

基于能效标尺竞争与 OaR 的工业负荷管理策略

张粒子, 杨 阳

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 现行负荷管理方案未考虑工业用户的能效情况、限电先后次序以及负荷反弹效应的影响, 且工业用户限电能力的随机性未予以分析。对此, 提出两阶段优化策略, 第一阶段以标尺竞争机制为基础构建模型, 优化限电次序, 优化系统整体能效, 并将 NSGA-II 与启发式算法结合, 对该模型进行求解; 第二阶段利用两状态马尔科夫过程对工业负荷随机特性进行分析, 提出目标风险值(OaR)决策模型, 对第一阶段限电指标进行随机优化, 消除负荷反弹效应, 提高模型的可操作性和实用性。通过某配网实例, 分别采用改进 NSGA-II 算法及黄金分割算法进行求解, 对限电次序及额度进行优化计算, 测算结果表明所提方法的可行性和有效性。

关键词: 负荷管理; 标尺竞争; 马尔科夫过程; 负荷反弹; 优化

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.03.002

0 引言

2011 年 1 月以来, 受缺煤、少气、枯水及机组非计划停运等因素影响, 有 13 个电网电力供需紧张, 最大电力缺口 18 790 MW^[1]。加之金融危机后, 中国经济进入新一轮加速发展时期, 尤其高耗能企业的无序发展, 进一步恶化用电紧张的局势, 而包括新能源在内的发电设施建设相对滞后, 负荷管理成为消除电力供应缺额、保障安全稳定运行的重要手段^[2]。

负荷管理措施中的负荷削减包括直接负荷控制^[3]和需求侧响应^[4], 前者通过电网的负荷控制系统实现, 后者由用户自行决策和控制。在可中断用户中, 大工业用户普遍安装了智能电表等负荷管理设备, 且大工业负荷占全社会用电负荷的 60% 以上, 对其进行限电的效果明显^[5]。

文献[6]中对用户直接进行负荷控制, 首先针对工业、商业及居民用户的不同用电特点, 考虑负荷反弹特性, 将控制对象进行分组, 以各用户的中断能力为约束条件, 构建以最小化负荷尖峰为目标的多时段控制模型, 并应用线性规划予以求解。文献[7]以错峰时间作为用户满意度的度量依据, 并结合配网的单步平移开关操作进行配网重构, 但每次操作后均进行遗传计算, 计算量过大。文献[8]则针对国外用户与供电公司签订的可中断协议, 以中断时间最小为目标, 应用模糊集理论量化用电满意度, 最后通过动态规划迭代方法求解。

中国现行负荷管理方案依据用户历史用电量比重制定, 工业用户的能效情况及限电先后次序的理论依据鲜有文献报道。对于限电额度的制定, 现行方案及各文献尚未考虑工业用户的限电能力及负荷的随机特性对控制效果的影响, 即在调度下达限电指

令后, 由于用户的随机生产特性, 存在不能完成限电指标的可能性, 负荷管理无序、低效, 社会影响严重。

针对以上问题, 本文提出两阶段优化策略, 第一阶段以标尺竞争机制为基础构建模型, 优化限电次序, 优化系统整体能效; 第二阶段, 利用两状态马尔科夫过程对工业负荷随机特性进行分析, 提出目标风险值(OaR)决策模型, 对第一阶段限电指标进行随机优化, 提高模型在实际操作中的可行性。

1 负荷管理优化策略

高耗能企业用电量占全社会总量的比重较大, 对其限电效果明显^[5], 且符合国家有序用电管理规定^[9]。因此, 本文的负荷管理对象限于工业负荷。

本文提出的两阶段优化策略流程如图 1 所示。

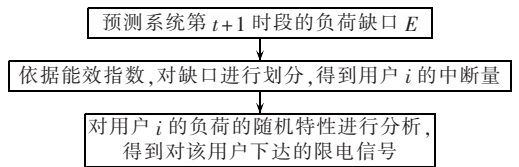


图 1 负荷管理优化策略流程图

Fig.1 Flowchart of load management optimization

2 数学模型

2.1 基于用电能效标尺竞争的缺口分配模型

标尺竞争机制基于绩效管制理论, 最初应用于垄断企业内部^[10]。其核心思想是, 政府将不同市场中同类企业的商品价格与本类企业的平均生产成本相挂钩, 故若某企业削减了成本, 使其低于该类企业平均成本, 则这个企业就会盈利, 反之, 则发生亏损。

