

市场环境下分区备用的费用分摊研究

王建学, 王锡凡, 邱伟, 冯长有

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 将区域电力市场向各地区分摊备用费用的思路概括为两类: 分摊给用户和分摊给发电厂商. 在将费用分摊到用户侧的方法中, 介绍了常用的 Pro-rata 方法, 并将合作博弈中的 Shapley 方法推广到可直接分摊备用费用, 进一步提出基于预调度方案来分摊费用的新方法. 在将费用分摊到发电厂商的方法中, 分析了按风险度分摊方法的特点, 在此基础上提出按照电量不足期望值分摊的新思路. 最后通过一个 3 地区的算例, 将以上 5 种分摊方法的结果进行分析和比较. 结果显示: 在分摊到用户的各类方法中, 分摊结果差异较大, 需要根据市场需要选用; 在分摊到发电厂商的方法中, 分摊结果相差不大, 推荐采用简单的 Pro-rata 方法.

关键词: 电力市场; 分区备用; 费用分摊

中图分类号: TM714 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)02-0209-05

Allocation Methods for Reserve Cost in Regional Power Market

Wang Jianxue, Wang Xifan, Qiu Wei, Feng Changyou

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In zonal power market, the allocation methods of reserve cost are summarized into two kinds: allocated to users and allocated to generators. In allocation methods to users, the normal Pro-rata method is firstly introduced. According to cooperative game theory, the existing Shapley method is extended to directly allocate the reserve cost. Considering the pre-set scheme of reserve in serious outage, a novel way is presented based on equivalent utilization coefficient. In allocation methods to generators, the characteristic of allocation method with risk index is analyzed to propose a new scheme on the basis of EENS index. Case studies of a three-area system show that the allocation costs to users are different from the other ones, and the rational method should be selected according to market requirement. The allocation costs to generators are similar among the all methods, hence the practical Pro-rata method is recommended in the experience.

Keywords: power market; zonal reserve; cost allocation

根据我国幅员广阔的实际情况, 需要将我国原来的省级电力系统联合起来建立区域电力市场. 区域电力市场要顺利推进, 不仅需要逐步打破省间壁垒, 建立竞争有序、开放规范的电力市场, 还必须考虑到各省的利益, 将相关费用公平地分摊到各个省, 充分协调好系统综合利益和各省利益之间的关系.

区域电力市场的备用运营机构作为备用市场的组织者和一个非赢利机构, 在购买备用后, 势必要将

购买费用分摊到各个地区. 这样, 制定公平合理的费用分摊方法就相当重要. 在现有研究中, 备用费用分摊思路分为两类: 分摊给用户和分摊给发电厂商. 在将费用分摊到用户侧的方法中, 本文介绍了常用的 Pro-rata 方法^[1], 并将合作博弈中 Shapley 方法分摊备用效益的思路^[2]推广到可以直接分摊备用费用的计算方法, 进一步提出基于预调度方案来分摊费用的全新方法. 在将费用分摊到发电厂商的方法中,

分析了按风险度分摊的方法^[3-4],在此基础上提出按照电量不足期望值(EENS)分摊的新思路。

1 分摊到用户

1.1 Pro-rata 方法

最简单的分配方法就是按照各地区备用需求的比例进行分摊,也就是所谓的 Pro-rata 方法。如有 m 个地区,地区 l 的备用需求为 $D_{R,l}$,那么对于备用购买总费用 C ,地区 l 应该承担的部分为

$$C_l = CD_{R,l} / \sum_{l=1}^m D_{R,l} \quad (1)$$

以 2 地区系统为例,地区 1 的备用总需求为 120 MW,地区 2 的备用总需求为 80 MW,那么地区 1 就需要按照 $120/(120+80)=60\%$ 的比例承担备用的购买费用,而地区 2 需要承担 40% 的费用。

该分配方法具有操作简单易行的优点,但是仅仅从备用总需求容量这一个信息出发分配费用,没有考虑网络结构(如联络线约束)、发电机报价、各地区最小备用要求等信息,分配方式还显粗糙。

1.2 基于合作博弈的分摊方法

在分区保留备用的策略中,各地区都从互为备用、事故支援中获利,都比单独保留备用的效益好。如何将这些效益分摊到各个地区,进而研究将购买费用合理分摊到各个地区,从而鼓励各地区参与区域备用市场的积极性。

