

钢铁企业自发电与外购国家电网电之间的经济利益

刘精宇¹, 柴少轩², 常 勇³

(1. 东北大学 国家环境保护生态工业重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 山西太钢不锈钢股份有限公司 销售部, 山西 太原 030003; 3. 山西太钢不锈钢股份有限公司 炼铁厂, 山西 太原 030003)

摘 要: 针对当前钢铁联合企业自产电和国家电网价格之间的关系, 利用经济规划方法建立了基于自发电的最优经济运营模型. 通过求解企业利润最大的目标函数, 并讨论分析在国家电网峰、谷、平时电价企业的最优生产计划. 最优结果显示, 企业利润的高低主要与购入电力转售后的单位利润贡献率、自供电的单位利润率及其上网的售电量有关系. 鼓励企业在谷价时尽量外购电, 少发电; 而在峰价时, 尽量自发电, 少外购电, 富余的电上网销售.

关 键 词: 钢铁联合企业; 自发电; 国家电网; 经济运营模型; 最优生产计划

中图分类号: TK 018

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)07-0980-05

Economic Benefit Between Autonomous Power and Purchasing Power from State Grid in Iron and Steel Enterprises

LIU Jing-yu¹, CHAI Shao-xuan², CHANG Yong³

(1. SEP Key Laboratory on Eco-industry, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Sales Department, Shanxi Taigang Iron & Steel Co., Ltd., Taiyuan 030003, China; 3. Ironmaking Plant, Shanxi Taigang Iron & Steel Co., Ltd., Taiyuan 030003, China. Corresponding author: LIU Jing-yu, E-mail: hst_ljy@163.com)

Abstract: In view of the current price relationship between autonomous power and state grid power in iron and steel enterprises, an optimal economic management model of autonomous power plant was established using the method of economic planning. The optimal production and distribution plan of enterprise and the optimal power purchasing scheme considering the peak-valley power prices were discussed by solving the enterprise's profit maximum function. The optimal schemes and results show that the level of the enterprise's benefit has relationships mainly with the buying-power unit profit contribution after resale, the power supply unit profit and the quantity of power sale to grid. It is encouraged that, more outsourcing and less autonomous power is used as far as possible at the valley price of grid power, and more autonomous and less outsourcing power is used as far as possible and surplus electricity is sold online at the peak price of grid power.

Key words: integrated iron and steel enterprises; autonomous power; state grid; economic management model; optimal production plan

在钢铁联合企业中, 电厂在向其工序供电的同时, 又要将富裕的电力以很低的价钱上网销售, 而当企业电力不足时, 又要花大价钱从国家电网上购买大量的电力, 这样企业上下网都要花费大量的资金. 因此, 钢铁企业自备电厂需要采取有效方案来解决这一矛盾.

当今国内外学者和专家们对钢铁企业电力方面的研究, 主要是在电力生产端、电力预测、电力调度和优化分配^[1-8] 3 个方面, 而对电力经济性的研究很少^[9-10].

本文利用经济规划方法, 构建基于自发电的最优经济运营模型, 通过求解企业利润最大的目

标函数,并讨论在国家电网峰、谷、平时电价企业自发电的最优生产计划,从而实现钢铁企业电力的合理调控.

1 数据引源

表 1 为南京钢铁联合有限公司 2010 年、宝钢联合有限公司分公司 2004 年、长治钢铁公司

2010 年 1~9 月、唐钢 2010 年的电力情况表.

通过表 1 的数据可以看出:①钢铁联合企业中电力的消耗主要集中在炼铁、炼钢、轧钢、辅助工序,而在炼钢工序中电炉炼钢又占有很高的比重.②在 2004 年宝钢分公司其他工序耗电所占的比重为 34.08%,超过了 $\frac{1}{3}$;而在 2010 年其他三家企业的电力耗电比重明显下降,尤其是长治钢

表 1 几家公司的电力情况表
Table 1 Power supply and consumption statistics of several iron and steel enterprises

