

电力市场中的多机组合作效益分配研究

石磊¹,高志华^{1,2},黄金凤¹,范展滔³,张雪莹¹

(1. 华南理工大学电力学院,广东 广州 510640; 2. 广东省电力调度中心,广东 广州 510600;
3. 广东省广电集团公司佛山分公司,广东 佛山 528000)

摘要: 在竞争性电力市场中,属于同一发电厂商的发电机组可以通过一定的合作获得更佳的发电收益。对参与合作的机组在合作中的贡献作定量分析,合理分配所得利润,将对发电厂商的成本核算及远景发展规划有重要的意义。本文从多方合作效益分配的角度出发,通过建立相应的分配模型,对发电厂商内部的合作效益分配问题进行了初步的探讨。由于电网输电阻塞的存在是促成发电机组间进行合作的常见原因,因此本文着重讨论这种情况下的效益分配问题。得出的结论对发电机组间的合作策略和效益分配具有一定的指导意义。
关键词: 电力市场; 输电阻塞; 多机组合作; 效益分配

中图分类号: F407.6 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2003)09-0005-04

1 引言

随着电力市场管理机制的引入,电力系统内部企业在市场中的地位发生了质的变化。厂网分开和开放输电网络打破了原来单一的产权所有方式,在市场中形成了多厂商竞争的局面。作为竞争性市场中的独立经济实体,各发电厂商都力求降低成本、提高效率以最大化自身利益^[1,2]。由于电力系统运行有着自身固有的特点,因而在进行竞争的同时,厂商之间或者是同一厂商内部不同机组之间的合作和联合将会使得合作各方取得明显的效益,并能同时提高社会的整体效益。

各发电机组根据自身的发电成本构成或电网中出现输电阻塞等情况进行合作时的一个重要环节就是解决利益的合理分配问题。基于潮流追踪^[3,4]的合作方案主要是以输电网络的特性为依据,以消除输电阻塞为目的,具有较强的实用性。但文献中的算法并没有考虑自由竞争市场的特点,在进行合作时的竞标电价以补贴形式提高竞争力,电价补贴以不高于市场出清电价为限。这种电价补贴机制虽然使得合作各方的总体效益均有所增加,但是由合作而产生的效益却不能得到公平合理的分配。本文引入效益分配函数的概念,对多机组合作所得的利益按市场规律进行分配,为各机组提供最佳的合作竞标策略。

2 多机组合作时的效益分配模型

假设 n 台发电机组,它们单独或者合作时都

得到一定的效益,而且合作人数的增加不会引起效益的减少,那么,全体 n 台发电机组的合作将带来最大的效益,数学模型如下:

设有集合 $I = \{1, 2, \dots, n\}$, 如果对任何子集 $S \subset I$, 对应一个实值函数 $V(S)$, 满足条件

$$V(\emptyset) = 0;$$

当 $S_1 \cup S_2 = \emptyset, V(S_1 \cup S_2) = V(S_1) + V(S_2)$ 则称 $[I, V]$ 为 n 机组合作对策, V 为对策的特征函数。

I 可以看作 n 机组集合, S 为 n 机组集合的一种合作, $V(S)$ 为这种合作的效益。用 x_i 表示 I 的成员 i 从 n 机组合作中的应得利益, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 成为合作对策的分配。把这种分配记为 $(V) = (v_1(V), v_2(V), \dots, v_n(V))$, 即 $v_i(V)$ 为成员 i 从合作 V 中获得利益, 那么 (V) 应满足以下条件:

(1) 对称性。设 σ 是 $I = \{1, 2, \dots, n\}$ 的一个排列, 即 I 到它自己的一一对应。若 $S \subset I$, 用 $\sigma(S)$ 表示集合 $\{i | i \in S\}$, 对特征函数 $V(S)$, 显然 $U(S) = V(\sigma(S))$ 也是一个特征函数, 那么 $v_i(V) = v_{\sigma(i)}(U)$ 。可见, 各个机组的分配与其被赋予的记号无关。

(2) 有效性。如果对于某一机组 i 和任意包含 i 的子集 S 有 $v_i(S) = v_i(S - \{i\})$, 则 $v_i(V) = 0$ 。这说明, 若发电机组对它参与的任意一种合作都没有贡献, 则它应得的利润为零。此外, $\sum_{i=1}^n v_i(V) = V(I)$, 即各成员效益之和应等于全体合作的效益。

(3) 可加性。对定义在 I 上的任意两个特征函数 V 和 U , $(V+U) = (V) + (U)$ 。亦即, 若 n 机组同时进行合作时, 各自所得的分配是两项合作分

