

文章编号:1671-6833(2017)06-0045-05

计及线路损耗的峰谷分时电价优化模型

赵国生, 詹天乐, 李 博

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 针对现有的峰谷分时电价优化模型建立过程中没有考虑线路损耗的问题, 基于线路损耗和负荷波动之间的关系, 利用电量电价弹性矩阵, 以峰谷差和线路损耗的最小化为目标函数建立峰谷分时电价优化模型, 并通过理想点法将其转化为单目标模型后求解. 仿真证明, 计及线路损耗的峰谷分时电价优化模型很好地实现了削峰填谷、减少线路损耗的目的.

关键词: 峰谷分时电价; 线路损耗; 用户电量电价弹性矩阵; 多目标优化模型; 理想点法

中图分类号: TM73 **文献标志码:** A doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2016.06.022

0 引言

20世纪80年代以来, 峰谷分时电价在我国逐步开始实行. 作为电力需求侧管理^[1]的所有经济手段实施范围最广的一种, 关于其制定策略的研究一直是电力需求侧管理研究的热点. 目前国内关于峰谷分时电价制定策略的研究多数集中在通过用户对电价的需求响应矩阵或电价反应曲线, 从减少电网负荷波动、提高电力系统经济效益的角度出发, 建立优化模型方面. 文献[2]基于用户对电价的响应矩阵, 以峰谷差最小为目标函数建立峰谷分时电价优化模型并利用遗传算法进行求解; 文献[3]分析了用户用电响应特点, 基于多智能体技术建立峰谷分时电价模型; 文献[4]基于用户电价反应曲线, 以减少电网峰负荷和峰谷差为目标函数建立峰谷分时电价优化模型并进行模糊求解; 文献[5]从供电公司的利益出发, 以供电公司收益最大化为目标函数建立峰谷分时电价模型. 目前我国全社会用电量已超过5万亿千瓦时, 据统计有超过6%^[6]的电能损耗在输电线路, 因此减少线路损耗对电网有重要的经济意义, 但是以上文献在建立峰谷分时电价优化模型的过程中均未考虑线路损耗的影响.

文献[7]分析了负荷曲线和线路损耗的关系, 通过仿真说明了峰谷分时电价的实施能有效地减少线路损耗, 但是并没有给出峰谷分时电价

优化模型建立的方法. 笔者在此基础上以更简洁的方式证明了线路损耗和线路负荷曲线的关系, 从减少线路损耗的角度出发, 建立峰谷分时电价优化模型, 具有一定的实际意义.

1 用户电量电价弹性矩阵

用户对电力需求的价格弹性指的是由于电价的变动, 用户的用电量相应变化的程度. 峰谷分时电价将一天分成峰、平、谷三个时段, 不同时段用电价格不同. 用户会将电价较高时段的负荷转移到其他时段, 因此用户在某个时段的用电量不仅与本时段的电价有关, 还会受到其他时段电价的影响. 为表示用户各时段用电量与各时段电价之间的关系, 一般利用用户电量电价弹性矩阵.

电量电价弹性矩阵由自弹性系数和交叉弹性系数组成, 分别表示本时段电价和其他时段电价对该时段负荷的影响, 于是各个时段负荷和电价之间的关系可以用下式表示:

$$\begin{bmatrix} \frac{Q'_1 - Q_1}{Q_1} \\ \frac{Q'_2 - Q_2}{Q_2} \\ \frac{Q'_3 - Q_3}{Q_3} \end{bmatrix} = \mathbf{E} \begin{bmatrix} \frac{p_1 - p_0}{p_0} \\ \frac{p_2 - p_0}{p_0} \\ \frac{p_3 - p_0}{p_0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{p_1 - p_0}{p_0} \\ \frac{p_2 - p_0}{p_0} \\ \frac{p_3 - p_0}{p_0} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: \mathbf{E} 为电量电价弹性矩阵; e_{ii} 、 e_{ij} 分别表示自

收稿日期: 2016-06-30; 修订日期: 2016-09-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51307152)

作者简介: 赵国生(1965—), 男, 河南南阳人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事电能质量方面的研究, E-mail: zgs410

@zzu.edu.cn.