基于合作博弈的理论,从群体合理性、个体合理性和联盟合理性的角度对该问题进行研究。为了求解合作博弈,Schmeidler 引入了核仁概念,指出核仁具有如下的性质:① 每个对策有 1 个且只有 1 个核仁;② 如果存在核心,那么核仁是核心的一部分。核仁解虽是一个优美的数学原理,但有时候很难求出核仁解,此时可采用实用 Shapley 算法进行^[5]。基于 Shapley 值的备用效益分摊公式为

$$B_l = \sum_{S: l \in S} \frac{(n-|S|)! (|S|-1)!}{n!} [v(S) - v(S-\{l\})] \quad (2)$$

$l = 1, 2, \dots, m$

式中: B_l 表示地区 l 分摊的互为备用的效益; S 表示包含地区 l 的联盟; $|S|$ 表示联盟 S 中的地区数; n 为总地区数; $v(S)$ 表示联盟 S 的效益; $v(S-\{l\})$ 表示联盟 S 除去地区 l 后的效益。

各地区应该承担的备用的费用为^[6]

$$C_l = C'_l - B_l \quad (3)$$

式中: C'_l 为地区 l 单独购买其所需备用的总费用。基

于式(2)和式(3),就可以对备用购买费用在各地区中进行分摊。

1.3 基于等效利用系数的方法

地区 l 预调度方案的确定模型为

$$\min \sum_{i=1}^{N_R} \{P(R'_i)R'_i\} \quad (4)$$

约束条件为

$$0 \leq R'_i \leq R_i \quad (5)$$

$$-\bar{P}_{T,k} \leq P_{T,k} + \sum_{i \notin N_l} H_{ki} R'_i + \sum_{i \in N_l} H_{ki} \Delta P_i \leq \bar{P}_{T,k} \quad k \in T_L \quad (6)$$

$$\sum_{k \in Z_l} \sum_{i \in N_l} H_{ki} R'_i + \sum_{i \in N_l} R'_i \geq D_{R,l} \quad (l = 1, \dots, m) \quad (7)$$

式中: R'_i 为已购进的备用 R_i 在本问题中被优化调度的容量; $P(R'_i)$ 为备用 i 的报价; k 为联络线编号; T_L 为联络线集合; $P_{T,k}$ 为联络线 k 上的已有功率; $\bar{P}_{T,k}$ 为联络线 k 的有功传输容量上限; $i \notin N_l$ 表示备用 R'_i 不属于地区 l , $i \in N_l$ 表示功率改变量 ΔP_i (包括发电机停运容量和备用投入)属于地区 l ; H_{ki} 为节点 i 在线路 k 上的分布系数; $k \in Z_l$ 表示联络线 k 与地区 l 相连。

本模型目标是当地区 l 最大机组发生故障需调用其他地区备用支持时,能够最经济地调度已经购进的备用容量,如式(4)所示。式(5)是备用容量约束,表示在预调度中备用机组 i 被优化调度的容量 R'_i 不能超过其被购买的容量 R_i 。式(6)是联络线传输容量约束,该约束表示备用在调度中,不能超过联络线传输容量的限制。式(7)是地区 l 总备用容量约束,该约束表示地区 l 自留备用与其他地区的支援备用容量之和大于等于地区 l 给定的备用总需求容量 $D_{R,l}$ 。

等效利用系数的方法就是在地区 l ($l=1, \dots, m$) 出现最大故障时对应的预调度方案中,发电机 i 被调度的备用容量为 $R'_{i,l}$,那么地区 l 对发电机 i 的等效利用系数 $\gamma_{i,l}$ 就定义为

$$\gamma_{i,l} = R'_{i,l} / \sum_{k=1}^m R'_{i,k} \quad (8)$$

如果购买该发电机 i 的备用容量费用为 C_{Gi} ,其分摊到地区 l 上的费用为

$$C_{i,l} = C_{Gi} \gamma_{i,l} \quad (9)$$

则地区 l 分摊的总费用 C_l 是分摊到该地区的全部 N_G 个备用的机组费用的累加

$$C_l = \sum_{i=1}^{N_G} C_{i,l} \quad (10)$$

2 分摊到发电机

分摊到发电机常用的也包括前面介绍的 Pro-rata 方法,此外还有按照风险度进行分摊的方法^[3],此方法通常利用概率性可靠性指标(LOLP)针对单个发电机组和输电元件进行。按照风险度指标分摊备用费用在一定程度上体现了谁影响谁负责的原则,但是概率性风险度指标还略显粗糙。例如,大机组和小机组具有同样的停运概率,但大机组停运造成了较大的容量缺额,小机组停运只有少量容量缺额,二者对系统可靠性影响显然不同,但按照概率性的风险度指标分摊方法,二者应该分摊的费用相同,这是不合理的。因此,本文提出了按照可靠性指标——电量不足期望值 EENS 分摊费用的新方法。

