

互联电网中电力交易的合作对策模型

王先甲, 李湘姣

(武汉水利电力大学水资源与河流工程系, 武汉 430072)

摘要: 分析了互联电网的特点和问题后, 指出统一调度与互联电网中的利益主体之间存在矛盾特性, 以及统一调度是互联电网最大效益实现的基础。为促进互联电网最大效益的实现, 建立了互联电网的合作对策模型, 并采用 Shapley 值分配各联网成员间的效益。互联电网中各区域网间的理性交换电能量由统一调度确定, 效益分配和交易电价由 Shapley 值确定。算例计算结果表明采用这种对策模型和效益分配方法, 能促使各区域网在电力交易中充分合作, 从而实现整个网络优化运行。

关键词: 互联电网; 统一调度; 合作对策; Shapley 值; 分配规则

中图分类号: TM 73; F 123. 9; O 225

0 引言

随着电力系统规模的不断扩大和高压远距离输电技术的实现, 各电网间的互联将使电网能在更大范围内实现补偿调节、错峰、调峰等功能, 从而在更大的空间内合理配置电力资源。我国电网互联已有几十年的经验, 初期电网互联运行的目标是调节地区间的电能盈亏, 即从电能富裕的地方向电能短缺的地方输送电力, 其互联方式一般是单向送电, 这种简单的电网互联方式产生了很大的经济效益^[1]。近年来电网互联的规模越来越大, 然而, 有些互联电网的规模效益并没有充分发挥, 甚至出现了明显的资源浪费现象, 如华中—华东电网中的五强溪水电站、葛洲坝水电站、隔河岩水电站, 1996 年以来因弃水产生的电能损失就达 $5 \text{ TW} \cdot \text{h}$, 出现这种现象的原因是互联电网的管理体制和运行机制不能有效地解决这些问题, 联网产生的效益不能在各独立利益主体之间进行合理分配, 以激励参与联网的各区域电网之间的合作。这些问题本质上是多利益主体之间的利益冲突问题, 即多人决策问题。对策论被认为是解决多人冲突决策问题的有效的数学模型方法。

根据系统学原理: 整体效益大于部分效益之和。因此, 只有对互联电网进行联合调度或统一调度才能实现电网的整体最优效益。然而, 随着我国电力行业体制的改革, 形成了利益主体多元化的分散管理格局。在这种格局下进行电网互联, 就可能产生决策主体与多利益主体之间的利益冲突。由于联网中各成员是独立的利益获得者, 对任何损害其利益的行

为, 他都有权拒绝合作。于是, 在这种环境下, 实现互联电网效益的基本条件是激励互联电网所有成员的合作。合作是指各成员愿意按统一调度规则由联网调度管理机构调节他们可以控制的量, 这种合作与效益分配方式可用合作对策模型来描述。

Macda 和 Kaya 分析了在分时电价条件下, 消费者与电力公司之间的对策模型^[2], 并分别采用使用自备电厂和调整供电价格作为各自的对策策略。文献[3]讨论了经济系统交易计划的线性规划模型, 并采用合作对策的 Shapley 值方法进行效益分配。文献[4]研究了电力联合运营的电力交换的纳什协商模型。Bai 等人将纳什协商模型用于确定两区域电网间双方接受的交换功率和交易电价, 以实现联网系统的优化运行^[5,6]。

本文建立了互联电网的合作对策模型, 利用 Shapley 值方法在各联网成员间合理分配效益, 给出了在互联电网中各区域网之间理性地确定交易电能量与交易电价的方法, 并给出了确定过网费的理论方法。

1 互联电网的合作对策模型

1.1 合作对策模型

合作对策是一种解决多利益主体协调行动产生效益分配问题的有效数学模型方法。当问题结局由多个利益主体行为确定时, 若多利益主体协调行为产生的结局能带来更大的效益, 这种协调行为就是合作。合作对策研究的基本问题就是要找到一种效益分配方式, 能促使所有利益主体的合作。