弹性系数和交叉弹性系数; p_0 为实行峰谷电价前的统一电价; p_1 、 p_2 、 p_3 分别表示实行峰谷分时电价后峰、平、谷时段的电价; $Q_1(\theta'_i)$ 、 $Q_2(\theta'_i)$ 、 $Q_3(\theta'_i)$ 分别表示实行峰谷分时电价前(后)处于实施峰谷电价后对应峰平谷时段的总负荷;于是实行峰谷分时电价后峰平谷时段的总负荷为

$$Q'_i = Q_i \left(1 + \sum_{j=1}^3 e_{ij} \frac{p_j - p_0}{p_0} \right), i = 1, 2, 3. \quad (2)$$

按日负荷曲线取24个时刻的负荷考虑,设 T_1 表示峰时段, T_2 表示平时段, T_3 表示谷时段,执行峰谷分时电价后在峰、平、谷时段内时刻 t 负荷为

$$q'_i = q_i \left(1 + \sum_{j=1}^3 e_{ij} \frac{p_j - p_0}{p_0} \right), i = 1, 2, 3; t \in T_i, \quad (3)$$

式中: q_i 表示峰谷分时电价执行前时刻 t 的负荷大小; q'_i 表示峰谷分时电价执行后时刻 t 的负荷, $t \in T_i$; $i = 1, 2, 3$.

2 线路负荷波动对线路损耗的影响

电力系统中输电线路损耗包括可变损耗和不变损耗.根据输电线路等值模型可知,其中不变损耗与线路负荷没有关系,而输电线路中电能损耗主要为可变损耗 $\psi(t)$.

$$\psi(t) = \int_0^T 3I^2(t)R \times 10^{-3} dt = \int_0^T \left(\frac{p(t)}{u \cos \theta} \right)^2 R \times 10^{-3} dt, \quad (4)$$

式中: $I(t)$ 表示输电线路相电流; T 表示用户负荷的运行周期(日、月、季、年等); U 表示用户负荷节点的线电压,kV; $\cos \theta$ 表示用户负荷的功率因数; $p(t)$ 表示用户负荷的有功功率,kW; R 表示输电线路等效电阻, Ω .

正常运行情况下,系统各节点电压基本保持不变.为了研究的方便,可以假设系统各节点电压为常数,同时认为峰谷分时电价只改变用户用电负荷时间上的分配,不改变负荷的种类和性质,即可以假设负荷的功率因数也是一定的.由于实施峰谷分时电价以后,用户总负荷一般变化很小,本文证明在总负荷一定的情况下,负荷波动越小线路损耗越小,负荷为恒定值时线路损耗最小.设 $\int_0^T p(t) dt = P$,于是下式成立:

$$T \int_0^T p^2(t) dt - P^2 = T \int_0^T \left(p(t) - \frac{P}{T} \right)^2 dt. \quad (5)$$

根据概率论可知,对于连续型随机变量 x ,若其概率密度函数为 $f(x)$, $y = y(x)$ 为 x 的函数,则 y 的方差 σ^2 反应其在期望 $E(y(x))$ 附近波动的

程度,也即曲线波动的程度:

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (y(x) - E(y(x)))^2 f(x) dx. \quad (6)$$

若将时间 t 看成连续型随机变量,则其概率密度函数在一个周期 T 内为 $1/T$.负荷 $p(t)$ 为 t 的函数,根据上式有 $p(t)$ 的方差 σ^2 为

$$\sigma^2 = \frac{1}{T} \int_0^T \left(p(t) - \frac{\int_0^T p(t) dt}{T} \right)^2 dt. \quad (7)$$

当负荷为恒定值 P/T 时,线路损耗为

$$\psi_0(t) = \int_0^T \left(\frac{p(t)}{u \cos \theta} \right)^2 R \times 10^{-3} dt = \frac{R \times 10^{-3}}{(u \cos \theta)^2} \int_0^T \left(\frac{P}{T} \right)^2 dt. \quad (8)$$

