

· 基础研究 ·

火电厂机组间实时负荷分配优化算法研究

A study on optimal algorithm of real-time load dispatch among thermal power units

周云山, 李国栋, 张森, 石祥彬

ZHOU Yun-shan, LI Guo-dong, ZHANG Miao, SHI Xiang-bin

(中国华电工程(集团)有限公司, 北京 100044)

(China Huadian Engineering Corporation Limited, Beijing 100044, China)

摘要:建立电力市场的目的是在电力工业引入竞争机制,通过竞争提高发电厂商的生产效率,降低发电成本。以单元机组为研究对象,基于运行数据计算获取的单元机组能耗特性曲线,建立了负荷优化的目标函数及对应的约束方程。以某厂6台机组运行数据为基础,通过优化算法实现电厂内机组间负荷的最优化分配,并对基于等微增率法、复合形法2种不同优化算法计算结果对比分析。

关键词:单元机组;能耗特性;负荷经济分配;等微增率法;复合形法

中图分类号:TK 212;TM 621

文献标志码:A

文章编号:1674-1951(2008)06-0022-05

Abstract:To build the power market is for introducing competition mechanism in power industry, improving the production efficiency and lowering the power generation cost. According to the energy consumption characteristics curves gotten from operation data, the load optimal objective function and the restrained equation were constructed for thermal power unit. Based on the operation information of six units in one power plant, the optimum dispatch was realized among those units by using optimal algorithm, and the results, which were calculated by equal-microincrease rate method and complex method, were compared and analyzed.

Key words:unit; energy consumption characteristics; load economic dispatch; equal-microincrease rate method; complex method

0 引言

发电侧电力市场主要考虑的是电网的频率稳定性和安全性,而对发电侧,主要是由各个发电厂商根据系统负荷需求和中短期负荷预测结果等数据来决定次日报价。相对发电厂商而言,其报价要决定的因素是决定机组实时运行状况的发电成本。

电力系统中的主力火电机组均为单元式结构的大型机组。汽机、锅炉、发电机三位一体,共同构成发电侧的最小环节,因此,对参与电力负荷分配的机组而言,必须从机组单元的角度、从整体上考虑单元机组的能耗特性,从而为实现分配负荷奠定基础。据国内外统计资料表明,实现经济负荷分配可节约0.1%~1.5%的燃料^[1]。

此研究基于机组间性能优劣而进行负荷分配以

提高全厂经济性,采用单元机组标准煤耗量作为分析的目标函数。

1 单元机组能耗特性曲线

机组在稳定运行状态下,输入的燃料 F 与输出电功率 P 间的对应关系即为单元机组的能耗特性,可表示为

$$F = f(P)。$$

单元机组整体能耗性能计算分为锅炉能耗特性、汽轮机能耗特性及单元机组能耗特性计算。机组的热力计算采用常规热平衡方法,关于流量基准,有多种选择:主蒸汽流量、凝结水流量、给水流量。本文根据现场实际情况,以主给水流量为基准(未计及过热减温水流量)。

1.1 锅炉能耗特性计算

锅炉运行的基本参数是锅炉的额定蒸发量及在此蒸发量下过热器出口处的蒸汽压力和温度。对应

于锅炉最高效率点的负荷称为锅炉的经济负荷。锅炉最低负荷是指锅炉燃烧情况相当稳定且不致破坏锅炉正常运行的最小负荷,从负荷分配角度考虑的负荷下限一般是由锅炉燃烧稳定性即最低稳燃负荷所限制,本文根据某电厂低负荷下稳定燃烧实际考虑,将机组出力下限定为额定功率 70%。

锅炉能耗特性包括锅炉效率、煤耗量、煤耗损失、煤耗微增率、单位煤耗等,其均为锅炉负荷(锅炉蒸发量)的函数。

1.1.1 锅炉效率 η 及煤耗量计算

计算锅炉效率的目的是为了获得机组的煤耗,而煤耗特性是用于作优化调度的基准,相当于机组间相互性能的平衡比较,并非纯粹考核单台机组经济性,故其绝对值的准确性对最终结果的影响较小。

