

考虑地域优势及合作成本的增量配售电公司联盟策略

唐家俊¹, 张智¹, 杨莉¹, 崔锦瑞², 陈家庚², 林哲敏²

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027; 2. 安徽省电力交易中心有限公司, 安徽省合肥市 230061)

摘要: 在电力中长期市场中, 增量配售电公司间组建联盟能够降低其偏差考核风险、提高经营收益。在此背景下, 提出了一种考虑地域优势和合作成本的增量配售电公司联盟策略。首先, 根据配电网的物理性质和隔墙售电政策, 采用深度优先搜索算法得到满足地域相邻条件的潜在联盟全集; 然后, 构建基于交易成本理论的联盟收益模型, 提出衡量联盟成员收益分配权的收益贡献率、资源稀缺性、联盟依赖度3个指标, 以及基于指标相关性的指标权重确定法和层次分析法的改进 Shapley 值联盟收益分配方法; 最后, 提出约束成员选择联盟优先级的宽容度指标, 以及基于宽容度的增量配售电公司联盟优化算法。算例分析结果表明增量配售电公司通过联盟可以有效提高收益, 地理位置优势直接影响公司收益, 合作成本影响了联盟的规模和个体对联盟的选择。

关键词: 增量配售电公司; 合作博弈; 地域优势; 交易成本理论; 宽容度; 深度优先搜索

0 引言

近年来, 中国不断推进增量配电网改革^[1-2]。相比传统售电公司, 增量配售电公司 (incremental distribution and retail company, IDRC) 拥有所属配电网所属运营权以及分布式电源 (distributed generator, DG), 并可以通过配置可中断负荷、储能等灵活性资源, 达到平衡代理用户的电量偏差、规避市场高电价风险、消纳可再生能源的目的。

在中国现有的电力市场结算机制下, 售电公司面临着较高的偏差考核风险^[3]。DG 和负荷的双重不确定性使 IDRC 面临考核风险, 在当前环境下 IDRC 生存能力欠佳, 在国内前4批共计404家增量配电网试点中已有24家被取消试点资格^[2]。在此背景下, IDRC 间的电量互保联盟能够有效提高其生存能力, 部分省份已经出台了增量配售电公司间的电量互保政策。此外, 目前中国增量配电网多为园区级, 普遍存在灵活性资源少、抵抗风险能力低的问题。国内外一些对综合能源系统、虚拟电厂、微网^[4]等多主体合作博弈或者联合运行的研究成果, 可为增量配售电公司共享灵活性资源提供借鉴。文献^[5]中售电公司组建联盟并通过调用可中断负荷和转让购电合同来应对偏差考核。文献^[6]研究了现货市场环境下售电公司与发电厂、输配电商组建

联盟并通过跨区域购售电提高联盟整体收益的方式。文献^[7]研究了考虑差价合约的售电公司合作购电策略, 并采用 Stackelberg 模型分析了市场价格与联盟成员数量的关系。在上述文献中, 售电公司间通过偏差电量互保或购电合作等方式形成联盟, 考虑到 IDRC 具有可中断负荷和 DG 等灵活性资源, 其合作空间比一般售电公司更大, 如地域相邻的多个 IDRC 可以共享可中断负荷、DG 等资源。实际上, 除了配电网的物理特性带来的地域相邻约束外, IDRC 间能否形成有效联盟还受到联盟合作成本的影响。在联盟涉及的交易过程中, 交易双方可能会由于环境的不确定性以及有限理性, 产生信息搜寻、协商谈判、违约监督等额外成本^[8]。例如文献^[9]研究了售电公司通过合同转让降低考核费用的联盟方式, 并分析了合同转让成本对联盟收益的影响。文献^[10]研究了电量偏差互保机制下售电公司的联盟方式, 分析了合作成本的来源和影响因素。目前大多数合作联盟的研究都基于全体成员参与大联盟为最优合作方案的前提^[5-7], 将研究重点放在联盟成员的效益分摊上, 而忽视了合作成本可能导致联盟并非越大越优的问题。

此外, IDRC 参加联盟的最终目标是最大化个体利益, 由于合作成本的存在, 全体成员参与大联盟收益最高的假设未必成立, 导致一个 IDRC 面临多个联盟难以选择的问题: 一方面, IDRC 倾向于参加自身利益较高的联盟; 另一方面, IDRC 需要考虑其他成员是否愿意与其达成合作。

收稿日期: 2020-10-01; 修回日期: 2021-05-19。

上网日期: 2021-06-28。

国家重点研发计划资助项目(2016YFB0901100)。

针对上述问题,本文考虑了地域相邻对联盟可行性的作用,根据联盟规模和地域因素分析了IDRC的联盟合作成本;从IDRC对其收益具有宽容度^[11]的角度提出联盟优化算法,使IDRC潜在联盟的形成产生优先次序。

1 模型的建立

由于DG和负荷的双重不确定性,IDRC在中长期市场上的偏差考核风险较大,其购售电收益也受到两者不确定性的影响。本文以场景集合 S 描述DG出力和用户负荷需求的不确定性。

IDRC与其他市场主体的关系如图1所示,包括IDRC与发电公司签订中长期合同,向代理用户售电并购买可中断负荷,最后向电网公司买卖偏差电量以实现电力平衡。

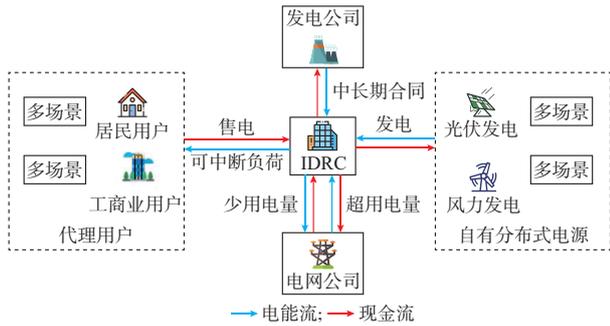


图1 IDRC与其他市场主体的关系
Fig. 1 Relationship between IDRC and other market players

第 i 家IDRC购售电优化模型的目标函数为:

$$\max \sum_{s \in S} \pi_s (R_{s,i}^L - C_i^B - C_{s,i}^P - C_{s,i}^{IL} - C_{s,i}^{DG}) \quad (1)$$