类别	南京钢铁联合有限公司 2010 年		宝钢联合有限公司分公司 2004 年		长治钢铁公司 2010 年 1~9 月		唐钢 2010 年	
	电量 $\times 10^{-4}$ / (kW·h)	占自耗电的 百分比/%	电量 $\times 10^{-4}$ / (kW·h)	占自耗电的 百分比/%	电量 $\times 10^{-4}$ / (kW·h)	占自耗电的 百分比/%	电量 $\times 10^{-4}$ / (kW·h)	占自耗电的 百分比/%
外购电	181 761. 146 6	52. 11	—	—	107 988. 661 8	106	211 701. 64	66. 43
二次能源发电	142 571. 525 5	40. 88	—	—	—	—	171 154. 86	53. 71
利用余热(压)发电	29 665. 441 8	8. 5	—	—	55 413. 186 3	1. 7	—	—
自发电	172 236. 967 3	49. 38	—	—	55 413. 186 3	1. 7	171 154. 86	53. 71
外调电	5 210. 150 1	1. 5	—	—	6 920. 643 0	6. 8	64 167. 70	20. 13
自耗电	348 787. 963 8	100	759 872. 73	100	101 932. 35	100	318 688. 70	100
焦化工序	13 670. 233 7	3. 92	27 937. 04	3. 68	2 028. 425 2	2	16 976. 24	5. 32
烧结工序	304 095. 956 0	8. 63	60 756. 85	8	16 055. 916 6	15. 75	49 649. 16	15. 58
球团(焙烧)工序	7 395. 105 8	2. 12	4 457. 95	0. 58	1 863. 554 1	1. 83	—	—
炼铁工序	81 468. 539 5	23. 36	56 168. 96	7. 39	32 168. 917 1	31. 56	49 507. 74	15. 53
炼钢工序	67 740. 561 2	19. 42	87 590. 63	11. 53	8 713. 176 6	8. 55	45 183. 36	14. 18
电炉炼钢	33 564. 953 6	9. 62	49 625. 00	6				
轧钢工序	44 372. 309 8	12. 72	235 708. 02	31. 02	13 328. 475 9	13. 08	—	—
辅助工序	97 990. 355 4	28. 09	28 247. 48	3. 72	27 246. 330 7	26. 73	80 392. 91	25. 23
制氧	50 330. 433 2	14. 43	—	—	23 935. 697 7	23. 48	—	—
其他工序	6 054. 902 4	1. 74	259 005. 8	34. 08	527. 554 0	0. 5	76 979. 29	24. 16
钢产量/万 t	677. 104 9		1 186. 97		233. 341 0		855. 542 3	
吨钢耗电/(kW·h·t ⁻¹)	515. 12		640. 18		436. 84		372. 50	

铁公司,其他工序耗电的数据仅占了 0.5%. ③电力消耗在轧钢工序中所占的比重也出现明显的下降,在 2004 年宝钢分公司中轧钢工序耗电占了将近三分之一,而在 2010 年南京钢铁公司和长治钢铁公司分别为 12.72% 和 13.08%,说明企业重视了流程结构和轧钢工序的优化,进而减少了电力在轧钢工序中的消耗. ④通过二次能源发电、余热(压)发电数据所占自发电的比重可以看出,随着时间的推移,伴随着钢铁企业的快速发展,企业对余热余能回收进行动力发电的重视,自发电呈现明显上升的特点,2010 年南京钢铁公司自发电占

自耗电的比重达到了 49.38%,而唐钢二次能源发电的比重就占到了 53.71%. 也能看出二次能源回收利用的程度和企业的规模、重视度有很大关系,长治钢铁公司自发电比重仅为 1.7%. ⑤通过吨钢耗电的数据也可以看出,2004 年宝钢分公司的吨钢电耗在 600 kW·h/t 以上,伴随着时间的跨越,吨钢电耗呈现明显下降的趋势,吨钢耗电在 500 kW·h /t 左右. 而比较先进的钢铁联合企业唐钢吨钢耗电仅为 372.5 kW·h /t,优势更加明显. 唐钢采用先进的设备,改变传统的生产观念,重视余热余能的回收利用,自发电率达到了

53.71%, 促使其外调电的比重增大了, 达到了 20.13%, 节省了不少电力的成本; 而南京钢铁公司和长治钢铁公司的外调电率都低于 10%.

像宝钢这样的企业能达到完全自给自足是很少的, 因此大多数钢铁企业要从外面购电. 从外面购电太多, 会造成生产经济成本太高; 如果完全靠自发电, 又没有足够的二次资源及余热余能资源, 因此就存在自产电和外购电的平衡策略问题.

2 电厂最优生产策略模型

用钢铁联合企业发电厂一年内的最大售电利润作为目标函数, 即确定其发电、售电和外购电之间的关系.

优化策略的模型为

$$\max S = R_n B_n + R_s B_s - R_p Q_p - R_b B_b. \quad (1)$$

式中: R_n 为自发电厂销售给内部企业的售电价格; B_n 为自发电厂销售给内部企业的售电量; R_s 为自发电厂销售给国家电网的售电价格; B_s 为自发电厂销售给国家电网的售电量; R_p 为自发电厂的发电成本价格; Q_p 为自发电厂总的供电量; R_b 为企业外购电的价格; B_b 为企业外购电的电量.