本文将能效指数作为对高耗能企业限电的依据, 即如果某高耗能企业能效低于平均能效水平, 则根据限电的公平性原则, 该企业的限电额度将相应加大, 从而激励该企业提升能源使用效率, 以获得

正常生产所需的电能;而对高于平均能效水平的用户,则获得相对更多的电能,用于生产盈利。

能效标杆的确定如下:

$$g(x) = 0.35 \operatorname{arctanh}(x) + 1 \quad (1)$$

$$r_i = g\left(\frac{\theta_i - \bar{\theta}}{\theta_{\max} - \theta_{\min}}\right) \quad (2)$$

其中, θ_i 为能耗系数($\text{kW}\cdot\text{h}/\text{万元}$),用于描述单位利润下所消耗的能量; $\bar{\theta}$ 为用户能耗系数的平均值, $\theta_{\max}$ 与 $\theta_{\min}$ 分别为用户能耗系数的最大值与最小值; r_i 为归一化后的能耗系数。式(1)为辅助函数,式(2)将能效系数归一化处理^[11],从而使各企业能够在统一标尺下进行比较,并根据其大小对高耗能企业进行排序,从中确定标杆企业,即 r_i 等于或者接近 1 的企业。

为了量化能耗管制水平,以刺激企业降低成本、提高能效,能效指数 X_i 按下式计算^[11]:

$$X_i = X_{\min} + (1 - r_i) \frac{X_{\max} - X_{\min}}{r_{\max} - r_{\min}} \quad (3)$$

其中, $X_{\max}$ 、 $X_{\min}$ 为管制机构针对不同行业而设定的管制水平, $r_{\max}$ 、 $r_{\min}$ 为计算得出的归一化后的能耗系数。如式(1)—(3)所示,用户假若希望减少停电量,就需缩减成本以降低能耗指数 θ_i ,进而向高能效的标杆企业靠拢,提升能效指数 X_i ,达到引导高耗能用户高效用电的目的。

用户的能耗数据分析与统计超出了本文的研究范围,假定能耗数据已进行过准确分析,为给定数据。

在具体执行负荷管理操作时,制定以下原则:

a. 重点对高耗能、高排放用户进行限电^[9];

b. 在系统缺电情况下,根据现有负荷分类方法^[9],将限电负荷分为绝对不能停电的负荷、可部分中断的负荷和可全部中断的负荷。

根据以上原则,考虑在系统要求的限电时间 T_v 内的限电方案,构造考虑用电能效的目标函数:

$$F_1 = \min\left(\sum_{i=1}^n X_i P_i\right) \quad (4)$$

其中, P_i 为对高耗能用户 i 的限电负荷,单位为 MW ,为待优化变量; n 为在该时段下限电的高耗能户数; n_1 为限电时段数。需满足下列约束条件:

$$0 < P_i \sum_{v=1}^{n_1} T_v \leq \alpha_i E \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1 \quad (6)$$

其中, α_i 为高耗能用户 i 所等比例分得的负荷缺口百分比,即能效越高,分得的缺口值越小,反之亦然。

如果断电的线路上存在重要用户,则进入负荷转移模块,且根据高耗能用户所在支路的重要用户,进行限电次序优化,目标函数为:

$$F_2 = \min\left(\sum_{j=1}^{m_1} L_j M_j\right) \quad (7)$$

其中, L_j 为 T_v 时段内,中断第 j 个重要用户对对应负荷,单位为 MW ; M_j 为相应的权重系数,无量纲,根据原则 b 进行设定; m_1 为重要用户的停电户数。

$$F_3 = \min\left(\sum_{k=1}^l L_{lk}\right) \quad (8)$$

其中, L_{lk} 为 T_v 时段内第 k 个可中断负荷的中断容量,单位为 MW ; l 为可中断负荷的停电户数。

约束条件如下。

a. 功率约束。

$$\sum_{i=1}^n P_i + \sum_{j=1}^{m_1} L_j + \sum_{k=1}^l L_{lk} \geq D_{T_v} - D' \quad (9)$$