$$R_{s,i}^L = \sum_{t=1}^T \lambda^L P_{s,i,t}^L \Delta t \quad (2)$$

$$C_i^B = \sum_{t=1}^T \lambda^B P_{i,t}^B \Delta t \quad (3)$$

$$C_{s,i}^P = \sum_{t=1}^T (k^{\text{buy}} \lambda^B P_{s,i,t}^{\text{buy}} - k^{\text{sell}} \lambda^B P_{s,i,t}^{\text{sell}}) \Delta t \quad (4)$$

$$C_{s,i}^{IL} = \beta^{IL} \bar{P}_i^{IL} + \sum_{t=1}^T \lambda^{IL} P_{s,i,t}^{IL} \Delta t \quad (5)$$

$$C_{s,i}^{DG} = \sum_{t=1}^T c^{DG} P_{s,i,t}^{DG} \Delta t \quad (6)$$

式中: π_s 为场景 s 的概率; $R_{s,i}^L$ 、 C_i^B 、 $C_{s,i}^P$ 、 $C_{s,i}^{IL}$ 、 $C_{s,i}^{DG}$ 分别为第 i 家IDRC在场景 s 下的售电收入、中长期市场的购电费用、偏差电量调整费用、可中断负荷费用和DG的发电费用; T 为调度总时段数; λ^L 、 λ^B 、 λ^{IL} 、 c^{DG} 分别为第 i 家IDRC向代理用户售电的电价、中长期市场的购电电价、可中断负荷补偿价格和DG的平均发电成本; $P_{s,i,t}^L$ 、 $P_{s,i,t}^{\text{buy}}$ 、 $P_{s,i,t}^{\text{sell}}$ 、 $P_{s,i,t}^{IL}$ 、 $P_{s,i,t}^{DG}$ 分别为第 i 家

IDRC在场景 s 下时段 t 内的用户需求电量、超用电量、少用电量、向用户购买的可中断负荷电量和DG发电电量; $P_{i,t}^B$ 为第 i 家IDRC在时段 t 内的中长期市场购电分解电量; k^{buy} 和 k^{sell} 分别为超用和少用电量价格惩罚系数; \bar{P}_i^{IL} 和 β^{IL} 分别为第 i 家IDRC与用户签订的可中断负荷合同容量和容量费; Δt 为单位时段长度。

约束条件如下所示。

1)功率平衡约束

$$P_{i,t}^B + P_{s,i,t}^{\text{buy}} + P_{s,i,t}^{IL} + P_{s,i,t}^{DG} = P_{s,i,t}^L + P_{s,i,t}^{\text{sell}} \quad (7)$$

2)可中断负荷约束

$$0 \leq P_{s,i,t}^{IL} \leq \bar{P}_i^{IL} \quad (8)$$

$$0 \leq \bar{P}_i^{IL} \leq P_{i,\text{max}}^{IL} \quad (9)$$

式中: $P_{i,\text{max}}^{IL}$ 为第 i 家IDRC的代理用户可中断负荷的最大容量。

IDRC联盟的购售电优化模型与单个IDRC的购售电模型无本质区别。然而,由于IDRC在中长期市场中与发电商签订的购电合同以及与用户签订的可中断负荷容量合同的周期较长,同时售电商的信息具有私密性,因此中长期市场购电电量和可中断负荷容量应由联盟成员各自决策。对 n 家IDRC合作组建的联盟 N ,购售电优化模型中的合同购电电量和可中断负荷容量约束分别为:

$$P_{N,t}^B = \sum_{i \in N} P_{i,t}^B \quad (10)$$

$$\bar{P}_N^{IL} = \sum_{i \in N} \bar{P}_i^{IL} \quad (11)$$

式中: $P_{N,t}^B$ 为联盟 N 在时段 t 内的中长期市场总购电电量; \bar{P}_N^{IL} 为联盟 N 与用户签订的总可中断负荷容量。

2 考虑地域相邻约束和合作成本的IDRC联盟收益模型

2.1 IDRC联盟及其地域相邻约束

考虑到不同IDRC间的偏差电量曲线具有互补特性,IDRC组建合作联盟,作为整体向电网公司购买或出售超用和少用电量,同时统一调用拥有的DG和可中断负荷。内部成员通过电力交易实现偏差电量互补,从而降低联盟整体的购电成本,获得联盟收益。

与一般售电公司相比,考虑到配电网的物理特性,IDRC间的电力交易更容易在地域相邻的公司间进行,具有无须经过大电网直接开展电力交易以减少计量关口考核惩罚的优势。同时《关于开展分布式发电市场化交易试点的通知》^[12]中也规定了“分布式发电项目与电力用户进行电力直接交易,向

电网企业支付‘过网费’。交易范围首先就近实现”。因此,地域相邻的IDRC更具有形成联盟的条件。在计算联盟购售电收益前,首先需要确定联盟是否满足地域相邻条件,进而形成IDRC的潜在联盟全集。

深度优先搜索(depth-first search, DFS)算法是一种广泛应用于配电网连通性检测的图论算法^[13-14]。若将IDRC看作节点,则IDRC间的相邻关系可看作连通路径,DFS算法从图中某个节点*j*出发,依次从*j*的未被访问的相邻点出发以深度优先为原则遍历全图,直至图中所有和*j*相邻的点都被访问为止。若此时图中仍有节点未被访问,则选择图中未被访问的节点为起始点,重复上述过程,直至所有节点都被访问为止。定义由DFS算法得到的*n*家IDRC地域相邻区域集合*W*为:

$$W = \{w_1, w_2, \dots, w_j, \dots, w_{J_n}\} \quad (12)$$

式中:*J_n*为*n*家IDRC形成的地域相邻区域的数量;*w_j*为第*k*个地域相邻区域IDRC的集合。

因此,合作联盟*N*的购售电收益*R_{s,N}^{CO}*可表示为:

$$R_{s,N}^{CO} = \sum_{j=1}^{J_n} R_{s,w_j}^{CO} \quad (13)$$

式中:*R_{s,w_j}*^{CO}为场景*s*下集合*w_j*的购售电收益。

附录A图A1给出了某IDRC联盟遍历搜索算法示例。

2.2 基于交易成本理论的IDRC联盟收益模型

当IDRC组建联盟不考虑合作成本时,联盟的收益满足超可加性^[15],即联盟收益始终大于子联盟的收益和。然而,IDRC联盟中涉及成员间的信息搜寻、协商谈判、违约监督等活动^[16],随之产生相应的成本,因此计算联盟收益时需要考虑联盟合作成本。合作成本的计算方法可分为:①通过政府文件^[17]、公开数据^[18]、调查访谈^[19]等估算合作成本;②通过数学建模计算合作成本^[20-21]。考虑到目前IDRC联盟在国内较少,本文将IDRC联盟的合作成本分为事前合作成本和事后合作成本2类^[22],如图2所示。其中,协调纠纷所产生的成本为事后合作成本;协商谈判和信息搜寻所产生的成本为事前合作成本。