基金项目: 广东省电力集团公司科技项目(JA59200215)

配的和。

设 V 为 I 的所有非空子集的集合 \bar{I} 上所有实值函数的集合。因为 \bar{I} 有 $2^n - 1$ 个元素, 所以 V 是一个 $2^n - 1$ 维线性空间, 又设 $\phi: V \rightarrow R^n$ 是 V 到 n 维空间的 R^n 上的一个映射, 满足上述条件 (1)、(2)、(3), 则映射 ϕ 是唯一存在的, 且有

$$\phi_i(V) = \sum_{S \subset I} \left[W(|S|) (V(S) - V(S - \{i\})) \right] \quad (1) \quad i = 1, \dots, n$$

其中 $|S|$ 表示子集 S 元素个数,

$$W(|S|) = \frac{(n - |S|)! (|S| - 1)!}{n!}$$

3 三机组合作分析

鉴于目前电力市场的发展水平和电网结构的现状, 输电阻塞的存在是各发电机组进行合作的主要原因之一。以下对三机组合作时的效益分配模型进行讨论。

存在 A、B、C 三个发电机组, 假设各自独立竞标时单位时段获利分别为 V_A 、 V_B 、 V_C ; A、B 合作可获利 V_{AB} ; A、C 合作可获利 V_{AC} ; B、C 合作可获利 V_{BC} ; A、B、C 合作可获利 V_{ABC} 。根据上述的分配原则对这三个发电机组合作时所得的效益分配进行讨论。首先设发电机组 A、B、C 单独竞标和两两合作均无获利, 而三方合作获利 1 元, 记此合作为 V_{ABC} 。根据对称性, 这时三方所得利润应相等, 即

$$\phi_i(V_{ABC}) = 1/3, \quad i \text{ 分别为 A、B、C。}$$

又设三方单独参与竞标均不能获利, A、B 合作获利 1 元, A、C 合作或 B、C 合作均无获利, A、B、C 合作获利 1 元, 记此合作为 V_{AB} 。根据条件 (2), C 的获利应为 0; 根据条件 (1), A、B 应各得 1/2 元。

再设在三方合作中, 若有 A 参加则获利 1 元, 若无 A 参加则无获利, 这时 A 应得 1 元, B、C 应得利润为 0, 记此合作为 V_1 。

同理可以定义合作 V_{BC} 、 V_{AC} 、 V_B 、 V_C , 且可以求得相应的分配。根据可加性, 那么上述三方合作 V 可以表示为:

$$V = V_A + V_B + V_C + (V_{AB} - V_A - V_B) \cdot V_{AB} + (V_{AC} - V_A - V_C) \cdot V_{AC} + (V_{BC} - V_B - V_C) \cdot V_{BC} + (V_{AB} + V_{BC} + V_{AC} - V_{ABC} - V_A - V_B - V_C) \cdot V_{ABC} \quad (1)$$

4 发电竞标模型

4.1 目标函数

最优化问题的目标函数是使参与合作的发电机组利润最大化且全网购电成本最小:

$$\text{Max } R = \sum_{i \in kG} [P_i(P_{gi}) \cdot P_{gi} - C_i(P_{gi})] \quad (2)$$

式中: kG 是参与合作的所有发电机组的集合,

$P_i(P_{gi})$ 是发电机组 i 的发电报价函数, $C_i(P_{gi})$ 是发电机组 i 的发电成本函数。

4.2 约束条件

$$\sum_{i \in G} P_{gi} = P_D \quad (3)$$

$$P_{gi, \min} \leq P_{gi} \leq P_{gi, \max} \quad i \in G \quad (4)$$

$$T_{ij, \min} \leq T_{ij} \leq T_{ij, \max} \quad i, j \in N, \text{ 且 } i \neq j \quad (5)$$

式 (3) 为节点的直流潮流方程, 式 (4) 为发电机组有功功率约束, 式 (5) 为线路潮流约束。其中, G 为市场中所有发电机组的集合; C 为全网购电成本; P_D 为全网负荷; $T_{ij, \min}$ 、 $T_{ij, \max}$ 是连接节点 i 和节点 j 的输电线路 ij 的最小和最大输送有功功率; $P_{gi, \min}$ 、 $P_{gi, \max}$ 分别是节点 i 上的发电机组的有功输出下限和有功输出上限。

5 算例分析

首先给定以下基本假设:

(1) 各个发电机组在两两合作中的地位是平等的, 并且不会因为进行相同目的的其他合作而减少已有合作的效益。

(2) 由于受到电网特性的制约, 参与合作的发电机组并不能无限制的增加; 此外, 合作必须针对某一相同目的 (同一输电阻塞) 进行。

(3) 效益分配的结果不影响合作时的发电报价。发电竞标优化过程中, 各个发电机组的报价曲线仅依据以往效益的分配结果进行修正。

由于阻塞区域附近相互影响较强的各发电机组较少, 在进行合作的时候一般不会对第三方产生较大的影响, 因此上述假设在实际应用中是可行的。根据上述理论, 本节给出一个 9 节点简单系统进行仿真计算, 网络拓扑结构如图 1 所示。为了使讨论的问题更为突出, 假定负荷恒定、电价调整前后发电机报价曲线不会出现下降段。网络参数、发电机参数、负荷参数如表 1、表 2 所示。进行仿真计算时, 首先利用发电竞标模型得出单独竞标和各种合作方式下的竞标最优结果, 然后利用式 (1) 并根据可加性求出 $\phi(V)$, 对所得效益进行分配。

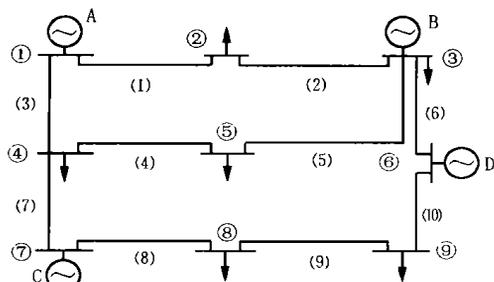


图1 输电网络拓扑结构图

Fig. 1 Diagram of topology structure in transmission network

表1 输电线路参数

Tab. 1 Parameters of transmission lines

线路	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆	L ₇	L ₈	L ₉	L ₁₀
电抗/p. u.	0.2	0.15	0.25	0.5	0.35	0.05	0.05	0.1	0.1	0.1
输送容量/MW	200	200	200	240	240	200	280	200	200	300

表2 潮流计算结果

Tab. 2 Computation results of power flow

线路	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆	L ₇	L ₈	L ₉	L ₁₀
调价前潮流/MW	74.51	-125.48	200	-1.81	151.81	22.70	-197.69	-17.70	-67.69	242.69
调价后潮流/MW	181.95	-18.05	200	42.55	107.45	-25.50	-242.50	37.50	-12.51	194.51

潮流计算的结果表明,由于线路3到达了传输极限,处于节点1的低价发电机组A的发电出力受到限制。处于节点7的发电机组C及处于节点3的发电机组B相对机组A而言具备消除线路阻塞(如图线路3)的能力,因为这三者存在着互利合作的条件和动力。适当调整机组A、B、C的报价,重新进行潮流计算,计算结果见表2。

表3 负荷及发电机参数和发电机初始报价

Tab. 3 Parameters of loads & generators and the original bidding prices

编号	负荷节点	发电机节点	最大出力 /MW	最小出力 /MW	原始报价 /元(kWh) ⁻¹	发电成本 /元(kWh) ⁻¹
2	100	1(A)	500	180	0.300	0.21
3	100	3(B)	400	120	0.380	0.29
4	500	6(C)	280	120	0.400	0.31
5	150	7(D)	220	180	0.350	0.28
8	50					
9	300					

根据表2、表3的数据和发电机组竞标出力结果,结合三机组合作效益分配模型,计算发电机组A、B、C合作前后售电收益及分配结果如表4所示。表中,当行和列的机组标记相同时,表示不进行合作

时的收益;当行和列机组标记不相同,表示进行两两合作时的共同收益之和;三方合作获利总额为68410(元/h)。

表4 发电机组售电效益分配表

Tab. 4 Benefit allocation between suppliers

	元/h		
	机组A	机组B	机组C
机组A	24750	41770	57390
机组B	41770	13420	34720
机组C	57390	34720	16200
三方合作获利总额	68410		
三方合作获利分配	31070	14070	23270
合作后获利上升比例	25.53%	4.84%	43.64%

从表4可见,发电机组进行多方合作时的效益总是比单独竞标时的效益要高,随着合作方的增加,其效益也随之增加。由于在进行两两合作时,发电机组A参与的合作利润较高,因而它在三方合作时分配到较多的利润。这与直观经验相符。发电机组A与发电机组B合作时,对消除阻塞线路3的贡献较小,因而他们合作所得(41770)与各自独立竞标所得之和(24750 + 13420 = 38170)相差很少(3600),合作的效益不明显。反之,由于机组B、C对线路3的输入阻塞有明显的改善作用,因而合作效益明显高于不合作时的效益之和;机组C对消除阻塞的作用最为明显,它在三方合作中的获利上升比例也最大。此外,由于机组D并没有参与机组间的合作且其发电报价较高,因而机组A、B、C进行各种方式的合作都将使其竞标电量下降。由上述计算结果可见,本文所提出的发电机组间的效益分配模型是合理有效的。

