

负荷优化运行模型及其算法研究

张志福, 苏宜强, 曹海猛
(连云港供电公司, 江苏 连云港 222004)

摘要:借助分时电价,企业通过优化负荷的运行方式,可避开峰时电价,节约用电成本。介绍了企业生产流程中影响负荷优化运行的重要因素,建立了基于分时电价的负荷优化运行模型,提出了用启发式求解方法,算例表明,基于分时电价的负荷优化运行模型及其算法,符合实际,具有一定的实用性。

关键词:需求侧管理;负荷优化运行;分时电价

中图分类号: TM714

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2013)01-0040-03

分时电价(TOU)作为电力系统错峰的重要手段,在我国已得到了广泛的应用^[1]。电力用户通过合理安排用电时间,优化负荷的运行方式节约电费开支。目前很多用户缺少负荷优化运行的技术手段,使得用户对分时电价的灵敏度不高^[2],一定程度上影响了分时电价的实施效果。所谓负荷的优化运行是指优化和调整负荷的运行时段,达到节约用电成本的目的。在负荷优化运行方面,国外学者有不少研究,针对具体生产流程提出了负荷优化运行模型。文献[3]运用模糊逻辑理论建立了能量管理模型,文献[4]应用整数规划方法建立负荷最优控制模型,消减钢铁生产过程中高峰负荷,文献[5]运用混合整数规划方法模拟和优化钢铁厂的电力负荷,文献[6]应用0-1规划方法建立负荷优化控制模型。国内相关研究较少,文献[7]介绍了蒸馏装置负荷优化运行的应用,文献[8]建立了钢铁企业生产的能源动态分配模型,以上研究基本局限于具体的生产流程。文中主要探讨考虑分时电价的负荷优化运行,即将TOU高峰时段的负荷转移至TOU低谷时段,应用0-1规划理论提出了一种较为通用的负荷优化运行模型及其求解方法,算例表明该模型符合实际,具有一定的实用性。

1 负荷优化运行的制约因素

负荷优化运行受到多种因素的限制,在现代企业中,生产环节繁多,协作关系复杂,某一环节没有按计划实施,将会影响整个生产系统的运行^[9]。因此,负荷优化运行首先要满足生产过程中工序、工艺、设备、环保、安全、质量、供应、销售、服务等方面的动态性限制,再考虑将TOU高峰时段的负荷转移到TOU低谷时段。例如,在铸造行业,高温炉的工作都要经过加温和保温的交替过程,交替周期较长,通过改变生产计划和班次将加温过程放在TOU谷段,保温过程安排在TOU峰段。另外,用电企业实施负荷优化运行的同

时,还需考虑其所带来的附加成本,如负控装置,生产工艺改造等费用。

2 负荷优化运行模型

企业的生产流程往往由多个单线程组合而成,每个单线程又由多个工序构成。考虑到多线程的复杂性,仅针对单线程实施负荷优化,建立负荷优化运行模型。

分析生产过程中的能耗结构之后,根据实际情况假设如下:

- (1) 企业的容量电价为 M ,元/(kV·A);
- (2) 分时电价函数为 $p(t)$,元/(kW·h);
- (3) 某时刻的用电功率为 $P(t)$,kW;
- (4) 企业生产流程的最大负荷为 D ,kW;
- (5) 该生产流程的电度费用为 W ,元;
- (6) 生产流程各单元开关状态向量矩阵 U , U 为待求向量矩阵。

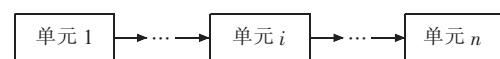


图1 企业生产流程结构

如图1所示,将企业的某一生产流程分为 n 个单元,运行时段为 $[t_0, t_f]$,负荷优化将造成最大负荷的变化,需要考虑电度费用和容量费用总和,即以企业用电成本最小化函数为:

$$\min W = \int_{t_0}^{t_f} \sum_{i=1}^n P_i(t) u_i(t) p(t) dt + M \cdot \left\{ \max \sum_{i=1}^n P_i(t) u_i(t) \right\}$$

$$\text{st } g(u_1(t), u_2(t), u_3(t), \dots, u_n(t)) \leq 0 \quad (1)$$

式中: $p(t)$ 为电价函数; $P_i(t)$ 为 i 单元 t 时刻的功率; $u_i(t)$ 为 i 单元 t 时刻的运行状态函数, $u_i(t)=1$, 表示第 i 个单元处于运行状态, $u_i(t)=0$, 表示第 i 个单元处于关闭状态; $g(u_1(t), u_2(t), u_3(t), \dots, u_n(t)) \leq 0$ 为生产工艺约束条件的数学表达式,描述了生产工艺中流量速度、能量大小、最大负荷、传输速度、损耗以及工序对调整负荷运行方式的约束。

