

式中： ΔP_i^{down} 、 ΔP_i^{up} 分别为火电机组 i 的最大向下爬坡速率和最大向上爬坡速率。

4) 可再生能源发电出力上下限约束，其中允许弃风、弃光等现象的产生：

$$0 \leq R_{j,t} \leq R_{j,t}^f, \forall j \in M, t \in T \quad (10)$$

式中： $R_{j,t}^f$ 为风力、光伏机组 j 在时段 t 的预测出力。

5) 输电线路容量限制：

$$-F_l^{\max} \leq F_{l,t} \leq F_l^{\max}, \forall l \in L, t \in T \quad (11)$$

式中： L 为输电线路的集合； F_l^{\max} 为线路 l 的传输容量极限，线路的双向传输能力相等。

在直流潮流模型中，线路的传输功率可由式(12)求得：

$$F_{l,t} = \sum_{i \in N} h_{l,i} P_{i,t} + \sum_{j \in M} h_{l,j} R_{j,t} - \sum_{n \in Q} h_{l,n} D_{n,t}, \forall l \in L, t \in T \quad (12)$$

式中： $h_{l,i}$ 、 $h_{l,j}$ 、 $h_{l,n}$ 分别为线路 l 关于节点 i 、 j 、 n 的功率传输分布因子。

6) 燃气机组天然气耗量约束：

$$\sum_{i \in \Psi_m} G_{i,t} = G_{m,t} - \sum_{n \in A_m} G_{m,n,t}, \forall m \in A, t \in T \quad (13)$$

式中： Ψ_m 为国家 m 中燃气机组的集合； A_m 为与国家 m 相邻的国家集合； $G_{m,t}$ 为国家 m 在时段 t 供给的天然气的量。

7) 碳排放超量计算公式：

$$OEC_m = \max \left(0, \sum_{t \in T} \left(\sum_{i \in N_m} EC_{i,t} + \sum_{n \in A_m} EC_{m,n,t} \right) - TCE_m \right), \quad \forall m \in A, t \in T \quad (14)$$

式中： N_m 为国家 m 中火电机组的集合； TCE_m 为国家 m 在规定时段内约定的最大碳排放量。

此外，约束条件也包含公式(1) — (5)。

2 跨国电网调度分散式算法

在电力系统中，集中式调度是最为传统的调度方式，需要建立调度中心收集各调度区域的详细相关信息，统一调度各区域的机组出力。但是，在跨国电网中，各个国家为了保护自身的工业信息因素，不可能分享各自的所有电力调度所需信息，也不允许建立拥有全局调度权的调度中心。因此，本文引入分散式调度算法，将全局优化问题通过解耦过程转化为各个国家的子问题迭代求解，最终得到满足给定精度的全局最优解。

为方便叙述，首先将电力调度模型改写为紧凑形式。在3种交易中，只有电力交易要求实时平衡，而其他交易只需满足合同规定的总量约束，因此只有跨国电力联络线变量为关于国家耦合的变量，记为 \mathbf{y} ；而其他关于国家分离的变量（即除跨国电力联络线变量以外的变量）记为 \mathbf{x} 。跨国电网动态电力调度模型的紧凑形式如下：

$$\min F(\mathbf{x}) \quad (15a)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{h}(\mathbf{x}) = 0 \quad (15b)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq 0 \quad (15c)$$

$$\mathbf{s}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 0 \quad (15d)$$

$$\mathbf{r}(\mathbf{y}) \leq 0 \quad (15e)$$

式中： $F(\mathbf{x})$ 为目标函数，对应式(6)； $\mathbf{h}(\mathbf{x})=0$ 为关于分离变量的等式约束，对应式(2) — (5)、(7)、(13) — (14)； $\mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq 0$ 为关于分离变量的不等式约束，对应式(8) — (10)、(11)关于国内输电线路的部分； $\mathbf{s}(\mathbf{x}, \mathbf{y})=0$ 为关于耦合变量的等式约束，对应式(1)、(12)； $\mathbf{r}(\mathbf{y}) \leq 0$ 为关于耦合变量的不等式约束，对应式(11)关于跨国电力联络线的部分。