事前合作成本指联盟形成前,联盟成员在信息搜寻以及协商谈判等过程中产生的成本。联盟两两成员之间既需要搜寻、调研信息以核实彼此提供信息的真实性,又需要通过协商谈判等方式建立信任关系。具有*n*个成员的联盟关系网络连线总数共计 $0.5n(n-1)$,因此联盟*N*的事前合作成本近似与*n*²成正比。

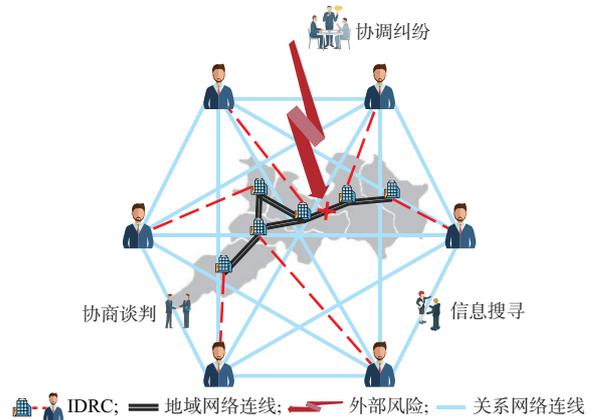


图2 IDRC联盟合作成本
Fig. 2 Cooperation costs of IDRC alliance

事后合作成本指联盟形成后,由于外部风险造成事前协议不适用,因而引起处理联盟成员利益纠纷以维持联盟关系的成本。考虑到地域相邻的个体才具有联盟的基础,因此地理位置处在中心的公司退出联盟时造成的损失较大,因此地理位置占优的公司在利益纠纷中因自利行为更为突出,而地域分布越分散的联盟用于解决纠纷的成本也越高。地域相邻的IDRC间视为拥有一条地域网络连线,定义*g_N*为联盟*N*的地域分散化程度,表示为:

$$g_N = \frac{l_n^{\max} - l_N^{\text{Geo}}}{l_n^{\max}} \quad (14)$$

$$l_n^{\max} = 3n - 6 \quad (15)$$

式中:*l_N^{Geo}*为联盟*N*的地域网络连线总数;*l_n^{max}*为具有*n*个成员联盟最大的地域网络连线数,可根据拓扑图论中的欧拉公式得到^[23]。

*g_N*越大,表明联盟*N*的地域分布越分散,联盟*N*的事后合作成本也越大。根据对IDRC联盟合作成本及对应的影响因素分析,场景*s*下联盟*N*的合作成本*C_{s,N}^{TC}*可表示为:

$$C_{s,N}^{TC} = k_1^C n^2 + k_2^C g_N \quad (16)$$

式中:*k₁^C*和*k₂^C*分别为事前合作成本和事后合作的成本系数,可以通过调研等方式得到^[10]。

综上,计及合作成本的IDRC联盟收益*R_{s,N}^{AL}*可表示为:

$$R_{s,N}^{AL} = R_{s,N}^{CO} - \sum_{i \in N} R_{s,i} - C_{s,N}^{TC} \quad (17)$$

式中:*R_{s,i}*为第*i*家IDRC在场景*s*下独立决策的最大购售电收益。

3 联盟收益分配方法

Shapley值法是一种常用于解决合作联盟成本分摊和收益分配的方法,其要求联盟满足对称性、有

效性、冗员性和可加性^[24]。本文所考虑的地域相邻约束和合作成本主要影响IDRC联盟收益,联盟仍然满足上述性质。然而,传统的Shapley值法侧重于解决某一固定联盟的收益分配问题,而本文的联盟策略建立在非固定联盟的基础上,除了成员对联盟收益的贡献率外,还需要考虑个体在联盟中的不可替代性和对联盟的依赖程度等因素对收益分配的影响。因此,本文提出收益贡献率、资源稀缺性和联盟依赖度3个指标来衡量IDRC在联盟收益分配时的话语权,采用指标相关性的指标权重确定(criteria importance through intercriteria correlation, CRITIC)法和层次分析(analytic hierarchy process, AHP)法对指标进行组合赋权以实现传统Shapley值法的改进,进而得到个体在联盟中的收益分配权重。

3.1 IDRC联盟收益分配指标

3.1.1 收益贡献率

Shapley值法将个体对联盟总收益的边际贡献的大小作为个体分配的依据,是最常用的联盟收益分配经济学方法^[24]。第*i*家IDRC在联盟*N*中的Shapley值收益分配结果 $X_{s,i,N}^L$ 表示为:

$$X_{s,i,N}^L = \sum_{K \subset N} \frac{(|K|-1)!(n-|K|)!}{n!} (R_{s,K}^{AL} - R_{s,K-i}^{AL}) \quad (18)$$

式中: K 为虚拟联盟, $|K|$ 为虚拟合作联盟中成员的个数; $R_{s,K}^{AL}$ 和 $R_{s,K-i}^{AL}$ 分别为第*i*家IDRC加入和未加入虚拟合作联盟*K*后的收益。

第*i*家IDRC在联盟*N*中的收益贡献度指标 I_i^{BJ} 可用其Shapley值收益分配结果占联盟总收益比例来衡量,即:

$$I_i^{BJ} = \frac{\sum_{s \in S} \pi_s X_{s,i,N}^L}{\sum_{s \in S} \pi_s R_{s,N}^{AL}} \quad (19)$$