反平衡方法是通过测取锅炉中各项损失而得到锅炉效率 $\eta_{gl}^{[2]}$

$$\eta_{gl} = q_1 = \frac{Q_1}{Q_r} \times 100 = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6),$$

式中: Q_1 为有效利用热量; Q_r 为输入总热量。

计算得到热耗量 Q_0 , 同时从实时数据采集系统得到发电机功率 P , 则可以得到热耗率, 在此基础上可以得到煤耗率、煤耗量。

热耗量由下式计算得到

$$Q_0 = (D_0 h_0 - D_{fw} h_{fw} - D_{sd} h_{sd}) + [D_{th} (h''_{th} - h'_{th}) + D_{rd} (h'_{th} - h_{rd})],$$

式中: D_{sd} 为过热减温水流量, t/h; h_{sd} 为过热减温水焓值, kJ/kg; D_{rd} 为再热减温水流量, t/h; h_{rd} 为再热减温水焓值, kJ/kg; D_{th} 为再热汽流量, t/h; h''_{th} , h'_{th} 为再热器热侧、冷侧蒸汽焓值, kJ/kg。

热耗率 q_0 计算

$$q_0 = \frac{Q_0}{P}。$$

在此基础上, 逐项计算煤耗率、燃煤消耗量, 为便于不同电厂间比较, 根据公式计算出热耗率后, 再转换为标准煤耗率

$$b^s = \frac{q_0}{Q_d \times \eta_b \times \eta_p},$$

式中: Q_d 为标准煤低位发热量, 通常取值为 29 310 kJ/kg; η_b 为锅炉效率; η_p 为管道效率, 通常取 0.985 ~ 0.99, 文中取 0.99。

此时, 标准煤耗量为

$$B^s = b^s P = \frac{Q_0}{29\,310 \times \eta_b \times \eta_p}。$$

1.1.2 煤耗损失计算

煤耗损失量由下式计算^[3]

$$\Delta F = 0.0914 \frac{100 - \eta_b}{\eta_b} D,$$

式中, D 为锅炉蒸发量, t/h。

由以上数据即可得到煤耗损失 - 锅炉蒸发量负荷即 $\Delta F - D$ 关系曲线。为保证曲线为单调凸函数形式, 数据处理过程中采用加权最小二乘法多次迭代处理; 同时, 为取得拟合曲线多项式尽可能精确, 对多项式最佳拟合次数进行了计算分析。得到二次多项式

$$\Delta F = a[0] + a[1]D + a[2]D^2,$$

式中, $a[0]$, $a[1]$, $a[2]$ 分别为采用最小二乘法拟合得到的多项式系数。

在此基础上得到煤耗损失微增率

$$\Delta b_b = \frac{d\Delta F}{dD} = a[1] + 2a[2]D。$$

煤耗微增率

$$b_b = 0.0914 + \Delta b_b。$$

锅炉的煤耗量

$$F = 0.0914D + \Delta F。$$

对应各个负荷的锅炉蒸发量、煤耗损失量、煤耗微增率、煤耗量可由以上计算得到, 同时可以得到对应的关系曲线。在处理曲线过程中, 采用最小二乘法拟合不易保证微增率曲线为单调递增。对于离线计算, 可对试验得到的原始效率曲线点进行预先平滑处理; 而对于实时计算, 采用加权最小二乘法可保证曲线为单调上凸特性^[4]。

1.2 汽轮机能耗特性计算

汽轮机运行的基本参数是额定负荷下新汽压力和温度、额定负荷、经济负荷、最低负荷。汽轮机最低负荷主要取决于叶片冷却条件所必需的最小蒸汽流量。汽轮机能耗特性主要是指耗汽量与对应负荷关系特性。