合作对策模型由 2 个基本要素构成: 局中人集合和特征函数。局中人集合由所有对问题结局有影响的独立利益主体构成, 这个集合中的元素称为局

中人,代表独立的利益主体。若问题中涉及 n 个利益主体,用 $N = \{1, 2, \dots, n\}$ 表示局中人集合。特征函数是定义在局中人集合 N 上的集函数, $v: 2^N \rightarrow \mathbf{R}$, 即对任何 $S \subseteq N$, $v(S)$ 为实数。特征函数的实际意义是:对任何可能的局中人集合 S (称为结盟), 都产生一个由结盟产生的效益 $v(S)$ 。结盟实际上就是合作, 从对策论的观点看, 结盟就是由一个决策者代表这个结盟的所有成员做决策。显然, 特征函数应满足这样的性质: 对任何 $S_1, S_2 \subseteq N, S_1 \cap S_2 = \emptyset$, 必有 $v(S_1 \cup S_2) \geq v(S_1) + v(S_2)$ 。这实际上是更大结盟实现的必要条件。因为更大结盟产生的效益应不小于它的子结盟产生的效益之和, 否则更大结盟不可能形成, 也没有必要形成。全体局中人集合 N 称为全结盟, $v(N)$ 则表示全结盟产生的效益。理性局中人希望能促进全结盟的形成。

1.2 互联电网的合作对策模型

设互联电网由 n 个利益独立的区域网构成, 用集合 $N = \{1, 2, \dots, n\}$ 表示, 按合作对策的观点, 在互联电网中每个区域网被看做一个局中人 (因为它是独立的利益主体)。为建立互联电网的合作对策模型, 需要构造一个描述各种结盟产生效益的特征函数 v , 即要对任何结盟 $S \subseteq N$ 确定这个结盟产生的效益 $v(S)$ 。

实际上, 互联电网中的任何子结盟 $S \subseteq N$ 都形成一个子互联电网, 这个子互联电网的效益则按这个子网的统一调度的最大效益表示。于是, 任何子结盟 $S \subseteq N$ 产生的效益可用如下最优化模型描述:

$$v(S) = \max_{Q_{ij}} \sum_{i \in S} \left[\lambda_i \sum_{j \in S} (Q_{ji} - l_{ji}(Q_{ji})) - \sum_{j \in S} d_{ji}(Q_{ji}) - \sum_{j \in S} C_j(Q_{ji}) \right] \quad (1)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{j \in S} Q_{ij} \leq Q_{i\max} \quad i \in S$$

$$0 \leq Q_{ij} \leq Q_{ij\max} \quad i, j \in S$$

这里, $\lambda_i = \lambda_i \sum_{j \in S} (Q_{ji} - l_{ji}(Q_{ji})) \quad i \in S$

其中 $\lambda_i = \lambda_i(Q)$ 表示 i 区域的电力逆需求函数; λ_i 为 i 区域的电价; Q 为 i 区域的电力需求量; $C_i(Q)$ 表示 i 区域网的电力生产成本函数; $d_{ij}(Q)$ 表示 i 区域网向 j 区域网输电的输电费用函数 (即过网费); $l_{ij}(Q)$ 表示 i 区域网向 j 区域网输电的电能量损失函数; Q_{ij} 表示 i 区域网向 j 区域网输送的电能量; $Q_{i\max}$ 为 i 区域网的最大生产电能量; $Q_{ij\max}$ 为 i 区域网至 j 区域网的最大输电线路容量。

不难看出, 当 $S = N$ 时, 模型描述的是所有 n 个区域网构成的互联电网统一调度产生的效益, 按合

作对策的观点, $S = N$ 被理解为全结盟, $v(N)$ 被理解为全结盟的效益, 即由所有局中人完全合作产生的最大效益。不难证明对任意 $S_1, S_2 \subseteq N, S_1 \cap S_2 = \emptyset$, 有 $v(S_1 \cup S_2) \geq v(S_1) + v(S_2)$ 。这样, 我们就建立了互联电网的合作对策模型。

2 互联电网效益分配的 Shapley 值方法

互联电网的效益实现以统一调度为基础。按合作对策的观点, 就是全结盟的形成。为了促进全结盟的形成, 必须有一个合理分配结盟产生的效益规则。在合作对策理论中, 有多种分配规则^[7,8], 每种分配方法都称为合作对策的一种解概念, 其中 Shapley 值的分配方法^[9]被广泛应用于实际。该方法在理论上可用一组简单的公理刻画, 并能用具有明确意义的数学式表述。

合作对策的解是对任何一个合作对策都给出 n 维向量的规则, 这个 n 维向量的分量表示相应局中人的分配量。Shapley 值按如下规则确定这个 n 维向量的每个分量:

$$\varphi_i(v) = \sum_{i \in S \subseteq N} \frac{(|S| - 1)!(n - |S|)!}{n!} \cdot (v(S) - v(S - \{i\})) \quad (2)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