需要说明，式(15a) — (15c)不仅只包含分离变量，并且约束本身关于国家也是分离的，因此可以直接分配到各个国家中。

为了实现电力调度的分散式算法，需要对变量 \mathbf{y} 进行复制与分配操作。对于耦合国家 m 和 n 的变量，可以复制为 \mathbf{y}_m （属于国家 m ）和 \mathbf{y}_n （属于国家 n ）。则问题(15)可以改写为：

$$\min \sum_{m \in A} F_m(\mathbf{x}_m) \quad (16a)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{h}_m(\mathbf{x}_m) = 0, \forall m \in A \quad (16b)$$

$$\mathbf{g}_m(\mathbf{x}_m) \leq 0, \forall m \in A \quad (16c)$$

$$\mathbf{s}_m(\mathbf{x}_m, \mathbf{y}_m) = 0, \forall m \in A \quad (16d)$$

$$r_m(\mathbf{y}_m) \leq 0, \forall m \in A \quad (16e)$$

$$\mathbf{y}_m = \mathbf{y}_n, \forall m \in A, n \in A_m \quad (16f)$$

在问题(16)中,式(16a)–(16e)都是关于国家分离的约束,只有式(16f)产生了国家之间的耦合。应用交替方向乘法(alternating direction method of multipliers, ADMM),可以对式(16f)进行松弛处理,将问题(16)关于国家解耦,并转化为各个国家的子问题迭代求解,最终得到满足给定精度的最优解。在每次迭代中,各个国家的子问题按照实现约定的国家编号依次串行求解;在求解某一国家的子问题时,其他国家的变量看作参数,并取当前情况下最新的迭代值。如对于国家 m 在第 $k+1$ 次迭代的子问题,国家 1 –国家 $m-1$ 的变量取第 $k+1$ 次迭代的值,国家 $m+1$ –国家 $|A|$ 的变量取第 k 次迭代的值。由此可得到国家 m 在第 $k+1$ 次迭代的子问题为:

$$\begin{aligned} \min F_m(\mathbf{x}_m) + & \\ & \sum_{n < m, n \in A_m} \left[\lambda_{mn}^T (\mathbf{y}_m - \mathbf{y}_n^{(k+1)}) + \rho \|\mathbf{y}_m - \mathbf{y}_n^{(k+1)}\|_2^2 \right] + \\ & \sum_{n > m, n \in A_m} \left[\lambda_{mn}^T (\mathbf{y}_m - \mathbf{y}_n^{(k)}) + \rho \|\mathbf{y}_m - \mathbf{y}_n^{(k)}\|_2^2 \right] \end{aligned} \quad (17a)$$

$$\text{s.t.} \quad \mathbf{h}_m(\mathbf{x}_m) = 0 \quad (17b)$$

$$\mathbf{g}_m(\mathbf{x}_m) \leq 0 \quad (17c)$$

$$\mathbf{s}_m(\mathbf{x}_m, \mathbf{y}_m) = 0 \quad (17d)$$

$$r_m(\mathbf{y}_m) \leq 0 \quad (17e)$$

式中: λ_{mn} 为关于式(16f)的拉格朗日乘子; ρ 为关于式(16f)的二次惩罚项系数,为正实数;右上角标(k)代表变量在第 k 次迭代更新的值。

第 $k+1$ 次迭代的乘子更新过程为:

$$\lambda_{mn}^{(k+1)} = \lambda_{mn}^{(k)} + \rho(\mathbf{y}_m^{(k+1)} - \mathbf{y}_n^{(k+1)}) \quad (18)$$

最后给出问题(15)基于ADMM的分散式算法迭代步骤如下:

步骤1:任意给定各个变量与乘子的初始值。

步骤2:按照国家编号,依次求解问题(17)。

步骤3:依据式(18)更新乘子。

步骤4:判断式(16f)是否在给定精度范围内成立。若是,则迭代结束;若否,返回步骤2。

3 东北亚跨国电网案例分析

全球能源互联网以全球互联的特高压电网为骨干网架,是加快能源生产清洁化、能源消费电气化、能

源配置全球化的基础平台,可以有效推进全球能源变革转型进程。东北亚跨国电网是全球能源互联网的重要组成部分,主要包括6个国家或地区:中国华北和东北地区、蒙古、朝鲜、韩国、日本以及俄罗斯远东地区。图3给出了东北亚跨国电网的仿真算例示意图,其中的椭圆代表国家内部县市级的电网,图中简化为节点形式,共117个;细线代表国家内部电力传输线路,共165条;红色粗线代表跨国电力流,共9条;蓝色粗线代表跨国天然气流,共2条;绿色粗线代表跨国碳交易流,共4对。

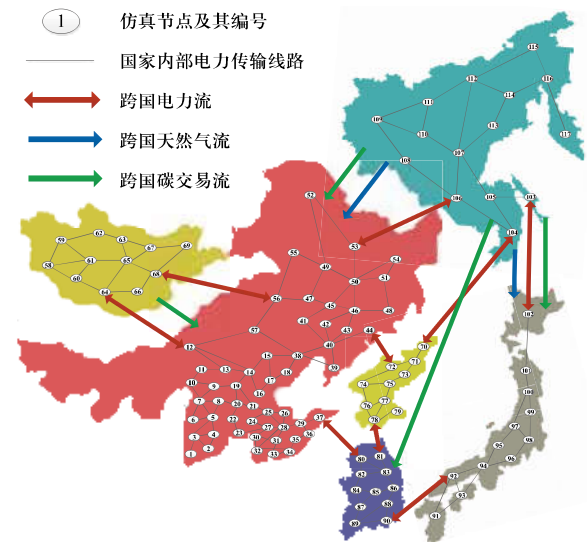


图3 东北亚跨国电网仿真算例示意图

Fig. 3 Diagram of transnational power grid simulation case in Northeast Asia

本文以东北亚跨国电网为算例进行了一年的调度仿真,将全年分为冬季和夏季两个典型场景,每个场景的调度时间为半年(4380 h),单个调度时间段长度为1 h。其中的全年负荷、电力、天然气和碳交易合同总量来源于2018年全球能源互联网发展合作组织发布的《东北亚能源互联网规划研究报告》^[20]中的2050年相关规划数据,并加以适当的处理与调整,如本文所用的夏季和冬季的负荷数据根据在不同季节的特点构造。此外,需要考虑各国间的时区差别,对原始数据进行调整。6个国家或地区间交易合同规定的交易总量如表2所示。值得注意的是,由于现在国际上对于碳排放配额的分配标准没有一个定论,因此本文所给出的数据仅供参考。碳排放的惩罚系数为1000元/t二氧化碳。

表2 六国间交易合同规定的交易量

Table 2 Contracted transaction volume among six countries

出售国家(地区)	购买国家(地区)	资源类型	年交易量
蒙古	中国东北和 华北地区	电力	14.95 TWh
中国东北 和 华北地区	蒙古	电力	2.78 TWh
中国东北 和 华北地区	朝鲜	电力	11.03 TWh
中国东北 和 华北地区	韩国	电力	3.28 TWh
韩国	中国东北 和 华北地区	电力	3.13 TWh
朝鲜	韩国	电力	14.78 TWh
韩国	日本	电力	12.28 TWh
俄罗斯远东地区	日本	电力	14.49 TWh
俄罗斯远东地区	朝鲜	电力	9.93 TWh
俄罗斯远东地区	中国东北 和 华北地区	电力	1.37 TWh
俄罗斯远东地区	中国东北 和 华北地区	天然气	$12.74 \times 10^9 \text{ m}^3$
俄罗斯远东地区	日本	天然气	$3.64 \times 10^9 \text{ m}^3$
蒙古	中国东北 和 华北地区	碳排放指标	$10.31 \times 10^6 \text{ t}$
朝鲜	中国东北 和 华北地区	碳排放指标	$0.517 \times 10^6 \text{ t}$
蒙古	韩国	碳排放指标	$5.01 \times 10^6 \text{ t}$
俄罗斯远东地区	日本	碳排放指标	$3.83 \times 10^6 \text{ t}$
俄罗斯远东地区	中国东北 和 华北地区	碳排放指标	$17.63 \times 10^6 \text{ t}$