3.1.2 资源稀缺性

IDRC联盟收益除了来源于成员间的电力交易互补,还来源于可中断负荷等灵活性资源的共享,显然IDRC的可中断负荷量会影响其在联盟收益分配中的地位。根据Hamel和Prahalad提出的资源依赖理论,联盟成员间的资源依赖关系决定了其收益分配权,而资源稀缺性是影响联盟对该资源依赖程度的决定性因素^[25]。IDRC拥有的灵活性资源的稀缺程度越高,其在联盟中的不可替代程度越高,在收益分配谈判时就处于越有利的地位。

第*i*家IDRC在场景*s*下的资源稀缺评价系数 $A_{s,i}$ 用以衡量其资源在联盟中的稀缺程度, $A_{s,i}$ 越

大,第*i*家IDRC提供稀缺资源的能力越强,将获得越大比例的联盟分配收益,其表示为:

$$A_{s,i} = \frac{\sum_{t=1}^T \tau_{s,N,t} A_{s,i,t}}{\sum_{i \in N} A_{s,i,t}} \quad (20)$$

$$A_{s,i,t} = \begin{cases} \bar{P}_i^{ll} & \bar{P}_i^{ll} - P_{s,i,t}^{net} > \bar{P}_i^{ll} \\ \bar{P}_i^{ll} - P_{s,i,t}^{net} & 0 \leq \bar{P}_i^{ll} - P_{s,i,t}^{net} \leq \bar{P}_i^{ll} \\ 0 & \bar{P}_i^{ll} - P_{s,i,t}^{net} < 0 \end{cases} \quad (21)$$

$$P_{s,i,t}^{net} = P_{s,i,t}^L - P_{i,t}^B - P_{s,i,t}^{DG} \quad (22)$$

式中: $\tau_{s,N,t}$ 为联盟*N*在场景*s*下时段*t*内是否调用可中断负荷的0-1系数,当 $P_{s,N,t}^{ll} > 0$ 时, $\tau_{s,N,t} = 1$,否则 $\tau_{s,N,t} = 0$; $A_{s,i,t}$ 为第*i*家IDRC在场景*s*下时段*t*内的负荷可调节能力; $P_{s,i,t}^{net}$ 为第*i*家IDRC在场景*s*下时段*t*内的净负荷需求量。

第*i*家IDRC的资源稀缺性指标 I_i^{XQ} 可表示为:

$$I_i^{XQ} = \frac{\sum_{s \in S} \pi_s A_{s,i}}{\sum_{s \in S} \pi_s \sum_{i \in N} A_{s,i}} \quad (23)$$

3.1.3 联盟依赖度

在实际市场中,部分资产规模小、风险抵御能力弱的IDRC由于其代理用户体量少,偏差考核风险大,通过联盟合作的方式能够极大地降低购电成本、提高自身收益水平,对组建合作联盟的积极性强;相比之下,资产规模大、风险抵御能力强的IDRC则对合作的积极性较弱。从博弈论角度对IDRC的联盟策略进行分析,认为资产规模大的IDRC更有可能存在占优对策^[26],在联盟谈判中表现为较强的议价能力,当分配收益达不到其目标时有可能拒绝参与联盟。

定义IDRC对合作联盟*N*的依赖度指数为 $D_{i,N}$,第*i*家IDRC对联盟*N*的依赖程度越低,则 $D_{i,N}$ 越大,在合作谈判时可以为自身争取更多收益,其可表示为^[10]:

$$D_{i,N} = e^{-\mu \frac{(X_{i,N}^{LE})^2}{R_i}} \quad (24)$$

$$X_{i,N}^{LE} = \sum_{s \in S} \pi_s X_{s,i,N}^L \quad (25)$$

式中: μ 为IDRC联盟依赖度参数; $X_{i,N}^{LE}$ 为采用Shapley值法得到的第*i*家IDRC的联盟收益分配期望; R_i 为第*i*家IDRC独立决策的购售电收益。

定义第*i*家IDRC的联盟依赖度收益分配指标 I_i^{YL} 为:

$$I_i^{YL} = \frac{D_{i,N}}{\sum_{i \in N} D_{i,N}} \quad (26)$$

该指标反映了个体对联盟的依赖度的相对值, I_i^{YL} 越大,第*i*家IDRC对联盟的依赖性越低,在联盟

谈判中的地位也越高。

3.2 联盟收益分配结果

组合赋权法将主观与客观权重相结合,可以有效避免主观赋权法的经验局限性和客观赋权法的唯数据局限性^[27]。本文拟采用客观CRITIC法^[28]来衡量不同指标的数据对比度与冲突性,同时采用主观AHP法^[29]反映不同指标在联盟收益分配实际问题中的主观重要性,对本文提出的3个联盟收益分配指标进行赋权。

由CRITIC法和AHP法分别得到收益分配指标*h*的评价权重 ω_h^{CRI} 和 ω_h^{AHP} 分别为:

$$\omega_h^{CRI} = \frac{\sigma_h \sum_{q=1}^H (1 - r_{h,q})}{\sum_{h=1}^H \sigma_h \sum_{q=1}^H (1 - r_{h,q})} \quad (27)$$

$$\omega_h^{AHP} = \frac{\sum_{q=1}^H Z_{h,q}^E}{\sum_{h=1}^H \sum_{q=1}^H Z_{h,q}^E} \quad (28)$$

式中:*H*为指标总数; σ_h 为第*h*个指标的标准差; $r_{h,q}$ 为第*h*个指标与第*q*个指标的相关系数; $Z_{h,q}^E$ 为通过专家打分的形式体现第*h*个指标与第*q*个指标的重要性,进而采用1~9标度法构建满足一致性的相对重要程度判断矩阵。

在此基础上得到*H*个指标下基于CRITIC法和AHP法的收益分配指标*h*的综合权重 ω_h^{Com} 为:

$$\omega_h^{Com} = \frac{\omega_h^{CRI} \omega_h^{AHP}}{\sum_{h=1}^H \omega_h^{CRI} \omega_h^{AHP}} \quad (29)$$

在收益贡献率、资源稀缺性和联盟依赖度3个收益分配指标下,第*i*家IDRC的联盟收益分配系数 v_i 可表示为:

$$v_i = I_i^{BJ} \omega_1^{Com} + I_i^{XQ} \omega_2^{Com} + I_i^{YL} \omega_3^{Com} \quad (30)$$