其中 $|S|$ 表示集合 S 中元素的个数; $\varphi_i(v)$ 表示在合作对策 v 中对局中人 i 的分配值。

在互联电网中, 按公式 (1) 计算出对任何结盟 S 的特征函数值 $v(S)$ 后, 再按公式 (2) 计算出对每个区域电网分配的效益。这种分配效益的方法具有这样的特征: ①个体理性, 即每个区域网参加联网后分得的效益不少于它不参加联网单独运行产生的效益, 显然这是每个区域网参加联网的必要条件, 否则没有人愿意参加联网; ②对任何子互联电网的效益都不提供贡献的区域网不能分得额外的效益, 即这种分配规则并不是在参与联网的各成员间平均分配效益, 因为平均分配规则容易产生“搭便车”现象, 也可能使那些对联网贡献大的区域网退出合作, 不参加联网; ③每个区域网在效益分配中具有相同的地位, 没有任何区域网具有特殊地位, 体现了一种公平性; ④这种分配方式鼓励在合作中做出更大的贡献, 从式 (2) 不难发现, 区域网 i 分得的效益, 是它在所有可能的子互联电网中边际贡献的均值, 当它在各子互联电网中的贡献大时, 分得的效益也大; ⑤这种分配方式具有有效性, 即它将所有区域网参加联网产生的最大效益完全在所有联网成员间进行了分配; ⑥对任何子互联电网, 没有诱导性, 即任何区域网在任何子互联电网中不会比在全结盟得到更大利

益。这些特性都从不同侧面反映了能为理性人普遍接受的合理性规则。

3 互联电网的理性交易电力和交易电价

虽然互联电网中各区域网是独立利益主体,可以独立地自由决策,但我们可以假设它是理性的独立利益主体。所谓理性利益主体是指只要能改善它的效益就应该参与合作。由前面分析可知,在联网的统一调度下,如果按 Shapley 值方法在联网各成员间分配效益,就能保证所有区域网能得到较它单独运行时更大的效益。因此,作为理性的区域网,应在联网的统一调度中表现出合作行为。这种合作行为表现为任何区域网 i 对区域网 j 的输电量 Q_{ij}^* 应由最优优化模型确定。大区电网经营企业收取的过网费 d 为:

$$d = \sum_{i,j \in N, i \neq j} d_{ij}(Q_{ij}^*) \quad (3)$$

区域网 i 对区域网 j 的互供电价 q_{ij} 为:

$$q_{ij} = \lambda_j \sum_{k \in N} (Q_{kj}^* - l_{kj}(Q_{kj}^*)) \quad (4)$$

4 算例

以三区域电网为例,网络结构如图 1。为便于分析,不考虑网损、过网费及输电容量限制。参数如表 1 所示。

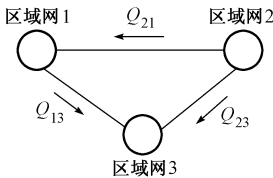


图 1 系统结构图

Fig. 1 The configuration of test system

表 1 三区域电网数据

Table 1 Data for the three area power networks

区域	a	b	c	$k/$ (元 · (MW · h) ⁻¹)	发电极限/ MW
区域网 1	0	18	0.02	320	200
区域网 2	0	16	0.08	300	200
区域网 3	0	18	0.10	340	200

设三区域网的发电成本表示为:

$$C_i(Q) = a_i + b_i Q + c_i Q^2 \quad i = 1, 2, 3$$

其中 $C_i(Q)$ 的单位为百元。

三区域网的电力价格表示为:

$$\lambda_i(Q) = k_i - hQ \quad i = 1, 2, 3$$

其中 $h = 1$ 元 / (MW · h)²; Q 为电能量, 单位为 MW · h。

a. 分别对单独运行的三区域网进行优化计算。

按式(1)建立如下模型:

$$\begin{cases} v(\{i\}) = \max(\lambda_i Q_i - C_i) \\ 0 \leq Q_i \leq 20, i = 1, 2, 3 \end{cases}$$

按此模型计算得出的优化结果如表 2。

表 2 三区域网单独运行的优化结果

Table 2 The optimization results while the three area network operating alone

区域	发电量 Q_i^* / (MW · h)	净效益 $v(\{i\})$ / 百元
区域网 1	68.6	48.04
区域网 2	64.8	45.37
区域网 3	72.7	58.18

b. 按区域网 1 和区域网 2 合作进行优化计算。

按式(1)建立如下模型:

$$\begin{cases} v(\{1, 2\}) = \max[\lambda_1(Q_{11} + Q_{21}) - C_1 + \lambda_2 Q_{22} - C_2] \\ 0 \leq Q_{11} \leq 20 \\ 0 \leq Q_{22} + Q_{21} \leq 20 \end{cases}$$