需要满足如下的约束条件:

$$kQ_p + B_b = B_n, Q_p, B_n \leq R, \quad (2)$$

在式(2)中 k 为企业自发电厂自用电量电量的比例; R 为自备电厂年最大使用电量.

3 模型求解

在式(1)中代入比例项 k , 整理为

$$\max S = (kR_n - R_p)Q_p + (R_n - R_b)B_b + R_s B_s. \quad (3)$$

设 $S_1 = (kR_n - R_p)Q_p$, $S_2 = (R_n - R_b)B_b$, $S_3 = R_s B_s$. 则 S_1 部分是企业电厂自发自供电的利润, S_2 部分是从电网购电转售给企业的利润, S_3 部分是电厂销售给电网的利润.

下面对其进行分析:

1) $R_n \leq R_b$ 的情况.

这种情况下, 电厂从网上购电再卖给内部企业使用将没有利润可图, 即 $S_2 = (R_n - R_b)B_b \leq 0$, 这时令 $B_b = 0$. 那么自备电厂应当按照自供电电量与企业需要的电量 B_n 相一致的要求, 此时有 $k = B_n / Q_p$. 于是式(3)可进一步改写为

$$\max S = B_n R_n - R_p Q_p + R_s B_s. \quad (4)$$

由于 $B_n \leq Q_p \leq R$, R_s 的取值范围为 $R_s \leq R_p$. 因此讨论如下:

当 $R_s = 0$ 时, 则有 $\max S = B_n R_n - R_p Q_p$, 这时应确定 $Q_p = B_n$, 即电厂向内部企业的供电量就是企业的需电量.

2) $R_n > R_b$ 的情况.

这种情况下, 电厂从网上购电再卖给内部企业使用是有利润可图的. 这时

$$k = \frac{(B_n - B_b)}{Q_p},$$

则式(3)可改写为 $\max S = (B_n - B_b)R_n - R_p Q_p + (R_n - R_b)B_b + R_s B_s$. 显然有 $R_p \leq R_s \leq R_n$, 这时应当比较购入电力转售后的电量贡献 $l_1 = B_n - B_b$ 、购入电力转售后的单位利润贡献 $l_2 = R_n - R_b$ 、销售给国家电网的单位净利润贡献 $l_3 = R_s$. l_1, l_2, l_3 三者不同情况下的比较分析结果如表 2 所示.

表 2 不同情况下的应对策略

Table 2 Strategies corresponding to different conditions

情况	应对策略
$l_1 > l_2 > l_3$	应根据实际电网向企业的供电量情况和供给企业的用电量情况(下文简称为两种情况)尽可能地购入数值为 B_n 的国家电网电量转售, 当出现不足部分时, 则由企业自备电厂自供电量解决; 实际自供电量减去售给附属企业的电量后富余的电量再上网销售.
$l_1 > l_3 > l_2$	需要根据上述两种情况下最大限度地购入数值为 B_n 的国家电网电力转售, 出现缺少部分由自备电厂自供电量解决; 如果自供电量只需满足前面的不足, 则不应该有多余电量上网销售.
$l_2 > l_1 > l_3$	这时应由自供电力解决内部企业所需的电量, 尽可能满足数值为 B_n 的电网电力转售, 如果缺少则外购国家电网电转售; 当能够满足时则无需购电转售, 当电量还存在富余时, 那么自供电量应该上网转售.
$l_2 > l_3 > l_1$	同 $l_2 > l_1 > l_3$ 情况一样.
$l_3 > l_1 > l_2$	同 $l_1 > l_3 > l_2$ 情况一样.
$l_3 > l_2 > l_1$	应尽可能由自供电解决内部企业的用电需求, 不应该有过多的自供电量来进行上网销售; 当自供不足时, 那么应购电转售来补充电力不足部分.

当 $R_s = R_b$, 则有

$$S = (B_n - B_b)R_n - R_p Q_p + R_n B_b + (B_s - B_b)R_b.$$

这时需讨论: 如 $B_s = B_b$, 即自发电厂销售给国家电网的售电量和企业外购电的电量相等时, 则 $S = (B_n - B_b)R_n - R_p Q_p + R_n B_b$. 此时应根据“两种情况”尽可能地购入 R_n 的国家电网电量转

售, 出现的不足部分应由自供电量来解决; 那么自供电量只用来解决上述不足部分, 不应该向外多供, 甚至上网售电. 如 $B_s > B_b$, 则这里的利润函数中有 3 项: $w_1 = (B_n - B_b)R_n$, $w_2 = R_p Q_p$, $w_3 = R_n B_b$. w_1, w_2, w_3 三者不同情况下的比较分析结果如表 3 所示.