汽轮机的耗汽量与负荷关系曲线为上凸曲线, 且与排汽压力 p_2 和进汽压力 p_0 的比值 $\alpha = p_2/p_0$ 有关, 比值越大, 曲线凸起程度越明显。此外, 还同调速系统的类型有关。

对凝汽式汽轮机, 耗汽量和负荷关系曲线可用下式表示

$$D = D_0 + dP,$$

式中: D_0 为无负荷时汽轮机的耗汽量, t/h; d 为微增汽耗率, t/(kW · h); P 为汽轮机负荷, MW。

上述汽轮机特性曲线可以通过试验得出。为了

便于将不同品质的蒸汽进行比较,将含热量为 2679.552 kJ/kg 的蒸汽定义为标准蒸汽。换算前蒸汽即称为原蒸汽^[3]。

将由原蒸汽表示的耗汽量特性曲线换算成由标准蒸汽表示的耗汽量特性曲线。

根据汽轮机的效率试验和给水温度曲线,就可以按照下述方法计算得到汽轮机最终耗汽量和微增耗汽率特性曲线。

(1) 由试验结果绘制得到原蒸汽的耗汽量特性曲线和给水温度曲线。

(2) 在原蒸汽耗汽量特性曲线上取 3 个负荷点,即最低负荷 P_{\min} 、经济负荷 P_e 、最高负荷 P_{\max} ,分别得到与之对应的原蒸汽耗量 D_n^{\min} 、 D_n^e 、 D_n^{\max} 。

(3) 由给水温度特性曲线得到对应于负荷的给水温度点数值。

(4) 按照下式得到标准蒸汽耗量特性曲线

$$D = D_n \frac{h_0 - h_{fw}}{2679.552},$$

式中: D 为标准蒸汽耗量, t/h; D_n 为原蒸汽耗量, t/h; h_0 为新蒸汽焓值, kJ/kg; h_{fw} 为给水焓值, kJ/kg。

(5) 采用分段方法得到微增耗汽率。

$$d = \frac{D_e - D_{\min}}{P_e - P_{\min}}, P \leq P_e;$$

$$d = \frac{D_{\max} - D_e}{P_{\max} - P_e}, P > P_e。$$

(6) 由以上数据得到汽轮机的标准蒸汽耗量特性曲线和微增耗汽率特性曲线。

1.3 单元机组能耗特性计算

给定电厂的负荷值 P , 从汽轮机特性曲线可以得到汽耗量 D 、微增耗汽率 d ; 由汽耗量根据锅炉能耗特性曲线可以得到标准煤耗量 F 、煤耗微增率 b_b 。很明显, 锅炉煤耗量、煤耗微增率是同单元机组给定负荷相对应的。

整个单元机组的微增煤耗率, 即出力变化引起机组煤耗变化(综合考虑了锅炉部分、汽轮机部分)可以由下式得到

$$b_{\text{unit}} = db_b。$$

因此, 得到了在一定负荷下的标准煤耗量和微增煤耗率值, 即可得到机组的对应标准煤耗量特性曲线, 如图 1 所示。

汽机、锅炉的各种无法计算的热损失, 如蒸汽沿程流动损失等, 在汽轮机能耗特性中考虑运行系数加以计入。系数通常为 1.01 ~ 1.05, 本文取 1.01。

实时分析机组的特性曲线是实现在线负荷优化

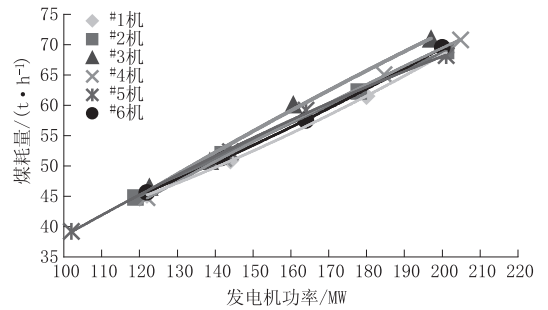


图 1 机组标准煤耗量特性曲线

分配的前提和基础, 要得到最优的负荷分配方案, 首先需要得到各机组准确的实时特性曲线, 这可以应用数据采集系统的实时数据, 通过电厂的局域网与 MIS 通信, 定期由 MIS 读取数据; 或直接由 DCS 取数, 然后以 TCP/IP、UDP 的形式实现数据通讯, 获取实时数据。