表3中给出了集中式与分散式电力调度的求解结果,其中分散式给定的收敛精度为0.1 GW, ρ 取0.1,其他参数和变量初始值均取0。将分散式结果与作为基准的集中式结果比较可以看出,选定的机组出力误差为0.02 GW,选定的国内输电线路与跨国电力联络线潮流误差分别为0.05 GW和0.09 GW。由此可以粗略地看出,设定式(16f)的松弛误差为0.1 GW基本可以保证模型中所有变量误差均小于此值。总的来说,所提出的分散式算法可以在一定的迭代次数内得出理想的优化结果。

表4给出了夏季和冬季典型情况下有无跨国互联时的东北亚6个国家或地区的运行总成本。通过表4可

表3 集中式与分散式电力调度求解结果

Table 3 Results of centralized and distributed power dispatch

调度模式	$P_{20,1}/\text{GW}$	$F_{20-21,1}/\text{GW}$	$F_{56-68,1}/\text{GW}$	迭代次数
集中式	14.32	-5.19	14.36	—
分散式	14.30	-5.24	14.45	191

表4 夏季和冬季典型情况下东北亚地区总体运行成本

Table 4 The operation cost of the Northeast Asia in summer and winter

季节	运行成本/亿元	
	无跨国电网	有跨国电网
夏季	84.4518	73.6163
冬季	53.3947	45.5061

以看出,夏季的电网运行成本较冬季电网运行成本低,这主要是因为冬季用电量比夏季用电量低。此外,在有跨国电网的情况下,东北亚总体运行成本较无跨国电网时有所降低,这是因为跨国电网能够促进蒙古和俄罗斯远东地区可再生能源发电的消纳,明显降低了常规火电机组的发电量,从而节约了燃料成本。因此可以看出跨国电网促进了地区资源综合配置,降低了整个区域的总体运行成本。

表5、图4和图5给出了夏季和冬季典型情况下有无跨国电网时的各国弃风、弃光率和东北亚总体弃风弃光率。可以看出,在东北亚国家和地区之间进行电-气-碳综合交易后,弃风、弃光率较未连接之前有了较大幅度的下降。这是由于国家之间若无跨国电力交易,则蒙古、俄罗斯远东等地区可再生能源电力无法有效外送,而自身的低水平负荷造成了低消纳能力,只能通过弃风、弃光满足功率平衡;若东北亚地区各国电网之间有效互联,则蒙古和俄罗斯远东地区丰富的可再生能源就能够通过跨国电力联络线传输到中国东北和华北地区、韩国和日本等负荷较大的国家

表5 夏季和冬季典型情况下东北亚地区总体弃风弃光率

Table 5 The wind and solar curtailment rate of the Northeast Asia in summer and winter

季节	弃风弃光率/%	
	无跨国电网	有跨国电网
夏季	12.42	2.46
冬季	14.07	4.2

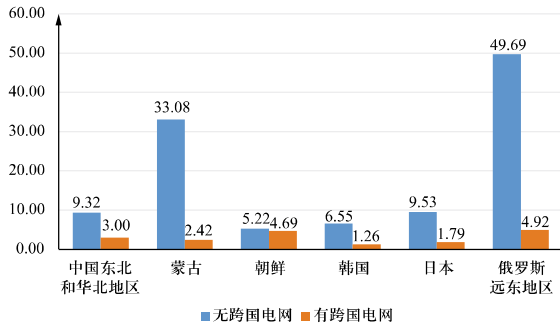


图4 夏季典型情况下东北亚各国弃风、弃光率

Fig. 4 The wind and solar curtailment rate of the countries in Northeast Asia in summer