式中: ω_1^{Com} 、 ω_2^{Com} 、 ω_3^{Com} 分别为收益贡献率、资源稀缺性和联盟依赖度指标的综合权重。

综上,第*i*家IDRC在合作联盟*N*中的改进Shapley值收益分配结果 $R_{i,N}$ 可表示为:

$$R_{i,N} = \frac{v_i}{\sum_{i \in N} v_i} \sum_{s \in S} \pi_s R_{s,N}^{AL} \quad (31)$$

4 基于宽容度的IDRC联盟优化算法

由于IDRC联盟具有合作成本,因此联盟成员数量的增加可能导致联盟合作成本的增加,从而使联盟总收益下降。加入全员参与的大联盟未必是IDRC的最优选择。IDRC在选择合作联盟时应以

自身利益最大化为目标,充分考虑其在联盟中的收益分配结果。定义第*i*家IDRC对于联盟 N_j ($N_j \subset N$)的收益满意度 U_{i,N_j} 为:

$$U_{i,N_j} = \frac{R_{i,N_j} - R_{i,N_j}^{\min}}{R_{i,N_j}^{\max} - R_{i,N_j}^{\min}} \quad (32)$$

式中: N_i^{\max} 和 N_i^{\min} 分别为第*i*家IDRC在其可选择的潜在联盟中取得最大、最小分配收益的合作联盟; R_{i,N_j} 、 R_{i,N_j}^{\max} 、 R_{i,N_j}^{\min} 分别为第*i*家IDRC对于联盟 N_j 、 N_i^{\max} 、 N_i^{\min} 的收益。

U_{i,N_j} 越大表示第*i*家IDRC对于联盟 N_j 的收益分配结果越满意。在现实生活中,未必存在一个联盟满足所有成员的利益最大化,导致联盟难以形成。本文引入多目标优化中的宽容度^[11]概念解决该联盟选择问题,定义宽容度 δ 为IDRC愿意接受的收益满意度最低的联盟在所有联盟中的排序。在考虑宽容度的情况下,IDRC不再只追求自身收益最大的联盟,而愿意接受收益更低的联盟以促进联盟形成,如 $\delta=3$ 时,表示IDRC愿意接受收益满意度排名前3的联盟。

针对某区域内的IDRC联盟的优化算法流程如附录A图A2所示,其具体步骤如下。

步骤1:采用DFS算法,即根据式(12)和式(13)确定区域内所有IDRC潜在联盟。

步骤2:由式(1)至式(9)计算个体独自决策的购售电收益;由式(1)至式(11)计算联盟整体的购售电收益;由式(14)和式(15)计算联盟的合作成本。

步骤3:由式(17)和式(18)计算所有潜在联盟中各成员收益贡献率;由式(19)至式(22)计算资源稀缺性;由式(23)至式(25)计算联盟依赖度指标,并由3个指标定量评估IDRC在收益分配中的话语权。

步骤4:采用CRITIC法和AHP法,即根据式(26)至式(29)对指标进行组合赋权,进而由式(30)得到联盟的收益分配情况。

步骤5:由式(31)计算IDRC对各潜在联盟的联盟收益满意度。

步骤6:初始宽容度 δ 设为1,不断提高宽容度直到存在某一或多个联盟满足其内部所有成员的利益诉求为止。若存在多个联盟的情况,则认为其中收益满意度平均值最大的联盟为当前阶段的最优联盟。

步骤7:排除所有已经形成联盟的IDRC,重复步骤5和6,直到剩余公司无法形成新的联盟为止。

5 算例分析

某地区IDRC地域分布如图3所示,通过梳理国内增量配电网示范工程,将IDRC分为3类:Ⅰ类IDRC的DG出力高,负荷需求量相对较低,可中断负荷资源最少;Ⅱ类IDRC的负荷需求量最大,DG出力和可中断负荷资源相对较少;Ⅲ类IDRC的DG出力与负荷需求量较接近且具有最多的可中断负荷资源。图3中*a,b,c,d,e,f*为6家IDRC,其中公司*a*和*e*为Ⅰ类IDRC,公司*c*和*f*为Ⅱ类IDRC,公司*b*和*d*为Ⅲ类IDRC。各类IDRC的DG、用户构成以及可中断负荷容量的最大值如附录A表A1所示;多场景下风电、光伏的典型出力曲线分别如附录A图A3、图A4所示,居民、工商业用户的典型用电曲线分别如附录A图A5、图A6所示;IDRC购售电价格参数见附录A表A2;其他参数见附录A表A3。

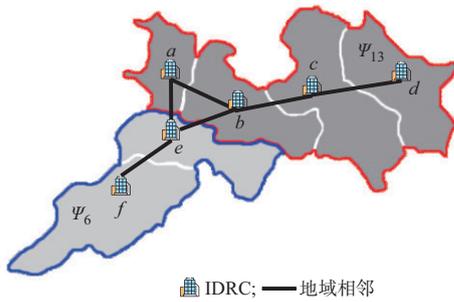


图3 某区域内IDRC地域分布
Fig. 3 Regional distribution of IDRC in a certain area

5.1 区域内联盟优化结果

采用DFS法确定该区域内的IDRC潜在联盟共有21个,表1为各潜在联盟中IDRC的联盟收益满意度情况。根据考虑宽容度的IDRC联盟优化算法得到:在 $\delta=5$ 时,公司*a*至*d*率先形成联盟;剩余的公司*e*和*f*在没有其他选择的情况下形成联盟。以公司*c*为例,由于地理位置限制,公司*c*可参与的联盟共有13个,其中公司*c*在联盟 $\Psi_{18}=\{a,b,c,d,e\}$ 中获得的收益最高,但公司*e*在 Ψ_{18} 中获得的收益却很低(收益满意度仅为0.42,在公司*e*可参与的所有联盟中排序第12),因此联盟 Ψ_{18} 难以形成。同理可知,当所有公司只愿意参加自身收益最大的联盟时,不存在任何一个联盟满足所有成员的利益诉求,为促进联盟的形成,各公司只能降低对收益的要求。当 δ 分别为2、3、4时,仍然没有联盟满足形成条件,直到所有公司愿意接受收益满意度排序前5的联盟时, Ψ_{13} 满足公司*a*至*d*这4家公司的利益诉求(公司*a*至*d*这4家公司组成IDRC对 Ψ_{13} 的收益满意度排序分别为1、5、4、4),因此联盟 Ψ_{13} 优先形成。联盟