对于一般的负荷曲线,线路损耗为

$$\psi(t) = \int_0^T \left(\frac{p(t)}{u \cos \theta} \right)^2 R \times 10^{-3} dt = \frac{R \times 10^{-3}}{(u \cos \theta)^2} \int_0^T (p(t))^2 dt. \quad (9)$$

于是当且仅当 $p(t)$ 为恒定值 P/T 时,二者比值为

$$\frac{\psi(t)}{\psi_0(t)} = \frac{T \int_0^T p^2(t) dt}{P^2} = 1 + \frac{T^2}{P^2} \sigma^2 \geq 1. \quad (10)$$

由此可见,在用户总负荷一定的情况下,当负荷为恒定值时线路损耗最小.负荷波动越小, σ^2 就越小,线路损耗就越小.

假设 $p_0(t)$ 、 $p_1(t)$ 分别是实施峰谷分时电价前和实施后相同运行周期 T 内对应的线路负荷曲线.峰谷分时电价能够削峰填谷,减少线路负荷波动,因此能够减少线路损耗.为了更好地衡量峰谷分时电价减少线路损耗的效果,定义线路损耗比 ω 为峰谷分时电价实施后和实施前线路损耗比:

$$\omega = \frac{\psi_1(t)}{\psi_0(t)} = \frac{\int_0^T p_1^2(t) dt}{\int_0^T p_0^2(t) dt}. \quad (11)$$

如果以负荷曲线上一天24个时刻的负荷来代表线路负荷,将上式分子和分母积分离散化表示后, ω 的表达式为

$$\omega = \frac{\sum_{t=1}^{24} p_1^2(t)}{\sum_{t=1}^{24} p_0^2(t)}. \quad (12)$$

3 峰谷分时电价优化模型及其求解

3.1 优化模型目标函数

实行峰谷分时电价的主要追求目标是为了削峰填谷减少少负荷波动,同时应该考虑提高电网

经济效益,减少线路上电能损耗.笔者以一天24个时刻的负荷代表负荷曲线,则目标函数可以如下表示为.

(1) 用户负荷峰谷差 ν 最小:

$$\min \nu = \min(\max_{t \in T_i}(q'_t) - \min_{t \in T_j}(q'_t)); i, j \in 1, 2, 3. \quad (13)$$

(2) 线路损耗比最小:

$$\min \omega = \min \sum_{i=1}^3 \sum_{t \in T_i} (q'_t)^2 / \sum_{t=1}^{24} (q_t)^2. \quad (14)$$

3.2 优化模型约束条件

(1) 用户利益约束. 峰谷分时电价实行以后,为了得到用户的支持,用户需要在经济上得到实惠,因此用户平均电价应该减少:

$$p'_0 = \frac{p_1 Q'_1 + p_2 Q'_2 + p_3 Q'_3}{Q'_1 + Q'_2 + Q'_3} < p_0, \quad (15)$$

式中, p'_0 代表实施峰谷电价以后用户平均电价.

(2) 供电公司利益约束. 作为峰谷分时电价的实施方,供电公司实行峰谷分时电价后的利润也要得到保证. 实施峰谷分时电价以后,节省了投资,减少了供电公司运行成本,因此供电公司的总售电收入可以略有减少:

$$\begin{cases} P_0 = (p_0 - p_m)(Q_1 + Q_2 + Q_3); \\ P'_0 = p_1 Q'_1 + p_2 Q'_2 + p_3 Q'_3 - p_m(Q'_1 + Q'_2 + Q'_3); \\ (1 - M)P_0 \leq P'_0, \end{cases} \quad (16)$$

式中, P_0 和 P'_0 分别代表实施峰谷分时电价前、后供电公司一天的收入; p_m 表示当地平均上网电价; M 表示供电公司售电收入允许减少的最大比例.