计算锅炉效率和煤耗过程中, 飞灰的含碳量是机组效率的主要影响因素, 含碳量通常与煤种、磨煤细度(或磨煤机效率)、煤粉一/二次风分布、温度等影响因素有关, 由于现场测量条件的限制, 以上参数的最新数据均由每班运行人员以手工录入。

此外, 以上关于机组热耗率的计算简化了相当部分的影响因素, 如再热喷水减温的计及、高缸至中缸流量、主汽门及调门流量等。根据现场测点状况, 在计算机组热耗量过程中, 适当考虑了相关因素。

2 等微增率法分析

煤耗及其微增率曲线是连续可微的, 在实际状况下, 通过对运行数据、热力试验数据进行强制性拟合可以得到单调连续可微函数表达式。

单元机组总煤耗量 $F = F_1 + F_2 + \dots + F_n$ 最小, 作为函数寻优的目标函数。

求解条件是

$$\frac{dF_1}{dP_1} = \frac{dF_2}{dP_2} = \dots = \frac{dF_n}{dP_n} = \lambda。$$

在等微增率方法原理基础上, 应用实际解析算法进行阐述。

煤耗特性方程为

$$F_i = a_0[i] + a_1[i]P_i + a_2[i]P_i^2,$$

式中, $a_0[i]$ 、 $a_1[i]$ 、 $a_2[i]$ 分别为第 i 台机组能耗特性采用最小二乘法拟合得到的多项式系数。

则煤耗微增率特性方程为

$$b_i = \frac{dF_i}{dP_i} = a_1[i] + 2a_2[i]P_i。$$

λ 可按下式求得

$$\lambda = \frac{P_r + \sum \frac{a_1[i]}{2a_2[i]}}{\sum \frac{1}{2a_2[i]}}$$

$$P_i = \frac{1}{2a_2[i]} \times \frac{P_r + \sum \frac{a_1[i]}{2a_2[i]}}{\sum \frac{1}{2a_2[i]}} - \frac{a_1[i]}{2a_2[i]}$$

由于单元机组有出力上下限制 ($P_{\min} \leq P_i \leq P_{\max}$), 使得按照以上公式计算得出的负荷 P_i 不一定满足机组出力要求。此时, 将超限机组的承担负荷值人为定在出力上(下)限上, 重新迭代计算求解。

3 复合形法分析

$$F = \sum_{i=1}^n F_i(P_i)$$

目标函数:

$$P_{\min} \leq P_i \leq P_{\max}$$

约束条件:

$$a \leq \sum_{i=1}^n P_i \leq b$$

式中, a, b 为绝对值很小的正、负实数。

复合形法来源于非线性规划的单纯形法。在 n 维空间中, 单纯形是由处于相异超平面上的 $n+1$ 个顶点构成的该空间的最简几何图形, 而由 $k > n+1$ 个顶点构成的图形即为复合形。

复合形法是求解约束非线性最优化问题的一种重要的直接方法, 其迭代计算只需要计算目标函数值, 无需求其导数。复合形法的基本思想是: 利用复合形各个顶点处目标函数值的大小关系, 判断目标函数值的下降方向, 不断丢掉函数值最大的所谓最差点, 代之以既使目标函数值有所下降也能满足所有约束条件的一个新点, 从而不断地构成新的复合形。对于可行域为凸规划集的情况, 只要保证所有复合形顶点都在可行域内, 那么其形心点、反射点、扩张点自然也都在可行域内。