在最优控制问题中,求解时变函数最优模型的方法一般取决于 Pontryagin 最大化定理^[10]和时变函数的决策变量,而这些方法不适合公式(1)的求解,为了应用计算机求解,需将公式(1)离散化,转化为 0-1 整数规划问题。将 $[t_0, t_f]$ 时段 N 等份, $t_s = (t_f - t_0)/N$, 于是以企业用电成本最小化函数为:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N P_i^j u_i^j p^j T_s + M \cdot \left\{ \max \sum_{i=1}^n P_i^j u_i^j \right\} \\ \text{st} \quad & g(U) \leq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

其中:

(1) $P_i^j = P_i((j-1)T_s), u_i^j = u_i((j-1)T_s), p^j = p((j-1)T_s), i$ 和 j 的变量范围 $\{u_i^j: 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq N\}$ 。

$$(2) U = \begin{bmatrix} u_1^1 & u_1^2 & \dots & u_1^N \\ u_2^1 & u_2^2 & \dots & u_2^N \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_n^1 & u_n^2 & \dots & u_n^N \end{bmatrix}, \text{是待求的变量矩阵,它表示}$$

了所有单元在所有时刻的状态。

(3) $g(U) \leq 0$ 是生产工艺约束条件的数学表达式,即生产工艺中流量速度、能量大小、最大负荷、传输速度、损耗以及工序的约束。

3 求解方法的选择

对于有 n 个变量的 0-1 规划问题,由于每个变量只取 0,1 两个值,故 n 个变量所有可能的 0-1 组合数有 2^n 个。目前最普遍的解法就是枚举法,在此基础上人们采用了隐枚举法、遗传算法、动态规划法等方法,虽然在一定程度上加快了求解速度、缩短了问题的解决时间,但这些方法只能当变量较小时可达到优化的目的。

文献[11]介绍的大型 0-1 目标规划的启发式算法具有运算速度快、精度高的优点,适合解决模型系数无限制、变量多的大规模实际问题。文中将结合案例建立基于分时电价的负荷优化运行模型,并运用完全枚举法和启发式算法对其进行求解。

4 案例应用

以某煤矿运输系统的改造为例,选取煤矿生产系统中的成品煤传输系统(Q-group)作为研究对象,对传送带 Q_1 的运行时间进行优化控制。

如图 2 所示, Q-group 存储仓中的成品煤由传送带 Q_1 输送至装载仓,再由传送带 Q_2 装入运煤车。表 1 给出了 2010 年 11 月 4 时至 2010 年 11 月 8 时段运煤车的到站时刻。当运煤车到站时,为了节约装载时间, Q_2 将立即运行。装载过程中, Q_1 一旦发现装载仓有空

余,将第一时间将装载仓填满。通过分析发现,参照分时电价适当调整 Q_1 的运行时间,可以节约电费开支。

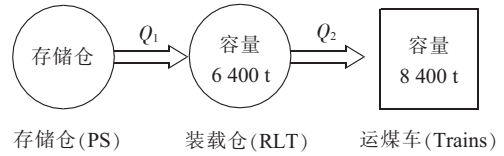


图 2 出口煤传输系统(Q-group)流程

表 1 运煤车到站时刻表

车次	日期	时间	统一时刻
1	2010-11-04	04:00	0+4=4
2	2010-11-04	22:00	0+22=22
3	2010-11-05	07:00	24+7=31
4	2010-11-06	04:00	48+4=52
5	2010-11-06	15:00	48+15=63
6	2010-11-07	01:00	72+1=73
7	2010-11-08	03:00	96+3=99
8	2010-11-08	23:00	96+23=119