6 结论

本文从提高市场总体效率,减缓输电阻塞出发,对多机组合作效益分配问题进行了初步的探讨。通过建立相应的效益分配模型,确定发电机组合作所产生效益的分配方案,得出以下结论:

(1)在忽略发电机组间相互影响时,效益分配模型合理体现各机组在合作中的贡献,并给出其应得的利润。

(2)由于在自由竞争市场中并不允许发电厂商间进行联合竞标以防止产生垄断,因此本文所提出的利益分配模型仅适用于政策和法律允许范围内的内部合作。

(3)本文的分配模型同样适合于计算诸如转运

费用问题等的效益分配。

(4) 若将效益分配模型作为发电竞标函数中的电价修正参量,可以为发电机组提供合作效益分析手段,从而更好地确定自身的发电竞标报价。

电力市场的建立,为发电厂商机组带来了机遇和挑战,适当处理和计算所得的效益将为企业的发展和内部资源的调配提供有益的参考。本文为参与合作各方提供了衡量合作效益的有效方法,并给出了合作所得利益的分配方案,从微观的角度体现了市场对资源的合理配置。

参考文献:

- [1] Hao S. A Study of Basic Bidding Strategy in Clearing Pricing Auctions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(3):975-980.
- [2] 任震,黄福全,黄雯莹,等. 电力市场中的发电厂投标组合策略研究[J]. 电力系统自动化,2002,26(4):16-

18.

- [3] Richard D. Christie. Transmission Management in the Deregulated Environment[J]. Proceedings of the IEEE, 2000,88(2):170-195.
- [4] Ashwani Kumar, S. C. Srivastava. AC Power Transfer Distribution Factors for Allocating Power Transaction in a Deregulated Market[J]. IEEE Power Engineering Review, 2002,7:42-43.
- [5] 洪毅,贺德化,昌志华. 经济数学模型[M]. 广州:华南理工大学出版社,1999.

收稿日期: 2003-03-26; 修回日期: 2003-05-11

作者简介:

石磊(1979-),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统设计;

高志华(1976-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力市场;

黄金凤(1977-),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统可靠性。

Study on benefit allocation of multiple unit cooperation in power market

SHI Lei¹, GAO Zhi-hua^{1,2}, HUANG Jin-feng¹, FAN Zhan-tao³, ZHANG Xue-ying¹

(1. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Guangdong Power Dispatch Center, Guangzhou 510600, China; 3. Guangdong Guang-Dian Power Grid Group Co. Ltd. Foshan Branch, Foshan 528000, China)

Abstract: The independent electricity suppliers belong to the same company would gain more benefit by cooperation in the competitive power market. A rational benefit allocation and quantitative analysis are meaningful for cost accounting and future planning of the company. Multiple suppliers cooperation in power market is discussed in this paper in terms of a corresponding mathematical model. As the transmission congestion is the main cause for cooperation, the model focuses on transmission congestion. The conclusion derived from this paper is useful to electricity suppliers for bidding strategy and benefit allocation.

Key words: power market; transmission congestion; multiple unit cooperation; benefit allocation

地铁快建为电线电缆企业迎来更多机遇

在中国百万以上人口城市中,地铁建设正成为城市建设史上最大的一笔投资。

北京到2008年举办奥运会时,至少会形成300公里长的由地铁、城市铁路组成的轨道交通网。到2020年之前,北京市的轨道交通总里程将达到1000多公里。

上海则宣称到“十五”期末,将拥有中国最先进的城市轨道交通,并成为全球8个轨道交通线超过200公里的城市。到2020年,上海将形成540公里左右基本完整的轨道交通网络。在为期30年的远期规划中,上海的轨道交通全长将达到780公里。

广州地铁的未来规划将超出广州市。与佛山、南海相联系。深圳市的轨道网络规划则提出,未来25年将建365公里地铁、轻轨,共需投资约1200亿元。而南京也已经规划好了6条地铁,最终整个城市的轨道交通线路总长度将达300公里。

势如潮涌的城市轨道交通建设,为电线电缆生产企业带来了难得的机遇。我们的电线电缆企业应加快技术创新步伐,增强企业系统服务能力和竞争力,在轨道交通市场上大干一番。

(摘自电力设备网)