表 3 不同情况下的分析结果

Table 3 Analysis results under different conditions

条件	策略
$w_1 > w_2 > w_3$	根据两种情况尽可能购入 R_n 的电网电力转售, 不足部分由自供电量解决.
$w_3 > w_1 > w_2$	结果同 $B_s = B_b$ 的情况.
$w_3 > w_2 > w_1$	最大限度地由自供电来满足企业的用电需求, 当存在不足时则由外购国家电网电转售解决; 当自供电量在满足了企业的用电需求后不应再有供电量剩余.

当 $B_s < B_b$, 那么结果同 $B_s = B_b$ 的情况.

当 $R_s = R_p$ 时, 即自发电厂销售给国家电网的售电价格与自发电厂的发电成本价格相等时, $S = (B_n - B_b)R_n + (B_s - Q_p)R_s + (R_n - R_b)B_b$.

进一步讨论: 如 $R_n = R_b$ 时, 则 $S = (B_n - B_b) \times R_n + (B_s - Q_p)R_s$. 这时应由自供电满足企业的用

电需求量, 如果不够则由外购电进行补充. 如 $R_n > R_b$, 则结果同 $R_n = R_b$ 时的情况. 如 $R_n < R_b$, 则比较公式中 $m_1 = B_n - B_b$, $m_2 = B_s - Q_p$, $m_3 = B_s$ 的售电量利润贡献率. m_1, m_2, m_3 三者不同情况下的比较分析结果如表 4 所示.

表 4 不同情况下的分析结果

Table 4 Analysis results under different conditions

条件	结果
$m_1 > m_2 > m_3$	自供电最大限度地满足企业需求, 如果企业存在不足则由购电转售补足, 如果企业还有剩余则上网销售.
$m_1 > m_3 > m_2$	结果同 $m_1 > m_2 > m_3$ 的情况.
$m_2 > m_1 > m_3$	根据两种情况企业最大限度地购入 R_n 的电网电力转售, 如果存在不足部分则由自供电量解决, 当自供电满足了上述不足部分后的剩余电量则上网销售.
$m_2 > m_3 > m_1$	根据两种情况企业最大限度地购入 R_n 的电网电力转售, 如果存在不足部分则由自供电量解决, 当自供电只用来解决上述不足部分时, 不应再多发电和上网销售.
$m_3 > m_1 > m_2$	最大限度地由自供电来满足附属企业的用电需求, 如果存在不足则由电网购电转售解决; 当自供电满足了企业的用电需求时则不应当再有供电剩余, 此时不能再有自供电量上网销售.
$m_3 > m_2 > m_1$	结果同 $m_2 > m_3 > m_1$ 的情况.

4 应用案例

某北方钢铁联合企业自备电厂装机容量为 300 MW, 每年利用的小时数最多为 8 000 h; 供电标准煤耗为 420 g/(kW·h), 上网的电价和向企业销售的电价都是 0.35 元/(kW·h), 企业单位供电成本是 0.22 元/(kW·h). 钢铁联合企业附属企业与发电厂签订的用电量合同为 2 000 GW·h/a, 其附属企业用电设备的总功率为 60 MW, 一年工作周期为 360 d, 其能够按照国家电网的峰、谷、平 3 个时段调整用电计划. 外购国家电网电量采取峰、谷、平三段电价结构, 每段为 8 h; 谷时电价为

0.242 9 元/(kW·h), 平时电价为 0.485 8 元/(kW·h), 峰时电价为 0.728 7 元/(kW·h).

计算可得自备电厂的年最大发电量 $R = 2\,400\text{ GW}\cdot\text{h}$, 而且 $R_n = R_s = 0.35$ 元/(kW·h), R_b 谷时电价为 0.242 9 元/(kW·h), 平时电价为 0.485 8 元/(kW·h), 高峰时电价为 0.728 7 元/(kW·h); $R_p = 0.45$ 元/(kW·h). 可见有 $R_s < R_b$ (峰段) 以及 $R_s > R_b$ (平段), 所以依据上述购电策略, 即自备电厂不购买国家电网平和峰时段的电力, 但可以考虑购买一定的谷时段电网电力.