Ψ_{13} 形成后,联盟 Ψ_6 成为公司*e*和*f*的唯一联盟选择。最终,该区域内形成 $\Psi_6=\{e,f\}$ 和 $\Psi_{13}=\{a,b,c,d\}$ 2个联盟,其宽容度分别为1和5。

公司*a*至*f*通过合作联盟的方式增加的购售电收益与原收益的比值分别为11.34%、11.39%、16.31%、9.96%、13.45%、11.72%,购售电收益得到了有效提升。在联盟 Ψ_{13} 中,公司*b*的收益高于同为Ⅲ类IDRC公司*d*。从图3可以看出,在联盟 Ψ_{13} 中公司*b*的地理位置比公司*d*更靠近联盟中心,其可以选择的联盟数量也多于公司*d*。由表1可以明显看出公司*b*可参与的联盟共有17个,而公司*d*能参加的联盟仅有7个,因此公司*b*的地理位置比公司*d*更具有优势,获得的收益也更高。

表1 IDRC的联盟收益满意度
Table 1 Satisfaction degree of alliance revenue for IDRC

联盟	联盟成员收益满意度						δ
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	
Ψ_1	0.72	0.14					
Ψ_2	0.00				0.00		
Ψ_3		0.28	0.11				
Ψ_4		0.14			0.44		
Ψ_5			0.11	1.00			
Ψ_6						0.75	1
Ψ_7	0.96	0.91	0.56				
Ψ_8	0.29	0.22			0.18		
Ψ_9	0.38				0.77	1.00	
Ψ_{10}		0.05	0.65	0.00			
Ψ_{11}		0.91	0.38		0.58		
Ψ_{12}		0.21			1.00	0.72	
Ψ_{13}	1.00	0.62	0.79	0.67			5
Ψ_{14}	0.63	1.00	0.43		0.38		
Ψ_{15}	0.62	0.35			0.10	0.82	
Ψ_{16}		0.62	0.79	0.66	0.61		
Ψ_{17}		0.48	0.00		0.81	0.00	
Ψ_{18}	0.69	0.49	1.00	0.86	0.42		
Ψ_{19}	0.70	0.78	0.11		0.72	0.22	
Ψ_{20}		0.00	0.53	0.62	0.89	0.04	
Ψ_{21}	0.73	0.58	0.74	0.98	0.77	0.15	

5.2 地域优势对联盟形成和收益分配的影响

为分析地域优势对联盟形成的影响,构建一种极端地域分布情况,该情况下所有公司均只与2家公司地域相邻,如附录B图B1所示。附录B表B1给出了该情况下各IDRC的联盟收益满意度情况,结果显示该区域内形成全员参与大联盟 $\Psi_{21}=\{a,b,c,d,e,f\}$,其宽容度 $\delta=4$ 。以公司*b*为例,在

图3所示的情况下,公司**b**由于其地域优势在 $\Psi_{13} = \{a, b, c, d\}$ 中的分配收益较高;而公司**b**在附录B图B1所示的情况下失去地域优势,事实上,该情况下各IDRC的地域优势基本相同,因此最终形成联盟 Ψ_{21} 。

图4为在2种地域分布情况下,联盟 Ψ_{21} 中各成员的个体分配收益情况。从图4中可以看出,在地域分布较为均匀情况下(见附录B图B1),由于同类公司在DG发电电量、负荷需求曲线等方面相似,其各收益分配指标均相同,个体分配收益也相等。但在地域分布不均匀的情况下(见图3),各IDRC的地域优势有着较大的差异,因此同类型IDRC的分配收益不相同。以同为I类IDRC的公司**a**和公司**e**为例,公司**e**的联盟收益比公司**a**高了约50%,这主要是因为当公司**e**退出联盟时,公司**f**由于地理位置限制无法参与合作;而当公司**a**退出联盟时,没有其他成员被迫退出,所以公司**e**的地理位置优势使其拥有比公司**a**更高的联盟收益贡献率。因此,联盟成员的地理位置越占优,退出联盟带来的损害越大,收益贡献率指标也越大,个体分配收益越高。

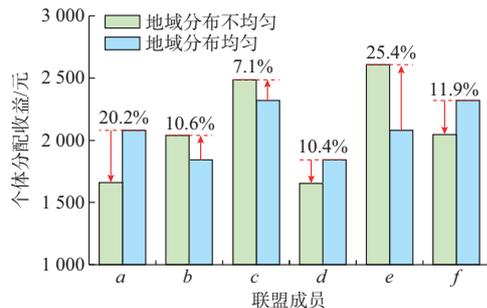


图4 联盟成员的个体分配收益

Fig. 4 Allocated revenue of each member in alliance

此外,从图4可以看出,I类IDRC在地域分布情况发生变化时收益波动明显大于II和III类IDRC,这主要是因为各类IDRC对地域优势的敏感程度不同。对于三类IDRC两两合作的收益,I和III类公司的合作收益最小,I和II类公司的合作收益最大。这是因为II类IDRC负荷需求量大,DG出力小,而I类IDRC具备丰富的分布式可再生能源,III类IDRC具有较大的可中断负荷容量,所以I、II或II、III类公司合作均能获得较高的收益(见附录B表B2)。对I类公司而言,与II类公司合作能获得明显高于与III类公司合作的收益(收益差为1280.53元),因此当I类公司拥有地域优势时,能够更好地选择合作伙伴以获得更高的收益。相比之下,II和III类公司在面对不同的合作伙伴时,收益差较小(分别为679.87元和607.92元),地域优势对其收益的影响也较小。因此,对合作伙伴选择越敏感