4.1 Q-group 参数及建模分析

根据 Q-group 系统的实际运行情况,将实际问题转化为数学问题。

(1) Q-group 中具体的参数如下:装载仓(RLT)的容量 M_{RLT_max} 为 6 400 t;运煤车(Trains)容量 M_{Trains_max} 为 8 400 t; Q_1 输送能力 r_{Q_1} 为 995 t/h; Q_2 输送能力 r_{Q_2} 为 2 100 t/h。

(2) 参照式(1),建立 Q_1, Q_2 运行状态函数 $u_{Q_1}(t), u_{Q_2}(t)$ 。现场运煤车装煤所需时间 T_L 为 4 h (M_{Trains_max} / r_{Q_2}), 根据表 1 中列车到站时刻, 得出 Q_2 运行状态函数, 如图 3 所示。

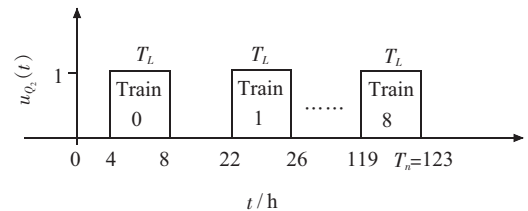


图 3 Q_2 运行状态函数

(3) 装载仓(RLT)某一时刻的煤存量为:

$$m_{RLT}(t) = m_{RLT}(t_0) + \int_{t_0}^t [r_{Q_1} \cdot u_{Q_1}(\tau) - r_{Q_2} \cdot u_{Q_2}(\tau)] d\tau \quad (3)$$

其中 t_0 为起始时间, $r_{Q_1}, r_{Q_2}, u_{Q_2}(t)$ 均为已知, $u_{Q_1}(t)$ 为待求量。

(4) 当地实施的分时电价为:

$$p(t) = \begin{cases} p_p & t \in [8, 12) \cup [17, 21) \text{ 峰} \\ p_s & t \in [12, 17) \cup [21, 24) \text{ 平} \\ p_0 & t \in [0, 8) \text{ 谷} \end{cases}$$

4.2 目标函数及约束条件

为使企业用电成本最小,结合式(1),建立最优化模型:

$$\begin{aligned} \min J &= \int_{t_0}^{t_n} p(\tau)u_{Q_1}(\tau)d\tau \\ \text{st } m_{\text{RLT}}(t) &\geq 0, \forall t \in [t_0, t_N] \\ m_{\text{RLT}}(t) &\leq M_{\text{RLT_max}}, \forall t \in [t_0, t_N] \end{aligned} \quad (4)$$

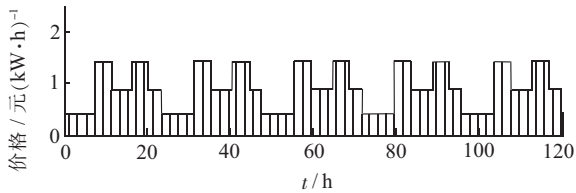
公式(4)离散化后,得到:

$$\begin{aligned} \min T_s \cdot \sum_{i=1}^N P(t_i)u(t_i)p(t_i) + M \cdot \{\max P(t_i)u(t_i)\} \\ \text{st} \\ -\sum_{t_i=t_0}^{T_{N-1}} u_{Q_1}(t_i) \leq -\left(\frac{0 - m_{\text{RLT}}(t_0) + (T_s \cdot r_{Q_2}) \sum_{t_i=t_0}^{T_{N-1}} u_{Q_2}(t_i)}{T_s \cdot r_{Q_1}} \right) \\ \sum_{t_i=t_0}^{T_{N-1}} u_{Q_1}(t_i) \leq \left(\frac{6400 - m_{\text{RLT}}(t_0) + (T_s \cdot r_{Q_2}) \sum_{t_i=t_0}^{T_{N-1}} u_{Q_2}(t_i)}{T_s \cdot r_{Q_1}} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

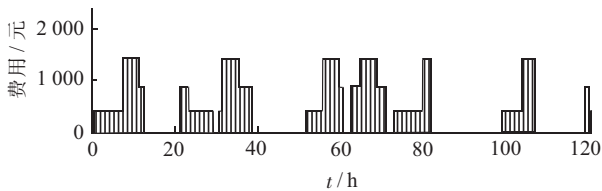
其中, $T_s = (t_n - t_0) / N$, 由于负荷优化前后最大功率未发生变化,取 $P(t_i)$ 为 1。