在购买发电容量满足电力需求后,假设系统中所有发电机组和输电元件都处于无故障的理想状态,不计及负荷侧波动,此时系统的失负荷概率为 0,电量不足期望值为 0。通常发电机组都有可能发生强迫停运,那么此时系统的电量不足期望值就不再为 0,这里用 $E_{ENS,0}$ 表示,同样的 LOLP 也不再为 0,这里假设为 $L_{OLP,0}$ 。

对于发电机组,在同一状况下,假设任一机组 i 的可靠性提高到理想状态,即强迫停运率为 0,此时计算出来的系统可靠性指标分别为 $E_{ENS,i}$ 和 $L_{OLP,i}$,由此引起的系统可靠性的变化为

$$\Delta E_{ENS,i} = E_{ENS,0} - E_{ENS,i} \quad (11)$$

$$\Delta L_{OLP,i} = L_{OLP,0} - L_{OLP,i} \quad (12)$$

很明显有 $\Delta E_{ENS,i} > 0$ 和 $\Delta L_{OLP,i} > 0$ 。该变量表示由于机组存在的潜在故障对整个系统可靠性的影响,该值越大,表示机组对系统可靠性水平的影响越大,该机组应分摊的备用费用越多。

按照 EENS 发电机组 i 的分摊系数为

$$\beta_{G,i} = \Delta E_{ENS,i} / \sum_{i=1}^{N_G} \Delta E_{ENS,i} \quad (13)$$

按照风险度发电机组 i 的分摊系数为

$$\beta_{G,i} = \Delta L_{OLP,i} / \sum_{i=1}^{N_G} \Delta L_{OLP,i} \quad (14)$$

则地区 l 分摊备用费用总份额 γ_l 是分摊到该地区全部机组的份额累加

$$\gamma_l = \sum_{i \in G_l} \beta_{G,i} \quad (15)$$

式中: $i \in G_l$ 表示机组 i 在地区 l 中; C_l 是备用购买总费用 C 与 γ_l 的乘积

$$C_l = \gamma_l C \quad (16)$$

3 算例分析

本文以一个 3 地区系统为例对所提模型和算法进行分析。图 1 中给出了整个系统的示意图、各机组报价等信息,表 1 给出了各地区备用的最小需求和总需求信息。该系统求解的优化计算结果是^[7]:地区 A 购买备用容量 18.5 MW,地区 B 购买 36.5 MW,地区 C 购买 25 MW,总费用 4 486.5 美元。本文以此为基础来进行备用费用分摊分析。

表 1 各地区备用容量需求

地区	备用总需求/MW	最小备用需求/MW
A	50	10
B	80	20
C	60	25

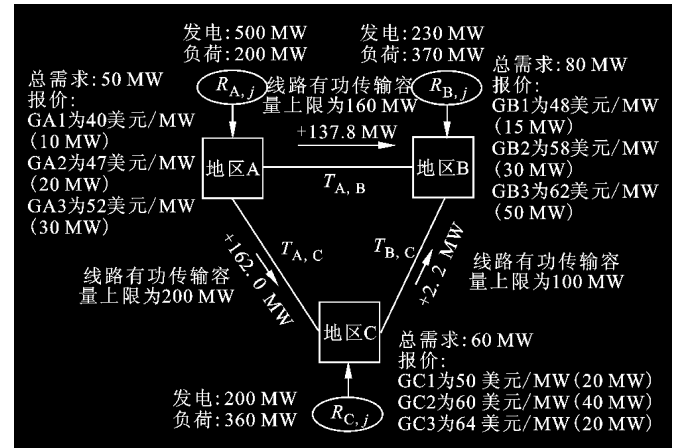


图 1 系统示意图

3.1 分摊到用户侧

3.1.1 Pro-rata 方法 地区 A、B、C 各自的备用需求分别是 50、80、60 MW,那么按照 Pro-rata 方法来对总费用进行分摊,得到的结果见表 2。

Pro-rata 这种按照备用需求比例来分摊备用费用的思路,主要体现了备用费用由用户来分摊的思想,谁需要的备用多,谁承担的费用就多。

3.1.2 基于等效利用系数的方法 按照故障情况下优先调度本区备用的调度方式,得到各地区对备用机组的利用容量见表 3。在表 3 基础上,给出各地区最终的费用分摊结果见表 4。