的公司,地域优势对其收益的影响也越大。

5.3 合作成本对联盟形成的影响

合作成本对IDRC联盟收益有着较大的影响,也将间接影响IDRC对联盟的选择策略。随着合作成本的减小,该区域形成的联盟从小联盟逐步转变为大联盟:当合作成本较大时($k_1^c = 150, k_2^c = 600$),形成联盟 $\Psi_6 = \{e, f\}$ 和 $\Psi_7 = \{a, b, c\}$,公司**d**无法参与联盟;当合作成本减小后($k_1^c = 100, k_2^c = 400$),形成联盟 $\Psi_6 = \{e, f\}$ 和 $\Psi_{13} = \{a, b, c, d\}$;当合作成本进一步减小后($k_1^c = 50, k_2^c = 200$),最终形成大联盟 $\Psi_{21} = \{a, b, c, d, e, f\}$ (不同合作成本下联盟的形成情况如附录B图B2所示)。这主要是因为:合作成本减小时,由于合作成本与联盟成员数量呈正相关,因此成员数量越多的联盟合作成本减小得越多,联盟收益也相对增加得越多,IDRC对大联盟的收益满意度相对上升。综上,合作成本越小,IDRC越倾向于参加大联盟。

此外,偏差考核力度对联盟收益有着直接影响。IDRC超用电量按市场平均电价乘以 k^{buy} ($k^{buy} > 1$)结算,多余电量按市场平均电价乘以 k^{sell} ($k^{sell} < 1$)出售。 k^{buy} 越大、 k^{sell} 越小,意味着偏差考核力度越大。在合作成本一定的情况下,随着偏差考核力度的增大,区域内形成的联盟由小联盟逐步转变为大联盟(见附录B图B3)。这主要是因为当偏差考核力度增大时,IDRC通过联盟获得的收益变大,联盟的合作成本相对变小,对于成员数量越多的大联盟,收益增加得越多。当偏差考核力度较大时,即使联盟的合作成本较高,IDRC仍然会组建大联盟。

6 结语

IDRC由于DG和负荷的双重不确定性面临着更高的偏差考核风险,但其在市场环境下具有一定的自主灵活性,可通过调用可中断负荷等多种方式提高购售电收益。本文研究了IDRC通过合作实现偏差电量互补、提高可中断负荷利用率以提高经营收益的联盟方式。首先,构建了计及DG和可中断负荷的单个IDRC和IDRC联盟购售电模型;其次,采用DFS法确定满足地域相邻条件的IDRC潜在联盟;再次,基于交易成本理论构建了IDRC联盟收益模型,进而提出衡量联盟成员收益分配话语权的收益贡献率、资源稀缺性、联盟依赖度3个指标,并采用基于CRITIC法和AHP法的改进Shapley值法实现联盟收益分配;最后提出一种基于宽容度的IDRC联盟优化算法求解区域内的联盟形成情况。算例分析结果表明地域优势和合作成本直接影响联盟形成和收益分配;地理位置的优势可以使IDRC

获得更高的联盟收益份额;对合作伙伴的选择越敏感的公司,地域优势对其收益的影响也越大;合作成本越低,偏差考核力度越大,IDRC越倾向于参加大联盟。本文算法为IDRC选择联盟对象以及电力市场机制设计提供了定量依据。增量配电网的调度涉及源荷储的协调,本文尚未将储能、可转移或可削减负荷引入IDRC购售电模型,未来将考虑更多类型的灵活性资源以提升模型的适用性。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参 考 文 献

- [1] 陈立,王蓓蓓,黄俊辉,等.电网公司保底服务实施后的增量配电网投资策略[J].电力系统自动化,2018,42(20):38-44.
CHEN Li, WANG Beibei, HUANG Junhui, et al. Asset investment strategy adapting default service of incremental distribution network for grid companies [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(20): 38-44.
- [2] 中国能源研究会中小型配电企业发展战略研究中心.增量配电网发展研究白皮书2019[R].2019.
China Energy Research Society Development Strategy Research Center for Small and Medium-sized Distribution Enterprises. White paper for incremental power distribution development research in 2019[R]. 2019.
- [3] 广东电力交易中心.广东电力市场2018年半年报告[R/OL]. [2020-01-23].http://www.sohu.com/a/245004086_654453.
Guangdong Power Exchange Center. Semi-annual report of Guangdong electricity market in 2018 [R/OL]. [2020-01-23]. http://www.sohu.com/a/245004086_654453.
- [4] 李鹏,吴迪凡,李雨薇,等.基于谈判博弈的多微网综合能源系统多目标联合优化配置[J/OL].电网技术[2020-10-12].
<https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0289>.
LI Peng, WU Difan, LI Yuwei, et al. A multi-objective union optimal configuration strategy for multi-microgrid integrated energy system considering bargaining game [J/OL]. Power System Technology [2020-10-12]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0289>.
- [5] 杨阳方,刘继春.计及电量互保策略的售电公司两阶段日前决策方法[J].电力系统自动化,2017,41(24):120-128.
YANG Yangfang, LIU Jichun. Two-stage decision-making method of retailers considering power transfer strategy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 120-128.
- [6] PENG X, TAO X M. Cooperative game of electricity retailers in China's spot electricity market[J]. Energy, 2018, 145: 152-170.
- [7] 张晨,韩新阳,白翠粉,等.基于合作博弈的电力市场模式下售电商购电策略模型[J].中国电力,2017,50(6):177-184.
ZHANG Chen, HAN Xinyang, BAI Cuifen, et al. Purchasing strategy model for power supplier based on the cooperative game theory in an open electricity market [J]. Electric Power, 2017, 50(6): 177-184.
- [8] COASE R H. The nature of the firm [J]. Economica, 1937, 4(16): 386-405.
- [9] 谭忠富,王冠,李鹏,等.市场环境下的售电商合作博弈研究[J].中国电力,2017,50(4):45-51.
TAN Zhongfu, WANG Guan, LI Peng, et al. Research on cooperative game of electricity providers under the market environment [J]. Electric Power, 2017, 50(4): 45-51.
- [10] ZHANG Z, JIANG Y C, LIN Z Z, et al. Optimal alliance strategies among retailers under energy deviation settlement mechanism in China's forward electricity market [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3): 2059-2071.
- [11] 姚建刚,付强,叶伦,等.考虑峰谷分时电价影响的变电站容量规划方法[J].电力系统自动化,2017,41(13):53-61.
YAO Jiangang, FU Qiang, YE Lun, et al. Substation capacity planning method considering influence of peak-valley time-of-use power price [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 53-61.
- [12] 国家发展改革委,国家能源局.关于开展分布式发电市场化交易试点的通知[R].2017.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Notice on launching pilot projects of distributed power generation market-oriented transactions [R]. 2017.
- [13] 陶华,杨震,张民,等.基于深度优先搜索算法的电力系统生成树的实现方法[J].电网技术,2010,34(2):120-124.
TAO Hua, YANG Zhen, ZHANG Min, et al. A depth-first search algorithm based implementation approach of spanning tree in power system [J]. Power System Technology, 2010, 34(2): 120-124.
- [14] 徐成司,董树锋,孙洲,等.基于网络简化和深度优先遍历的配电网路径搜索算法[J].电力系统自动化,2017,41(24):170-176.
XU Chengsi, DONG Shufeng, SUN Zhou, et al. A path searching algorithm for distribution network based on network simplification and depth first traversal [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 170-176.
- [15] HU Z Y, CHEN L, GAN D Q, et al. Allocation of unit start-up costs using cooperative game theory [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 653-662.
- [16] MCCANN L, COLBY B, EASTER K W, et al. Transaction cost measurement for evaluating environmental policies [J]. Ecological Economics, 2005, 52(4): 527-542.
- [17] FALCONER K, SAUNDERS C. Transaction costs for SSSIs and policy design [J]. Land Use Policy, 2002, 19(2): 157-166.
- [18] JOHN J W, DOUGLASS N. Measuring the transaction sector in the American economy, 1870-1970 [M]. Cambridge, USA: National Bureau of Economic Research Incorporation, 1986: 95-162.
- [19] HEARNE R R, EASTER K W. Water allocation and water markets: an analysis of gains-from-trade in Chile [J/OL]. World Bank Technical Paper [2020-01-12]. https://www.researchgate.net/publication/5078181_Water_Allocation_and_Water_Markets_An_Analysis_of_Gains-from-Trade_in_Chile.
- [20] LOBO M S, FAZEL M, BOYD S. Portfolio optimization with linear and fixed transaction costs [J]. Annals of Operations Research, 2007, 152(1): 341-365.
- [21] POTAPTCHIK M, TUNCEL L, WOLKOWICZ H. Large