4.3 优化结果

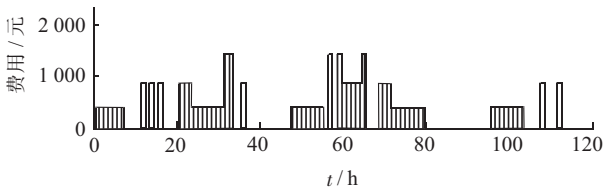
文中的算例是一个参数多达 124 个的 0-1 规划问题,借助 Matlab 中的 *Binprog* 函数可以完全枚举所有组合^[12],得出 u_{Q_1} 的最优解,如图 4 所示。



(a) 分时电价



(b) 负荷 Q1 优化前的电度费用



(c) 负荷 Q1 优化后的电度费用

图 4 负荷优化前后 Q1 的电度费用

针对启发式算法已经编制了程序,并在计算机上实现,也得出同样结果。这 2 种算法对比如下。

(1) 用完全枚举法。目标函数计算 2.12×10^{37} 次,

约束条件计算 4.24×10^{37} 次,总共计算 6.36×10^{37} 次,耗时 2 h。

(2) 用启发式算法。目标函数计算 4.23×10^{35} 次,约束条件需要计算 8.26×10^{35} 次, 1.23×10^{36} 总共需要计算 128 次,耗时 10 min。

负荷优化前后 Q_1 的电度费用如图 4 所示。图 4(b) 给出了未实施负荷优化前 Q_1 的运行时间分布,此时, Q_1 的运行不受 TOU 的影响。图 4(c) 给出了实施负荷优化后 Q_1 的运行时间分布, Q_1 的运行受到 TOU 的影响,尽量避开在 TOU 高峰时段运行。

Q_1 的能耗成本积累曲线如图 5 所示,实施负荷优化后,使得 Q_1 的费用从 5.2 万元降低到 3.7 万元,节约电费 29%。

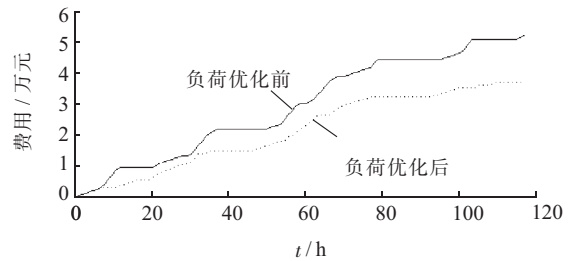


图 5 负荷优化前后 Q1 的费用对比

5 结束语

通过案例可以看出,负荷优化后在 5 个工作日内消减电费 29%。可见,通过对设备运行状态进行最优控制,可以节约用电成本。另外,当模型中变量较多时,选用启发式算法求解,较传统的枚举法具有计算时间快的优点。上述模型和算法同样也适用于自来水厂、钢铁厂等生产流程的优化改造。

参考文献:

- [1] 国家电网公司. 电力需求侧管理工作指南[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [2] 程 瑜, 翟娜娜. 面向智能电网的峰谷分时电价评估[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 196-214.
- [3] CHAABENE M, AMMAR M B, ELHAJJAJI A. Fuzzy Approach for Optimal Energy Management of a Domestic Photovoltaic Panel [J]. Applied Energy, 2007, 84(10): 992-1001.
- [4] ASHOK S. Peak-load Management in Steel Plants [J]. Applied Energy. 2006, 83(5): 413-424.
- [5] NOLDE K, MORARI M. Electrical Load Tracking Scheduling of a Steel Plant [J]. Computers & Chemical Engineering, 2010(34): 1899-1903.
- [6] ZHANG J, XIA X. Best Switching Time of Hot Water Cylinder Switched Optimal Control Approach [C]. Proc. of the 8th IEEE AFRICON Conference, Namibia, 2007.
- [7] 赵晓军, 杨敬一, 徐心茹. 卡宾达原油常减压蒸馏装置负荷转移技术的模拟与分析[J]. 当代石油石化, 2006(10): 29-33.
- [8] 郭 宇, 茹海鹏. 钢铁企业能源分配动态优化数学模型[J]. 硅谷,

快速,从而忽略了最优解。以计量中心全部 72 个二级库房,使用 20 辆车来进行配送,预计初始群体需要达到 10 万,进化次数达到 4 000,计算结果就可以达到令人满意的效果。