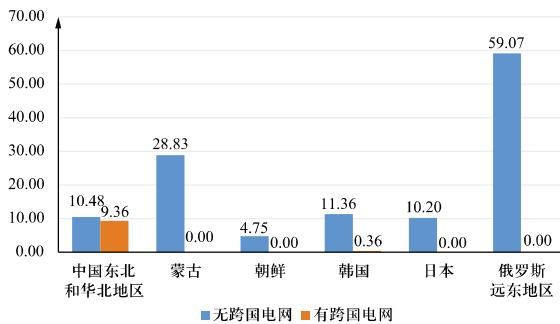


图5 冬季典型情况下东北亚各国弃风、弃光率

Fig. 5 The wind and solar curtailment rate of the countries in Northeast Asia in winter

(地区), 弃风、弃光率得以大幅降低。此外, 跨国电网互联下的运行成本较各国各地区电网独立运行情况下的运行成本低。这是由于跨国电网的存在, 促进大量可再生能源被消纳, 火电机组的出力降低, 由此整体降低了运行成本。因此, 跨国电网能够提升各个国家的新能源消纳量, 有利于实现整体的能源清洁性与经济性。

从表5可以看出夏季的可再生能源消纳量普遍较冬季要大。这是因为东北亚地区冬春风能资源较丰富, 夏季太阳能资源较丰富, 但风电装机容量和发电量比光伏发电要高。此外, 冬季总体用电量较夏季用电量低, 也会进一步造成可再生能源的冬季消纳量低于夏季。这种可再生能源与负荷的时间分布特性在交易合同签订时需加以考虑。

本文研究的东北亚跨国电网中各个国家和地区时区不同, 这种时差因素带来的影响是必须考虑的。表6即给出了夏季场景不同时差情况下跨国电网的运行成本与弃风弃光率。其中, 真实场景为现实中各地区时差, 对应“是否考虑时差”一栏“是”的情况。

“否”和“将时差扩大3倍”为虚拟场景, 分别表示各地区时差为0, 与时差比现实扩大3倍的情况, 由此来研究互联各国之间时差对调度结果的影响。根据仿真计算结果可以看出, 真实场景下无论是跨国电网运行成本还是弃风弃光率均低于时差为0的虚拟场景。而随着时差的扩大, 运行成本和弃风弃光率的降低更为明显。这是因为时差的存在使得各国间负荷曲线与可再生能源出力曲线在时间上存在错位与互补现象, 从而使得整个系统的等效负荷曲线较时差为0时更为平缓, 从而降低了总体运行成本, 并提升了可再生能源的消纳量。这说明跨国电网中各国时差的存在有利于整个系统经济清洁运行, 且横跨时区范围越大, 效果越明显。

表6 夏季不同时差对东北亚跨国电网调度结果的影响

Table 6 The impact from different time differences on dispatch results of the Northeast Asian transnational power grid in summer

是否考虑时差	运行成本/亿元	弃风弃光率/%
否	73.6416	2.48
是	73.6163	2.456
将时差扩大3倍	72.6004	1.712

表7展示了东北亚各国各地区的碳排放量指标、实际碳排放量和碳排放量指标交易情况。从电网方面可以看出, 电力负荷较大的工业发达地区, 如中国东北和华北地区、韩国和日本, 由于已分配的碳排放量指标不足以支持本国的电网排放需求, 若无碳排放指标的交易, 为了维持国内电力的正常供应, 势必会过

表7 东北亚各国各地区年碳排放量指标、排碳量及碳交易量

Table 7 The annual quantity of carbon trading, carbon-emission and its indexes of the countries and areas Northeast Asia in summer and winter

国家(地区)	碳交易量/t	碳指标/t	碳排放量/t	
			夏季	冬季
中国东北和 华北地区	28.46×10^6	172.4×10^6	101.7×10^6	74.16×10^6
蒙古	-15.32×10^6	16.38×10^6	0.647×10^6	0.412×10^6
朝鲜	-0.517×10^6	9.83×10^6	5.520×10^6	2.564×10^6
韩国	5.01×10^6	12.76×10^6	11.77×10^6	5.504×10^6
日本	3.65×10^6	31.04×10^6	17.80×10^6	8.692×10^6
俄罗斯远东 地区	-21.47×10^6	22.93×10^6	0.843×10^6	0.623×10^6