由于 $R_n = R_s$, 即需要考虑购入国家电网电力转售后的单位利润贡献率、企业自供电的单位利润率. 购入国家电网电力转售后的单位利润贡献率

为 $R_s - R_b = 0.1071$ 元/(kW·h); 而企业自供电的单位利润贡献率为 $R_s - R_p = 0.13$ 元/(kW·h)。

根据上述讨论的结果可知自备电厂供电、购电的计划为: 在两种情况下最大限度地购入电量为 R_n 的电网电力转售, 缺少部分即由自供电量来解决; 实际自供的电量减去售给企业的不足电量后, 剩余的电量采取上网销售。

通过 3 节的分析及计算, 购入及转售电量 B_b 为 172.8 GW·h; 企业的自备电厂还需要供电为 1 827.2 GW·h, 自备电厂总发电量 Q_p 为 2 400 GW·h; 自发电量上网售电量为 572.8 GW·h; 这时 k 为 0.761。最后计算自备电厂利润为 45 652.288 万元, 电网购电收入是 1 850.688 万元。

如果企业采取最大限度地靠自产电的策略, 则 Q_p 为 2 400 GW·h, 需要首先满足企业用电, 即需要向企业售电量 2 000 GW·h, 再上网售电 400 GW·h。这样自备电厂利润为 14 亿元, 而电网则无利可图。

5 结 论

本文利用经济规划方法, 构建基于自发电的最优经济运营模型, 并对模型进行求解, 通过上述不同条件下的讨论, 可得知企业利润的高低主要与购入电力转售后的单位利润贡献率、自供电的单位利润率及上网的售电量有关系。由于购入电力转售后的单位利润贡献率与外购电价钱和卖给内部企业电价之差有关系, 因此鼓励企业在谷价时尽量外购电, 少发电; 而在峰价时, 尽量自发电, 少外购电, 富余的电上网销售。由于自供电的单位利润率与自备电厂外售价格和自发电成本之差有关系, 因此鼓励钢铁企业尽量最大限度利用余热余能进行动力作用发电, 进而减少自发电的成本; 这些都能够有效地改进企业的电力经济成本。

参考文献:

[1] Dutta G, Sinha G P, Roy P N. A linear programming model

for distribution of electrical energy in a steel plant [J]. *International Transactions in Operational Research*, 1994, 1 (1): 17-29.

[2] Ashok S. Peak-load management in steel plants [J]. *Applied Energy*, 2006, 83 (5): 413-424.

[3] Ostadi B, Moazzami D, Rezaie K. A non-linear programming model for optimization of the electrical energy consumption in typical factory [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2007, 187 (2): 944-950.

[4] Zheng J, Du X H, Shi X Q. Research on short term load forecasting in steel enterprises [J]. *Power Demand Side Management*, 2004, 6 (1): 18-21.

[5] 林海英, 李建荣, 宣菊琴, 等. 钢铁行业负荷特性及需求侧管理潜力分析 [J]. 华东电力, 2005, 33 (11): 53-57.
(Lin Hai-ying, Li Jian-rong, Xuan Ju-qin, et al. Load characteristics and DSM potential of iron and steel industry [J]. *Journal of East China Electric Power*, 2005, 33 (11): 53-57.)

[6] Zhou D M, Li K, Li G D, et al. Design and realization of electric load management system in iron & steel enterprises [J]. *Power Demand Side Management*, 2008, 10 (1): 28-30.

[7] 周佃民. 钢铁企业发用电经济运行体系研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
(Zhou Dian-min. The research on the optimizing operation system for power supply and demand balancing in iron and steel complex [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007.)

[8] 盛刚, 孙彦广, 梁青艳. 钢铁企业电力负荷分析与预测模型的探讨 [J]. 冶金自动化, 2011, 35 (sup1): 676-679.
(Sheng Gang, Sun Yan-guang, Liang Qing-yan. Research on electric load analysis and forecasting model for iron and steel industry [J]. *Journal of Metallurgical Industry Automation*, 2011, 35 (sup1): 676-679.)

[9] Liu J Y, Cai J J. An optimization model based on electric power generation in steel industry [EB/OL]. [2014-01-18]. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/924960>.

[10] 刘精宇, 蔡九菊, 杨靖辉. 钢铁联合企业发电技术的研究 [J]. 中国冶金, 2013, 23 (1): 50-53.
(Liu Jing-yu, Cai Jiu-ju, Yang Jing-hui. Research on the power generation styles in iron and steel works [J]. *China Metallurgy*, 2013, 23 (1): 50-53.)