表 2 按照 Pro-rata 方法分摊备用费用

地区	需求/MW	分摊份额	分摊费用/美元
A	50	0.263	1 179.950
B	80	0.421	1 888.816
C	60	0.316	1 417.734

表 3 各地区对备用机组的等效利用容量 MW

地区	总需求	GA1	GA2	GB1	GB2	GC1	GC2
A	50	10	8.5	15	0.0	16.5	0
B	80	10	8.5	15	21.5	20.0	5
C	60	10	8.5	15	1.5	20.0	5
等效的总 利用容量	190	30	25.5	45	23.0	56.5	10

表 4 各地区对备用机组的分摊费用 美元

分摊费用项	地区 A	地区 B	地区 C
分摊 GA1 费用	156.67	156.67	156.67
分摊 GA2 费用	133.17	133.17	133.17
分摊 GB1 费用	290.00	290.00	290.00
分摊 GB2 费用	0.00	1 165.67	81.33
分摊 GC1 费用	350.44	424.78	424.77
分摊 GC2 费用	0.00	150.00	150.00
合计	930.28	2 320.28	1 235.94

从表 4 中可以看出,基于等效利用系数的费用分摊方法是将费用分摊到用户的一种方法,可以追踪到每个机组在各地区最严重事故中的利用情况,体现了“多用多付费,少用少付费”的原则,在一定程度上实现了费用分摊的公平性.

3.1.3 基于合作博弈的方法 采用式(2)计算,需要先计算联盟效益,结果见表 5. 基于合作博弈理论,根据 2.2 节介绍的式(2)和式(3),可以对备用购买费用在各地区中进行分摊,其结果见表 6.

表 5 联盟效益计算

联盟	效益/美元
V(AB)	2 933.0
V(AC)	2 880.0
V(BC)	3 850.0
V(ABC)	6 673.5

表 6 效益和费用的分摊

地区	分摊效益/美元	分摊费用/美元
A	1 910.0	690.0
B	2 395.0	2 565.0
C	2 368.5	1 231.5
合计	6 673.5	4 486.5

3.1.4 各种方法的比较 为了分析和比较方便,将分摊到用户的各种算法的计算结果在表 7 中给出.

从表 7 可以看出,3 种方法分摊结果基本趋势相同,都是地区 B 分摊最多,地区 A 分摊最少,后面 2 种新提出的分摊方法可以作为常用 Pro-rata 方法的补充和改进. 3 种方法的结果还是有较大的差异,基于等效利用系数方法看重事故情况下的机组调度,地区 A 既是送电地区又是备用需求少的地区,调度方便,所以其承担的费用相对 Pro-rata 方法要少,而地区 B 恰好相反. Shapley 方法更强调地区合作的效益,地区 B 作为合作的最大收益者,分摊的费用更多.

3.2 分摊到发电侧

3.2.1 Pro-rata 方法 地区 A、B、C 各自的发电容量分别为 500、230、200 MW,那么按照 Pro-rata 方法来对总费用 4 486.5 美元进行分摊,结果见表 8.

3.2.2 按可靠性指标方法 按照 EENS 对备用费用进行分摊需要对系统进行可靠性评估,这和系统发电容量的构成紧密相关. 为了讨论方便起见,设地区 A 的 500 MW 的发电容量由 10 台强迫停运率为 0.015 的 50 MW 机组提供,地区 B 的 230 MW 发电容量由 4 台强迫停运率为 0.015 的 50 MW 机组和 1 台强迫停运率为 0.02 的 30 MW 机组提供,地区 C 的 200 MW 发电容量由 4 台 50 MW 机组提供,则各发电机组对系统可靠性的影响见表 9.