(3) 用户总负荷约束. 实行峰谷分时电价以后,为了用户自身生产和生活的需要,用户的总负荷应保持基本不变,则

$$1 - \delta \leq \frac{Q'_1 + Q'_2 + Q'_3}{Q_1 + Q_2 + Q_3} \leq 1 + \delta, \quad (17)$$

式中, δ 表示实施峰谷分时电价以后允许用户总负荷变动的最大比例.

(4) 峰平谷电价约束. 峰平谷电价太接近起不到削峰填谷的效果,反之则会严重影响用户的生活和生产习惯,同时也会损害供电公司的利益,不利于峰谷分时电价的实施. 根据目前各省执行峰谷分时电价的实际情况设定以下约束:

$$\begin{cases} 1.4 \leq p_1/p_0 \leq 1.8; \\ 0.9 \leq p_2/p_0 \leq 1.1; \\ 0.5 \leq p_3/p_0 \leq 0.7. \end{cases} \quad (18)$$

于是,优化模型便可由式(13)、(14)表示的目标函数和式(15)~(18)表示的目标函数构成.

3.3 优化模型求解

峰谷分时电价优化模型是个非线性的多目标优化模型,一般没有绝对最优解,通常的做法是将其转化为单目标问题后求解. 在多目标优化模型的常见解法中,考虑到理想点法^[8]几何意义明显,并且能够避免取权重的主观性,笔者将其作为本文模型的解法. 理想点法比较经典的做法是将目标函数组成目标点,各个目标函数看成目标点的一个坐标,然后分别求出单个目标的最优值组成最优点,最后利用目标点和最优点之间的欧式距离的大小来衡量解的最优化程度.

具体求解过程如下:单个目标的最优值可以利用 matlab 中的 fmincon 函数解决. 首先分别求出单个目标的最大值和最小值 ν_{\max} 、 ν_{\min} 、 ω_{\max} 、 ω_{\min} ,由于两个目标函数数值差别较大,先对它们做归一化处理:

$$\bar{\nu} = \frac{\nu - \nu_{\min}}{\nu_{\max} - \nu_{\min}}. \quad (19)$$

$$\bar{\omega} = \frac{\omega - \omega_{\min}}{\omega_{\max} - \omega_{\min}}. \quad (20)$$

于是 $\bar{\nu}$ 、 $\bar{\omega}$ 均属于 $[0, 1]$. $\bar{\nu}$ 、 $\bar{\omega}$ 能反映目标函数的最优化程度,越接近 0 代表最优化程度越高,因此目标点可以取 $(\bar{\nu}, \bar{\omega})$. $\bar{\nu}$ 、 $\bar{\omega}$ 最理想值为 0,因此最优点取 $(0, 0)$. 根据理想点法,最终的目标函数 f 可以取目标点和最优点的欧氏距离,如下式所示:

$$\min f = \min \sqrt{\bar{\nu}^2 + \bar{\omega}^2}. \quad (21)$$

于是,最终的单目标优化模型可以由式(21)表示的目标函数和式(15)~(18)表示的约束条件构成.

4 算例分析

以文献[9]中安徽 10 kV 大工业的负荷数据为例,如表 1 所示.

表 1 典型日负荷数据

Tab. 1 typical daily load data

时刻	负荷/ MW	时刻	负荷/ MW	时刻	负荷/ MW
1:00	261	9:00	386	17:00	338
2:00	243	10:00	402	18:00	356
3:00	224	11:00	337	19:00	393
4:00	202	12:00	358	20:00	409
5:00	229	13:00	340	21:00	447
6:00	247	14:00	332	22:00	371
7:00	273	15:00	357	23:00	330
8:00	315	16:00	379	24:00	304