若对最优解有较为强烈的要求,则应该设置一个中等的初始群体大小和进化次,再进行多次运算。

3.6 扩展应用

在实际使用中,可以采用插件的方式对算法进行定制,如将平均等时间加入到适应函数中,也可以动态地加入路况信息以得到更合理的配送路径^[4]。同时由于单亲遗传算法的效率非常高,故而可以在情况不明确(如配送车辆的数量,配送频率不确定)的情况下,进行多次计算,从而为不同的配送方案的评估提供参考信息。

4 结束语

在充分分析计量中心配送车辆调度需求的基础上建立了数学模型,不仅解决了传统遗传算法容易“早熟收敛”的问题,而且创新地采用了插件方式,更容易在求解过程中进行动态的约束添加,从而进一步提高算法可用性的寻优能力。算法的计算结果也表明了该算

法不仅性能卓越,而且其寻优性能非常突出。文中构造单亲遗传算法的思路是以整数编码方式为基础,添加了虚拟中心仓库来构造完整的路径表达式,该方法不仅可以在路径计算中使用,也可以作为求解其他组合优化问题的参考。

参考文献:

- [1] SZCZERBICKA H, BECKER M, SYRJAKOW M. Genetic Algorithms: A Tool for Modelling, Simulation and Optimization of Complex Systems[J]. Cybernetics and Systems, 1998, 29(7): 639-659.
- [2] SCHMITT LOTHAR M. 遗传算法理论, Theoretical Computer Science (259), 2001: 1-61.
- [3] SCHMITT LOTHAR M. 遗传算法理论(二), Theoretical Computer Science (310), 2004: 181-231.
- [4] 曹一家. 并行遗传算法在电力系统经济调度中的应用—迁移策略对算法性能的影响[J]. 电力系统自动化. 2002, 26(13): 23-27.

作者简介:

尹 飞(1978),男,安徽和县人,工程师,从事计量与自动控制相关系统研发工作;

李新家(1969),男,江苏泰州人,高级工程师,从事计量与自动控制相关系统研发工作;

祝永晋(1981),男,江苏六合人,工程师,从事计量与自动控制相关系统研发工作。

Research of Single-parent GA Algorithm on Power Measuring Tools Delivery

YIN Fei, LI Xin-jia, ZHU Yong-jin

(Jiangsu Electric Power Research Institute Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: The problems existing in measuring tools delivery under the actual operation of the measuring center are discussed. In the view of the situation that measuring center has a lot of secondary level warehouses, all of which are distributed in whole province, and need to be delivered uniformly, how to apply the mathematical model of the single-parent GA algorithm for measuring center is discussed. The comparison shows that the single-parent GA algorithm could achieve good results on measuring tools delivery of measuring center.

Key words: measuring tools delivery; vehicle routing problem; single-parent GA algorithm

(上接第 42 页)

2008(13): 106-107.

[9] 何衍庆,黎冰,黄海燕. 工业生产过程控制[M]. 2 版. 北京:化学工业出版社,2010.

[10] 赖炎连. 最优化方法[M]. 北京:清华大学出版社,2009.

[11] 严凌. 大型 0-1 目标规划的启发式算法[J]. 上海理工大学学报,1998(20): 254-256.

[12] 潘君. 整数规划的分支定界法及其 MATLAB 实现[J]. 科技

信息,2008(7): 21-23.

作者简介:

张志福(1977),男,江苏新浦人,工程师,从事电力调度管理工作;

苏宜强(1985),男,江苏赣榆人,工程师,从事电力市场和需求侧管理研究工作;

曹海猛(1977),男,江苏盐城人,工程师,从事电力调度工作。

The Research on Model and Algorithm of Load Optimization

ZHANG Zhi-fu, SU Yi-qiang, CAO Hai-meng

(Lianyungang Power Supply Company, Lianyungang 222004, China)

Abstract: The enterprise can avoid peak electricity and save electricity costs through optimizing load operation mode with tou price. Important factors that affect optimal load running in production process are introduced. The load optimization model based on tou price is built. Heuristic method for solving is proposed in this paper. The example shows that load optimal operation model and its algorithm based on tou price are realistic and have the practicality.

Key words: demand side management; load optimal operation; tou price