- scale portfolio optimization with piecewise linear transaction costs[J]. *Optimization Methods & Software*, 2008, 23(6): 929-952.
- [22] 威廉姆森. 资本主义经济制度[M]. 段毅才, 王伟, 译. 北京: 商务印书馆, 2017.
WILLIAMSON O E. *Economic institutions of capitalism* [M]. DUAN Yicai, WANG Wei, trans. Beijing: The Commercial Press, 2017.
- [23] WILSON P R. Euler formulas and geometric modeling [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1985, 5(8): 24-36.
- [24] FENG C S, WEN F S, YOU S, et al. Coalitional game-based transactive energy management in local energy communities [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(3): 1729-1740.
- [25] HAMEL G P, PRAHALAD C K. Competing for the future [J]. *Harvard Business Review*, 1994, 72(4): 122-128.
- [26] LEYTON-BROWN K, SHOHAM Y. *Essentials of game theory: a concise multidisciplinary introduction* [M]. 82 Wintersport Ln Williston, USA: Morgan & Claypool, 2008: 1-88.
- [27] 潘险, 余梦泽, 隋宇, 等. 计及多关联因素的电力行业碳排放权分配方案[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(1): 35-42.
PAN Xianxian, YU Mengze, SUI Yu, et al. Allocation scheme of carbon emission rights for power industry considering multiple correlated factors [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(1): 35-42.
- [28] 罗志刚, 韦钢, 朱兰, 等. 含分布式电源的城市配电网交直流改造方案综合决策[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(11): 87-94.
LUO Zhigang, WEI Gang, ZHU Lan, et al. Comprehensive decision on AC/DC transformation scheme of urban distribution network with distributed generator [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(11): 87-94.
- [29] 修晓青, 唐巍, 李建林, 等. 基于层次分析法的储能配置综合评估技术[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(11): 72-78.
XIU Xiaqing, TANG Wei, LI Jianlin, et al. Comprehensive evaluation technology of energy storage configuration based on analytic hierarchy process [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(11): 72-78.
-
- 唐家俊(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力市场与电力经济。E-mail: ee_tangjiajun@zju.edu.cn
张智(1994—), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 电力市场与电力经济、需求侧响应。E-mail: zhangzhi_ee@zju.edu.cn
杨莉(1974—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 电力市场、电力系统运行与规划、电力经济。E-mail: eeyangli@zju.edu.cn

(编辑 顾晓荣)

Alliance Strategy for Incremental Distribution and Retail Companies Considering Geographical Advantage and Cooperation Cost

TANG Jiajun¹, ZHANG Zhi¹, YANG Li¹, CUI Jinrui², CHEN Jiageng², LIN Zhemin²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Anhui Power Exchange Center Co., Ltd., Hefei 230061, China)

Abstract: In the medium- and long-term electricity market, the formation of alliances among incremental distribution and retail companies can reduce the risk of deviation assessment and increase the operating revenue. On this background, the alliance strategy for incremental distribution and retail companies considering the geographical advantage and cooperation cost is proposed. Firstly, according to the physical properties of the distribution network and the partition-wall power sale policy, a depth-first search algorithm is adopted to obtain a complete set of potential alliances that meet the conditions of geographic proximity. Secondly, an alliance revenue model based on the transaction cost theory is built, and three indicators, which are revenue contribution rate, resource scarcity, and an alliance dependence, are proposed to evaluate the revenue allocation right of members, as well as an improved Shapley value method based on the criteria importance through intercriteria correlation (CRITIC) method and analytic hierarchy process (AHP) method is proposed. Finally, a forbearance index is proposed to restrict the members to choose the priority of the alliances, and the alliance optimization algorithm of incremental distribution and retail companies based on the forbearance is proposed. The analysis results of calculation examples show that the incremental distribution and retail companies can effectively increase the revenue through the alliance, the geographical advantage directly affects the revenues of companies, and the cooperation cost affects the size of the alliance and the choices of each member in the alliance.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2016YFB0901100).

Key words: incremental distribution and retail company; cooperative game; geographical advantage; transaction cost theory; forbearance; depth-first search