复合形法大致解算方法是在决策变量的可行域内选定 $k > n+1$ 个顶点构成初始复合形, 求出 k 个顶点对应的目标函数值, 比较其大小, 找出函数值最大的最坏点 X_b 、次坏点 X'_b 及函数值最小的最好点 X_1 。找出除 X_b 外余下各顶点的形心点 X_c , 再求 X_c 的反射点 X_r 。若 X_r 不在可行域, 则收缩至可行, 并使目标函数 $f(X_r) < f(X'_b)$ 。以点 X_r 取代 X_b , 构成新的复合形, 重复以上迭代过程, 直至

$|f(X_b) - f(X_1)| < \varepsilon$, 终止搜索, X_c 即为最优解。

计算中取 $k=2n$, 相对单纯形中的 $n+1$ 增加了顶点, 因而在搜索过程中, 多面体不易变坏而导致搜索失败。

复合形的顶点代表一种负荷分配方案, 各个顶点的 6 个坐标分别对应 6 台机组所带负荷。复合形初始第 1 个顶点定为 $X_1 = \left\{ \frac{P_r}{6}, \frac{P_r}{6}, \frac{P_r}{6}, \frac{P_r}{6}, \frac{P_r}{6}, \frac{P_r}{6} \right\}$, 作为比较的基准值, 然后用随机方法产生另外 11 个顶点, 并保证其位于可行域内。复合形法属于直接寻优法, 通过计算发现, 虽然其计算结果较为准确, 但搜索时间较长, 适合于离线分配指导计算用。

4 全厂负荷优化分配实现

负荷优化系统的数据获取可以采用 2 种方式: 一种是将现场实时采集的数据在送入电厂数据库的同时, 直接将其中的相关部分发送给负荷优化系统 (如图 2 中空心箭头所示); 另一种是从电厂数据库中读取所有的输入数据。

在 2 种方式中, 计算所需的非现场实时采集数据均由数据库获得。在对输入数据进行处理、计算、分析后, 负荷优化系统的计算结果送电厂数据库存储、管理。计算结果的发布、显示以及报表生成完全基于电厂数据库统一进行, 以维持规范和格式的统一性。显然, 这种“外挂式”结构不影响电厂原有系统的安全运行, 而且简便易行。

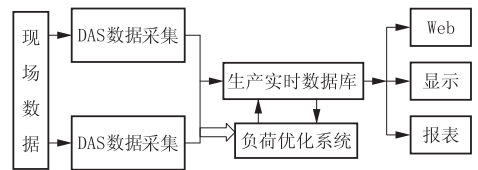


图 2 负荷优化系统在监控系统中的位置

以某厂 6 台 200 MW 机组的电厂为算例, 对全厂负荷优化调度指导进行模拟计算, 其总发电容量为 1200 MW。随着发电侧电力市场的建立, 电力市场中客户端软件可以为电厂提供比较完善的电网侧数据。为提高电厂运行经营的经济性, 电厂能够随时跟踪电网负荷潮流状况、市场周边电厂生产状况、厂内各机组实时生产性能状况等来及时调整电厂的生产运行。

在得到以上机组能耗特性的基础上, 应用前文所述的等微增率分配方法、复合形法的原理进行计算, 并与平均分配厂级负荷为对比条件, 不同调度方式对比结果见表 1。

表1 不同调度方式对比表(220 MW)

全厂负荷/ MW	分配方案	#1 机出力/ MW	#2 机出力/ MW	#3 机出力/ MW	#4 机出力/ MW	#5 机出力/ MW	#6 机出力/ MW	优化分配后全厂煤 耗量/(t·h ⁻¹)	对比平均分配负荷 节约煤耗/(t·h ⁻¹)
870	1	154.56	142.23	140.00	140.00	147.08	146.13	315.40	0.38
	2	157.23	140.19	140.00	140.00	146.21	147.47	314.63	1.14
960	1	166.10	188.22	140.00	143.27	162.22	160.18	342.02	0.93
	2	165.81	190.37	140.00	142.85	161.46	161.68	341.54	1.41
1050	1	175.87	220.00	140.00	166.99	175.04	172.08	369.98	1.40
	2	178.81	218.42	140.00	165.82	173.49	176.11	370.15	1.23
1140	1	189.20	220.00	150.58	199.36	192.53	188.31	399.57	1.50
	2	188.15	220.00	152.67	198.67	193.37	189.39	400.53	0.54
1230	1	207.26	220.00	171.16	220.00	208.53	207.09	429.86	2.15
	2	210.26	220.00	171.31	219.92	205.66	208.20	430.71	1.76