按此模型计算得出的结果如表 3。

表 3 区域网 1 和区域网 2 合作的优化结果

Table 3 The optimization results while area 1 and area 2 cooperating

发电量/(MW · h)		总净效益	最佳交易电能量
区域网 1	区域网 2	$v(\{1, 2\})$ / 百元	Q_{21}^* / (MW · h)
3.9	59.9	97.98	66.0

c. 按区域网 1 和区域网 3 合作进行优化计算。

按式(1)建立如下模型:

$$\begin{cases} v(\{1, 3\}) = \max[\lambda_1 Q_{11} - C_1 + \lambda_3(Q_{33} + Q_{13}) - C_3] \\ 0 \leq Q_{33} \leq 20 \\ 0 \leq Q_{11} + Q_{13} \leq 20 \end{cases}$$

按此模型计算得出的结果如表 4。

表 4 区域网 1 和区域网 3 合作的优化结果

Table 4 The optimization results while area 1 and area 3 cooperating

发电量/(MW · h)		总净效益	最佳交易电能量
区域网 1	区域网 3	$v(\{1, 3\})$ / 百元	Q_{13}^* / (MW · h)
67.6	23.5	109.37	54.1

d. 按区域网 2 和区域网 3 合作进行优化计算。

按式(1)建立如下模型:

$$\begin{cases} v(\{2, 3\}) = \max[\lambda_2 Q_{22} - C_2 + \lambda_3(Q_{33} + Q_{23}) - C_3] \\ 0 \leq Q_{33} \leq 20 \\ 0 \leq Q_{22} + Q_{23} \leq 20 \end{cases}$$

按此模型计算得出的结果如表 5。

表 5 区域网 2 和区域网 3 合作的优化结果
Table 5 The optimization results
while area 2 and area 3 cooperating

发电量/(MW·h)		总净效益	最佳交易电能量
区域网 1	区域网 2	$v(\{2,3\})$ /百元	$Q_{13}^*/(\text{MW} \cdot \text{h})$
59.3	5.5	124.27	73.9

e. 按区域网 1、区域网 2、区域网 3 合作进行优化计算。按式(1)建立如下模型:

$$v(\{1,2,3\}) = \max[\lambda_1(Q_{11} + Q_{21}) - C_1 + \lambda_2 Q_{22} - C_2 + \lambda_3(Q_{33} + Q_{13} + Q_{23}) - C_3]$$

$$\begin{aligned} 0 \leq Q_{11} + Q_{13} &\leq 20 \\ 0 \leq Q_{22} + Q_{21} + Q_{23} &\leq 20 \\ 0 \leq Q_{33} &\leq 20 \end{aligned}$$

按此模型计算得出的结果如表 6。

表 6 区域网 1、区域网 2、区域网 3 合作的优化结果
Table 6 The optimization results
while area 1, area 2 and area 3 cooperating

发电量/(MW·h)		总净效益	最佳交易电能量 / (MW·h)		
区域网 1	区域网 2	$v(\{1,2,3\})$ /百元	Q_{21}^*	Q_{13}^*	Q_{23}^*
23.2	64.2	191.59	66.4	16.8	0.0

利用表 1~表 6 中数据,按照 Shapley 值计算三区域网分配得到的效益分别为:

$$\begin{aligned} \varphi_1(v) = \frac{1}{6}[v(\{1,2\}) + v(\{1,3\}) - 2v(\{2,3\}) + \\ 2v(\{1,2,3\}) + 2v(\{1\}) - v(\{2\}) - \\ v(\{3\})] = 55.76 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varphi_2(v) = \frac{1}{6}[v(\{2,1\}) + v(\{2,3\}) - 2v(\{1,3\}) + \\ 2v(\{1,2,3\}) + 2v(\{2\}) - v(\{1\}) - \\ v(\{3\})] = 61.87 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varphi_3(v) = \frac{1}{6}[v(\{1,3\}) + v(\{2,3\}) - 2v(\{1,2\}) + \\ 2v(\{1,2,3\}) + 2v(\{3\}) - v(\{1\}) - \\ v(\{2\})] = 73.96 \end{aligned}$$

区域网 2 向区域网 1 的互供电价 $q_{21}(q_{21} = 320 - Q_{11} - Q_{21})$ 为 250.4 元/(MW·h),区域网 1 向区域网 3 的互供电价 $q_{13}(q_{13} = 340 - Q_{13} - Q_{33} - Q_{23})$ 为 265.7 元/(MW·h)。