量排碳。而一旦有了碳排放指标交易的途径,通过签订合同购买其他电力负荷小的地区的碳排放指标就能够保证不超量排碳,而电力负荷小的地区也能从合同中得到资金以支持国内建设。通过跨国碳交易市场的建立,充分合理调配了区域内的碳排放资源,使得碳超排的国家无需缴纳罚金,同时电力负荷小的地区也得到了资金支持。

需要注意的是,由于在优化计算中风电和太阳能出力是预设量,即假设在计算过程中事先得到确定的可再生能源出力,因此得到的结果可能与实际情况有一些差距。后续工作将进一步改进优化模型,考虑可再生能源的不确定性以得到更加符合实际的仿真结果。

4 结论

本文建立了考虑电-气-碳综合交易的跨国电网动态电力调度模型,并提出了分散式的跨国电力调度算法以保护各国工业信息隐私。通过分析东北亚跨国电网仿真算例可以看出,跨国电网能够使地区资源集约利用综合配置,有效提高整个区域的能源利用率,提高电网运行的经济性。此外,跨国电网也能够降低整个区域和各个国家的弃风、弃光率,促进可再生能源消纳。同时,跨国碳交易机制也促进了区域内合理分配碳排放权资源,使得各个国家实现各取所需,互惠互利。

参考文献

- [1] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [2] 刘振亚. 全球能源互联网跨国跨洲互联研究及展望[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5103-5110.
Liu Zhenya. Research of global clean energy resource and power grid interconnection[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5103-5110(in Chinese).
- [3] 刘振亚. 构建全球能源互联网推动能源与环境协调发展[J]. 中国电力企业管理, 2014(23): 14-17.
- [4] 张玉红, 张彦涛, 张栋, 等. 东北亚地区跨国电力联网模式及技术可行性初步研究[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(S1): 213-221.
Zhang Yuhong, Zhang Yantao, Zhang Dong, et al. Preliminary study on transnational power networking mode and technical feasibility in Northeast Asia[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(S1): 213-221(in Chinese).
- [5] 宋卫东. 世界跨国互联网现状及发展趋势[J]. 电力技术经济, 2009, 21(5): 62-67.
Song Weidong. Present situations and development trends of the transnational interconnected electric systems[J]. Electric Power Technologic Economics, 2009, 21(5): 62-67(in Chinese).
- [6] 吴俊玲, 高超, 肖晋宇, 等. 海湾六国跨国跨洲输电方案设想及分析[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(5): 549-557.
Wu Junling, Gao Chao, Xiao Jinyu, et al. Research on the power grid interconnection scheme between GCC countries and neighboring countries[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(5): 549-557(in Chinese).
- [7] Yang Qingrun, Ding Tao, Ma Weiqiang, et al. Decentralized security-constrained economic dispatch for global energy internet and practice in Northeast Asia[C]//2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI²), November 26-28, 2017, Beijing.
- [8] 曹阳, 丁涛, 侯云婷, 等. 全球能源互联网背景下跨国电力市场长期交易模式的设计与仿真[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(S1): 242-248.
Cao Yang, Ding Tao, Hou Yunting, et al. Design and simulation for long-term transnational power transaction model in global energy interconnection[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(S1): 242-248(in Chinese).
- [9] Huang Yuchui, Li Pai, Wang Qi, et al. Research on optimal investment path of transmission corridor under the global energy Internet[J]. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2018, 121: 052063.
- [10] 黄琨, 周原冰, 曲昊源, 等. 跨国跨洲电力交易机制研究[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(S1): 234-241.
Huang Kun, Zhou Yuanbing, Qu Haoyuan, et al. The study on cross-border and cross-continent electricity trading mechanisms[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(S1): 234-241(in Chinese).
- [11] 李晓露, 宋燕敏, 唐春童, 等. 全球能源互联网的跨境电力交易市场成熟度模型研究[J]. 电力信息与通信技术, 2017, 15(3): 7-13.
Li Xiaolu, Song Yanmin, Tang Chunrong, et al. Study on cross-border electricity trading maturity model for global energy interconnection[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2017, 15(3): 7-13(in Chinese).
- [12] 央视网. 中俄签30年天然气供应协议每年供气380亿立方米[EB/OL]. (2014-05-22)[2019-06-18]. <http://news.cntv.cn/2014/05/22/ARTI1400705353261481.shtml>.
- [13] 雷立钧, 荆哲峰. 国际碳交易市场发展对中国的启示[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(4): 30-36.
Lei Lijun, Jing Zhefeng. Development of international carbon market and its enlightenment for Chinese carbon market construction[J]. China Population, Resources and Environment, 2011, 21(4): 30-36(in Chinese).
- [14] 郑宝敏, 余涛, 瞿凯平, 等. 电-气互联系统的气电解耦分