表1中分别表示对应于5种系统负荷需求下,运用2种负荷优化调度计算程序对全部6台机组投入时计算所得到的各自承担负荷。

5 结论

通过对不同优化算法计算过程的对比,可以得到如下结论。

(1)不同系统负荷需求下,不同调度方式节约能耗量有较大差距。在单机负荷限制分别为200 MW、220 MW 2种边界条件下,在840~1200 MW 负荷需求区域,对比可知等微增率法能保持较好的稳定性,如图3、图4所示。

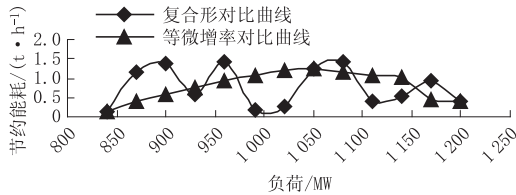


图3 各种算法优化效果对比图(200 MW)

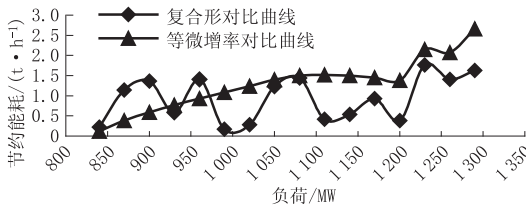


图4 各种算法优化效果对比图(220 MW)

(2)对全负荷需求大于1200 MW时,等微增率法节约能耗曲线出现偏差。作者分析认为,它是由于等微增率法对性能曲线精确度有较高要求(等微增率法对煤耗、煤耗微增率曲线要求为递增、可微)。对于未改造机组,200 MW以上数据采用线性外推算法实现,有可能造成微增率曲线失真。

(3)复合形法为直接搜索逼近寻优,其优弧节约能耗曲线呈现非规律性。作者分析认为,它是由于其求解优化过程中,为求得时间与优化效果的平衡,搜索逼近未能实现全局最优;同时,初始数据点随机生成带有非确定性。

对于优化算法的选取,见仁见智。通过对大量数据、图表对比分析,作者认为,等微增率法具有高可靠性;复合形法作为一种搜索寻优方法,可以作为离线分析数据处理。

参考文献:

- [1] J H Park, YS Kim, Y Lee. Economic Load Dispatch for Piecewise Quadratic Cost Function Using Hopfield Neural Networks[J]. IEEE Transactions on Power System, 1993(3): 1030-1038.
- [2] 郑体宽. 热力发电厂[M]. 北京:水利电力出版社,1995.
- [3] 李朝安. 发电厂及电力系统经济运行[M]. 乌鲁木齐:新疆人民出版社,1985.
- [4] 范明玉,张莹. 最优化技术基础[M]. 北京:清华大学出版社,1992.

(编辑:刘芳)

作者简介:

周云山(1975—),男,湖北宜昌人,中国华电工程(集团)有限公司工程师,从事电力工程设计方面的工作。

李国栋(1972—),男,甘肃兰州人,中国华电工程(集团)有限公司高级工程师,从事电力工程设计方面的工作。

张淼(1977—),男,河北唐山人,中国华电工程(集团)有限公司工程师,从事电力工程设计方面的工作。

石彬彬(1970—),男,四川自贡人,中国华电工程(集团)有限公司工程师,从事电力工程设计方面的工作。