实行峰谷分时电价前的安徽 10 kV 大工业统一电价 p_0 为 0.602 0 元/(kW·h), 平均上网电价 p_m 为 0.4 元/(kW·h). 实行峰谷分时电价后, 根据该大工业负荷的特点将峰、平、谷时段划分: 高峰时段为 9:00 ~ 11:00、16:00 ~ 17:00、18:00 ~ 23:00; 低谷时段为 24:00 ~ 9:00; 其余时段为平时段. 根据文献[10]设供电公司收入减少最大允许值 $M=2\%$. 为了保证峰谷分时电价实施以后用户总负荷保持基本不变, 设用户总负荷允许最大变动 $\delta=2\%$. 电量电价弹性矩阵与用户类型、当地经济情况等因素都有关系. 笔者由于数据不足无法得到当地准确的电量电价弹性矩阵, 文献[11]比较科学地分析了用户电量电价弹性矩阵计算的方法, 并通过 IEEE-RTS79 测试系统求得其值, 具有一定的代表性, 因此采用其结果:

$$E = \begin{bmatrix} -0.1732 & 0.1333 & 0.1066 \\ 0.1495 & -0.1150 & 0.0923 \\ 0.2045 & 0.1650 & -0.1320 \end{bmatrix}$$

实行峰谷分时电价以后, 用户根据不同时段电价的差异自动调整自己的生产方式, 从而减少了峰谷差和负荷波动, 因此用户的峰谷差 ν 和线路损耗比 ω 的最大值均为实行峰谷分时电价之前的数值. 于是用户峰谷差 ν 的最大值为 $\nu_{\max}=245$ MW, 线路损耗比 ω 的最大值为 $\omega_{\max}=100\%$. 实行峰谷分时电价以后分别求出二者的最小值: 峰谷差 ν 的最小值 $\nu_{\min}=138.037$ MW, 线路损耗比 ω 的最小值为 $\omega_{\min}=97.16\%$. 于是通过求解以式(21)为目标函数, 式(15)~(18)为约束条件的单目标优化模型可以得到如下结果: 当峰电价为 0.934 3 元/(kW·h)、平电价为 0.543 5 元/(kW·h)、谷电价为 0.316 7 元/(kW·h)时, 综合目标函数 f 取得最小值 0.041 6, 此时峰谷差 ν 为 141.687 MW, 线路损耗比 ω 为 97.23%. 两个目标函数归一后的数值分别为 $\bar{\nu}=0.0341$ 、 $\bar{\omega}=0.0247$, 说明通过理想点法求解该优化模型能很好地兼顾到这两个目标. 峰谷分时电价实施前、后负荷对比如图 1 所示.

实行峰谷分时电价以后负荷的峰谷差减少 103.313 MW, 线路损耗减少了 2.77%. 因此, 既减少了线路负荷波动, 提高了电网的运行效率; 也减少了线路损耗, 提高了电网的经济效益. 实施峰谷分时电价后用户的平均用电价格为 0.598 3 元/(kW·h), 用户一天的总负荷为 7 818.8 MW, 和实施之前相比, 用户的平均用电价格略有下降, 用户的总负荷基本保持不变, 说明实施峰谷分时电

价后用户经济上得到了一定的实惠并且用电需求也没受到影响. 实施峰谷分时电价前、后供电公司一天的收入分别为 1 582 266 元、1 550 621 元, 供电公司的收入略有减少, 考虑到实施峰谷分时电价后提高了系统的负荷率, 节省了运行成本, 减少了线路的损耗, 因此供电公司收入的略微减少也是可以接受的.

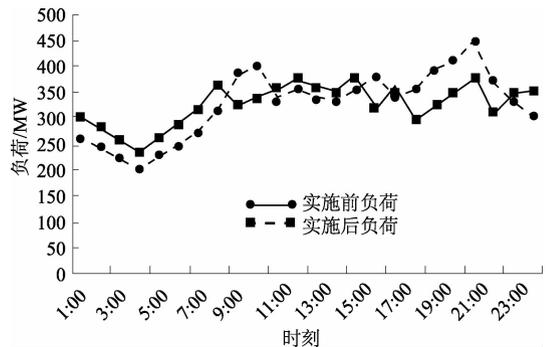


图 1 峰谷分时电价实施前后负荷曲线对比

Fig. 1 Comparison of load curves between before and after the implement of time-of-use price

5 结论

峰谷分时电价能否顺利实施的关键在于峰平谷时段电价是否合理. 笔者证明了用户总负荷保持一定的基础上, 负荷波动越小线路损耗越小, 然后基于用户电量电价弹性矩阵建立计及线路损耗的峰谷分时电价优化模型. 该优化模型是多目标优化问题, 一般没有绝对最优解, 采用理想点法将其转为单目标模型后求解. 通过实例仿真证明, 计及线路损耗的峰谷分时电价模型能很好地实现削峰填谷、减少线路损耗的目的, 提高了电网运行的效率和经济性; 同时, 由于用户和供电公司的利益均得到了保证, 用户的用电需求也没受到影响, 因此, 优化模型得到的峰平谷分时电价具有一定的合理性, 能够得到顺利的实施.