此算例计算结果表明:①通过区域网 1、区域网 2、区域网 3 之间的电力交易合作,可提高整个互联电网的效益,即 $v(\{1,2,3\}) > v(\{1\}) + v(\{2\}) + v(\{3\})$; ②利用三区域网的最优交易电量和交易电价的计算结果,可作为制订三区域网交易计划的依据;③各个区域网能够通过交易获得额外的效益,如果各区域网在电力交易中充分合作,就可以实现整个网络系统的优化运行。虽然此算例仅考虑三区域

网交易分析的理想情形,但其基本思想可以扩展到实际的电力交易分析中去。

5 结语

为了实现电网互联的最大效益,需要联网成员的合作。作为理性的联网成员,在联网中予以合作的充分必要条件是 从联网中可以获得更大效益。本文通过建立联网统一调度模型,得到为实现联网的最大效益各区域网之间理性电能量交换规则。为了促进区域网间这种电能量交换规则的实现,建立了合作对策模型,采用合作对策的 Shapley 值方法在联网各成员间分配效益,并分析了这种分配规则的特性。这些特性表明:如果各成员充分合作,按统一调度方式确定各区域网之间的交换电能量,按 Shapley 值方法分配给它们的效益,较它们各自独立运行时有所增加,并且任何成员在任何子互联网中都不会得到更大的利益,即这种分配方法对任何子互联电网没有诱导性。另外,这种分配方法还反映了联网各成员对联网贡献的大小,这样有利于促进联网各成员在联网中做出更大贡献。

诚然,本文只讨论了互联电网中电能量交换的经济效益及分配问题。事实上,互联电网中存在多种效益,这需要对效益和受益主体以及效益信息特性充分分析后,才能研究促进发挥互联电网效益的分配方法。我们正在对这些问题进行深入研究。

参考文献

1 张惠勤(Zhang Huiqin). 关于我国电网互联状况的调查及建议(Investigation and Suggestion on China National Power Grid). 中国电力(Electric Power),1997,30(1): 3~6

2 Macda A, Kaya Y. Game Theory Approach to Use of Non-Commercial Power Plants Under Time-of-Use Pricing. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(3):1052~1059

3 Chattopadhyay D. An Energy Brokerage System with Emission Trading and Allocation of Cost Saving. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(4):1939~1945

4 Jukka R, Harri E, Raimo P H, et al. Dynamic Cooperative Electricity Exchange in a Power Pool. IEEE Transactions System Man and Cybernetics, 1991, 21(4):758~766

5 Bai Xiaomin, Shahidehpour S M. Transmission Analysis by Nash Game Method. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(2):1046~1052

(上接第 24 页 continued from page 24)

- 6 白晓民, 钟金, 张毅, 等 (Bai Xiaomin, Zhong Jin, Zhang Yi, et al). 一种水火电系统输电交易分析方法 (A Method for Transaction Analysis of Hydro-Thermal System). 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 1998, 18(3): 163~167
- 7 Thomas L C. Game Theory and Applications. New York: Halsted Press, 1984
- 8 Myerson R B. Game Theory. Cambridge

(Massachusetts): Harvard University Press, 1991

- 9 Shapley L S. A Value for N-Person Games. Annals of Mathematical Studies, 1953, 28(3): 307~317

王先甲, 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为系统工程、决策分析、电力市场管理。

李湘姣, 女, 硕士研究生, 研究方向为电力市场管理。

THE COOPERATIVE GAME MODEL FOR ELECTRICITY TRANSACTION IN INTERCONNECTED POWER NETWORK

Wang Xianjia, Li Xiangjiao (Wuhan University of Hydraulic & Electric Engineering, Wuhan 430072, China)

Abstract: The characteristics and problems of the interconnected power network is analyzed, which indicated the conflicting features between the dispatching center and the benefited individuals, and that the maximum benefit of the interconnected power network is based on the unified dispatch. In order to realize the maximum benefit of the network, we have established a cooperative game model, which adopted Shapley value to distribute the benefit among the areas of the interconnected power network. The rational transmission power among the areas is determined by the unified dispatch, and the benefit distribution and transmission electricity price is determined by the Shapley value of the cooperative game. The calculation results shows that this distributive method is helpful to stimulate the full cooperative behavior among the members, thus the whole interconnected power network can operate optimally.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 69874029).

Keywords: interconnected power network; centralized dispatch; cooperative game; Shapley value; distribution rules