按照可靠性指标对备用费用进行购买,主要体现了发电厂商的机组如果在电能市场被选中,则这部分被购买机组应该为系统提供可靠的容量. 如果

表 7 分摊到负荷的各种方法比较

地区	Pro-rata 方法		等效利用系数方法		Shapley 方法	
	分摊份额	分摊费用/美元	分摊份额	分摊费用/美元	分摊份额	分摊费用/美元
A	0.263	1 179.95	0.207	930.28	0.154	690.0
B	0.421	1 888.82	0.517	2 320.28	0.572	2 565.0
C	0.316	1 417.73	0.276	1 235.94	0.274	1 231.5

表 8 按照 Pro-rata 方法分摊备用费用

地区	发电量/MW	分摊份额	分摊费用/美元
A	500	0.538	2 412.10
B	230	0.247	1 109.56
C	200	0.215	964.84

不能可靠供应,即强迫停运率大于 0,则需要购买备用来提高系统可靠性,购买备用的钱主要应该由卖电方即发电厂商来提供。

3.2.3 各种方法的比较 为方便比较分摊到发电侧的各种方法,将分摊结果汇总,见表 10。从中可以

看出,在本算例系统中,3 种方法分摊结果基本趋势相同,结果也相差不大。Pro-rata 方法作为一种简单有效的方法,可以得到较准确的结果,可以在将备用费用向发电厂商分摊的实际中采用。

表 9 各发电机组对系统可靠性的影响

机组	台数	失负荷概率的差值	电量不足期望值的差值
地区 A 的 50 MW	10	0.010 654 8	0.664 739
地区 B 的 50 MW	4	0.010 655 0	0.666 136
地区 B 的 30 MW	1	0.015 592 4	0.574 977
地区 C 的 50 MW	4	0.010 655 1	0.666 136

表 10 分摊到发电侧的各种方法比较

地区	Pro-rata 方法		风险度方法		EENS 分摊方法	
	分摊份额	分摊费用/美元	分摊份额	分摊费用/美元	分摊份额	分摊费用/美元
A	0.538	2 412.10	0.514	2 305.07	0.530	2 376.0
B	0.247	1 109.56	0.281	1 259.38	0.258	1 157.96
C	0.215	964.84	0.205	922.05	0.212	952.44

4 结 论

本文针对区域电力市场中如何合理地在各地区分摊备用费用这个热点问题进行讨论。分析表明,在分摊到用户的方法中,几种方法分摊结果的趋势基本相同,但是具体的分摊结果差异较大。等效利用系数方法体现了预调度特性,而 Shapley 方法突出了地区互联的效益,具体的分摊方法需要根据市场需要选用。在分摊到发电厂商的方法中,分摊结果的趋势基本相同,而具体费用也相差不大,Pro-rata 方法作为一种简单有效的方法,推荐在实际中采用。

参考文献:

[1] Wang Jing, Redondo N E, Galiana F D. Demand-side reserve offers in joint energy/reserve electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power System, 2003, 18(4): 1300-1305.

[2] 赵学顺,文福拴,汪震,等.区域电力市场运行备用容量的确定和获取初探[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(13): 7-12.

Zhao Xueshun, Wen Fushuan, Wang Zhen, et al. A preliminary investigation on determination and procurement of operating reserve capacity in regional electricity markets[J]. Automation of Electric Power Sys-

tems, 2004, 28(13): 7-12.

[3] Xia L M, Gooi H B, Bai J. A probabilistic reserve with zero-sum settlement scheme[J]. IEEE Transactions on Power System, 2005, 20(2): 993-1000.

[4] 孟祥星,韩学山. 不确定性因素引起备用的探讨[J]. 电网技术, 2005, 29(1):30-34.

Meng Xiangxing, Han Xueshan. Discussion on reserve caused by uncertain factors [J]. Power System Technology, 2005,29(1): 30-34.

[5] 周兴华,杜松怀. 双边交易电力市场下基于核仁理论的网损分摊方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 60-65.

Zhou Xinghua, Du Songhuai. A novel nucleolus theory based allocation method of power losses in bilateral electricity markets [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 60-65.

[6] Tsukamoto Y, Iyoda I. Allocation of fixed transmission cost to wheeling cooperative game theory [J]. IEEE Transactions on Power System, 1996, 11(2): 620-629.

[7] 王建学,王锡凡,丁晓莺. 区域电力市场中的分区备用模型[J]. 中国电机工程学报,2006, 26(18):28-33.

Wang Jianxue, Wang Xifan, Ding Xiaoying. Study on zonal reserve model in power market[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(18):28-33.

(编辑 杜秀杰)