参考文献:

- [1] ALBADI M H, EI-SAADANY E F. A summary of demand response in electricity markets[J]. Electric power systems research, 2008, 78(11): 1989 - 1996.
- [2] 李春燕, 许中, 马智远. 计及用户需求响应的分时电价优化模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(3): 11 - 16.
- [3] 谈金晶, 王蓓蓓, 李扬. 基于多智能体的用户分时电价响应模型[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 257 - 263.
- [4] 谭忠富, 王绵斌, 乞建勋, 等. 峰谷分时电价优化模型及其模糊求解方法[J]. 系统工程理论与实践, 2008, 9(9): 145 - 151.

- [5] 郭联哲,谭忠富,李晓军. 基于用户响应下的分时电价优化设计模型与方法[J]. 电网技术, 2006, 30(5): 25-28.
- [6] 路郑. 国网大刀阔斧节能减排[N/OL]. 中国能源报, 2015-06-22(18).
- [7] 胡福年,汤玉东,邹云. 需求侧实行峰谷分时电价策略的影响分析[J]. 电工技术学报, 2007, 22(4): 168-174.
- [8] 杨桂元,郑亚豪. 多目标决策问题及其求解方法研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(2): 108-115.
- [9] 邵璘,周国祥,石雷. 峰谷分时电价决策的优化模型[J]. 统计与决策, 2010(3): 51-53.
- [10] 陈继,殷善锋. 基于用户需求弹性的峰谷分时电价决策模型[J]. 特区经济, 2013(10): 188-191.
- [11] 陈沧杨,胡博,谢开贵,等. 计入电力系统可靠性与购电风险的峰谷分时电价模型[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2141-2148.

Time-of-use Price Optimization Model Considering Line Loss

ZHAO Guosheng, ZHAN Tianle, LI Bo

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The current TOU price optimization models failed to consider the significance of reducing line loss. Through the relationship between line loss and load fluctuation, the targets of the proposed new TOU price optimization model, which was based on price elasticity matrix of demand, were to minimize peak-valley difference and line loss. The optimization model, which was a non-linear multiple objects optimal model, was solved by ideal point method. It was proved by example that the new TOU price optimization model could avoid the peak load and reduce the line loss.

Key words: time-of-use price; line loss; price elasticity matrix of demand; multi-objective optimization model; ideal point method

(上接第 32 页)

Network Intrusion Detection Algorithm Based on Hybrid Differential Evolution Algorithm

WANG Yaoguang¹, Chen Weiquan¹, WU Zhenbang¹, QIN yong², HUANG Han³

(1. Guangdong Dongguan Quality Supervision Testing Center, Dongguan 523000, China; 2. School of Computer Science and Network Security, Dongguan University of Technology, Dongguan 523000, China; 3. School of Software Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Intrusion detection algorithm based on machine learning method is one of research hotspot in the field of network equipment testing. In the face of the real-world application requirement, machine learning methods should be further optimized to achieve accurate and stable detection effect. The study optimize steadily several key parameters of least squares support vector machine (SVM) by designing a hybrid differential evolution algorithm with disturbance vector and improved the intrusion detection accuracy and stability of least squares support vector machine (SVM) algorithm by means of adaptive parameter tuning. The experimental results in KDD Cup 09 test set showed that, the proposed network intrusion detection algorithm based on hybrid differential evolution algorithm had better performance on average than many similar algorithm at present.

Key words: network intrusion detection; stability test; hybrid differential evolution; least squares support vector machine