- 布式多目标优化调度[J]. 控制理论与应用, 2019, 36(3): 492-503.
- Zheng Baomin, Yu Tao, Qu Kaiping, et al. Distributed multi-objective optimization for scheduling of integrated electric and gas system based on electric and gas network decoupling[J]. Control Theory & Applications, 2019, 36(3): 492-503(in Chinese).
- [15] 张儒峰, 姜涛, 李国庆, 等. 考虑电转气消纳风电的电-气综合能源系统双层优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(19): 5668-5678.
- Zhang Rufeng, Jiang Tao, Li Guoqing, et al. Bi-level optimization dispatch of integrated electricity-natural gas systems considering P2G for wind power accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5668-5678(in Chinese).
- [16] 张晓辉, 闫柯柯, 卢志刚, 等. 基于碳交易的含风电系统低碳经济调度[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2697-2704.
- Zhang Xiaohui, Yan Keke, Lu Zhigang, et al. Carbon trading based low-carbon economic dispatching for power grid integrated with wind power system[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2697-2704(in Chinese).
- [17] 李保卫, 胡泽春, 宋永华, 等. 电力碳排放区域分摊的原则与模型[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 12-18.
- Li Baowei, Hu Zechun, Song Yonghua, et al. Principle and model for regional allocation of carbon emission from electricity sector[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 12-18(in Chinese).
- [18] 卢志刚, 刘浩然, 何良策. 计及时段粒化的电-气综合能源系统低碳经济调度[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(3): 266-276.
- Lu Zhigang, Liu Haoran, He Liangce. Low-carbon economic dispatch of integrated electricity and natural gas systems considering period granulation [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(3): 266-276(in Chinese).
- [19] 卫志农, 张思德, 孙国强, 等. 基于碳交易机制的电-气互联综合能源系统低碳经济运行[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 9-16.
- Wei Zhinong, Zhang Side, Sun Guoqiang, et al. Carbon trading based low-carbon economic operation for integrated electricity and natural gas energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 9-16(in Chinese).
- [20] 全球能源互联网发展合作组织. 东北亚能源互联网规划研究报告[R/OL]. (2018-10)[2019-07-11]. <https://www.geidco.org/research/plan/2019/925.shtml>.

收稿日期: 2019-07-04; 修回日期: 2019-10-17。



杨青润

作者简介:

杨青润 (1996), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化运行, E-mail: yqr1996@stu.xjtu.edu.cn.

丁涛 (1986), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统优化运行、综合能源系统、电力市场。通信作者, E-mail: tding15@mail.xjtu.edu.cn.

曾子彧 (1995), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化运行, E-mail: silentzeng@126.com.

宁叶 (1988), 女, 博士, 研究方向为基础设施投融资、绿色金融、国际金融, E-mail: ye-ning@geidco.org.

文亚 (1980), 男, 博士, 研究方向为能源金融、电力市场、碳金融、风险管理, E-mail: ya-wen@geidco.org.

(责任编辑 李锡)