其中, D_{T_v} 为 T_v 时段预测的系统负荷, D' 为调度规定的系统限额。

b. 可中断负荷限电能力约束。

$$L_{lk} \leq L_{lk, \max} \quad (10)$$

其中, $L_{lk, \max}$ 为第 k 个可中断用户规定的最大限电能力。

c. 负荷管理时间约束。

$$t_w \leq t_{re, w} \quad (11)$$

其中, w 为受时间约束限制的用户编号, t_w 为该用户预计中断时间, $t_{re, w}$ 为中断该用户前剩余的允许中断时间。

d. 网络拓扑约束。

开关操作完成后,配网应保持辐射状网络结构,有:

$$g_k \in G_R \quad (12)$$

即网络拓扑结构 g_k 属于辐射状网络拓扑集 G_R 。

e. 潮流越限约束。

$$|S_l| \leq S_l^{\max} \quad (13)$$

其中, S_l 为线路 l 的潮流; $S_l^{\max}$ 为线路 l 允许通过的潮流限值。

2.2 工业用户负荷模型

将工厂 i 中的某台设备 j 的开关过程视为两状态马尔科夫过程,则根据马尔科夫随机过程理论^[12],求得其用电的期望值与方差分别为:

$$\mu_j(t) = VL\beta \quad (14)$$

$$\sigma_j^2(t) = V^2 L^2 \beta (1 - \beta) \quad (15)$$

其中, V 为设备的额定功率(kW); L 为设备的使用效率; β 为第 t 个时间段内,设备工作时间的百分比。

工厂中每个设备的负荷概率分布近似服从正态分布,根据中心极限定律^[13],当工厂中的设备数目 N 足够大时,工厂总负荷服从正态分布,其期望和方差分别为:

$$\mu_i(t) = NVL\beta \quad (16)$$

$$\sigma_i^2(t) = NV^2 L^2 \beta (1 - \beta) \quad (17)$$

由于工厂中生产工艺等约束,某些设备之间可能存在耦合,可将存在联系的设备进行分类,视为一个整体,并用上述模型进行建模。

进一步分析,可将工厂中的负荷分为可中断负荷 $L_i(t)$ 与不可中断负荷 $L_U(t)$ 两部分:

$$L(t) = L_i(t) + L_U(t) = \sum_{j=1}^N R_{I,j}(t) + \sum_{j=1}^N R_{U,j}(t) = \sum_{j=1}^N L_j(t) \quad (18)$$

其中, $R_{I,j}(t)$ 与 $R_{U,j}(t)$ 分别为工厂 i 中,第 j 台设备的可中断负荷部分与不可中断负荷部分。

$$L(t) \sim N(N\mu_i(t), N\sigma_i^2(t)) \quad (19)$$

根据工厂 i 的生产需要,其中只有 m_2 台设备可中断负荷 ($m_2 \leq N$),则该工厂中所有可中断负荷为:

$$L_{I,m_2}(t) = \sum_{j=1}^{m_2} R_{I,j}(t) \quad (20)$$

设工厂第 t 时段能根据历史数据及工厂的生产计划,预测出下一个时段 $t+\Delta t$ 的负荷值为 $l(t+\Delta t)$,则根据条件概率的计算方法^[14],可以得出下一个时段,关于可中断负荷的条件概率分布,其期望和方差可表示为:

$$m_2 \left\{ \mu_i(t+\Delta t) + \frac{1}{N} \frac{\sigma_i^2(t+\Delta t)}{\sigma_i^2(t+\Delta t)} [l(t+\Delta t) - N\mu_i(t+\Delta t)] \right\} = \mu \quad (21)$$

$$m_2 \left\{ \sigma_i^2(t+\Delta t) \left[1 - \frac{n}{N} \frac{\sigma_i^2(t+\Delta t)}{\sigma_i^2(t+\Delta t)} \right] \right\} = \sigma \quad (22)$$

2.3 随机优化决策模型

大用户因生产计划等需要,其负荷的中断能力具有随机性,不一定会完全按照调度发出的信号去中断相应额度的负荷量值,因此,为了实现对于用户 i 的中断目标 ($\alpha_i E$),应对调度发出的中断信号 S_i 进行修正,以达到期望的限电效果。对于工厂 i 而言,调度对其下达中断信号指令 S_i ,保证目标限电量 ($\alpha_i E$) 在一定置信区间内得以完成。

当调度向工厂 i 发送中断信号 S_i 后,理论上,工厂应该中断的负荷为:

$$S_i \sum_{j=1}^{m_2} R_{I,j} = S_i L_{I,m_2} \quad (23)$$

其中, S_i 为调度对工业用户下达的限电百分比。

本文根据金融风险分析中的 VaR 理论^[15],提出 OaR 的概念,即工业用户不能完成调度下达的限电指标的概率情况,可用置信度概率模型予以计算。

基于上述分析,调度下达中断信号 S_i 后,在一定的置信概率 ($1-\xi_i$) 下,保证能够满足期望的中断量 ($\alpha_i E$)。

$$P(S_i L_{I,m_2} < \alpha_i E) \leq \xi_i \quad (24)$$

记 F 为用户 i 的可中断负荷部分的概率分布,则优化决策模型为:

$$F\left(\frac{\alpha_i E}{S_i}\right) \leq \xi_i \quad (25)$$

根据概率分布函数表,得到:

$$\frac{\alpha_i E}{S_i} = F^{-1}(\xi_i) = \omega_i \quad (26)$$

进而得到:

$$S_i = \frac{\alpha_i E}{\omega_i} \quad (27)$$

根据中心极限定律, F 服从正态分布,有:

$$F\left(\frac{\alpha_i E}{S_i}\right) = \Phi\left(\frac{\frac{\alpha_i E}{S_i} - \mu}{\sqrt{m_2} \sigma}\right) \quad (28)$$

其中, Φ 为标准正态分布的概率密度函数。

$$S_i = \frac{\alpha_i E}{\mu + Z_{\xi_i} \sqrt{m_2} \sigma} \quad (29)$$

其中, Z_{ξ_i} 为置信水平 ξ_i 下,标准正态分布的概率值。 ξ_i 可在区间 $[0, B_{\max}/B_{i0}]$ 内取值, B_{i0} 为用户 i 的中断量未达到调度规定值时所造成的损失, $B_{\max}$ 为最大可接受损失,分别与用户在电网中的位置以及系统运行情况有关,由调度进行更新。

2.4 停电损失分析

在定义 OaR 后,可根据分布函数,建立停电损失函数,以刻画当限电量超过或者低于调度规定值时的经济损失。

$$c(S_i) = c_1 S_i L_{I,m_2} I(S_i L_{I,m_2} > \alpha_i E) + c_2 S_i L_{I,m_2} I(S_i L_{I,m_2} < \alpha_i E) \quad (30)$$

其中, $I(\cdot)$ 是 0-1 函数,当括号中的条件满足时,该函数值为 1,反之则为 0。等号右侧两项分别表示超出调度所需限电额度时电网公司的售电损失、未达到所需限电额度而出现系统故障时的成本。目标函数是最小化成本的期望值,即:

$$c(S_i) \equiv c_1 S_i \int_{\frac{\alpha_i E}{S_i}}^{+\infty} L'_{I,m_2} f(L'_{I,m_2}) dL'_{I,m_2} + c_2 S_i F\left(\frac{\alpha_i E}{S_i}\right) \quad (31)$$

进一步,根据截断高斯理论^[13],得到:

$$c(S_i) \approx c_1 p \left[m_2 u \left[1 - \Phi\left(\frac{\frac{\alpha_i E}{S_i} - m_2 u}{\sqrt{m_2} \sigma}\right) \right] + \sqrt{m_2} \sigma \varphi\left(\frac{\frac{\alpha_i E}{S_i} - m_2 u}{\sqrt{m_2} \sigma}\right) \right] + c_2 s \Phi\left(\frac{\frac{\alpha_i E}{S_i} - m_2 u}{\sqrt{m_2} \sigma}\right) \quad (32)$$

该公式实质是贝叶斯期望损失最小化问题^[13]。

本文着重分析对于第一阶段得出的限电额度的随机优化,公式中停电损失的精确量化方法需要进行用户调研及系统运行情况分析,不在本文研究范围内,具体分析时予以假定。

3 算法分析

本文提出两阶段优化决策模型:对于第一阶段,由于涉及目标众多,将启发式算法与改进的非支配排序遗传算法 (NSGA-II) 结合,得出 Pareto 最优解集;对于第二阶段,采用黄金分割法进行求解^[15]。以下对第一阶段主要部分予以说明。

3.1 数据初始化

输入待中断的节点初始数据,包括高耗能企业节点编号、各时段的中断容量、可中断负荷节点编号及容量、中断时间及各高耗能企业能耗系数。

3.2 种群初始化

本文对高耗能用户节点编号采用十进制编码,染色体上的相应基因分别对应用户编号;对联络开关和可中断用户采用二进制编码,1 表示开关闭合和可中断负荷未中断,0 表示开关开断和可中断负荷中断。待中断的无重复的随机排列生成的染色体种群作为初始种群,对于联络开关基因位置 0,可中断负荷对应基因位置 1。编码格式如图 2 所示。

$$[X_1 X_2 \cdots X_{N_1} | Y_1 Y_2 \cdots Y_{N_2} | Z_1 Z_2 \cdots Z_{N_3}]$$

用户编号

联络开关

可中断

状态

负荷状态

图 2 编码格式示意图

Fig.2 Sketch map of code patterns

3.3 基因校正环节

本文首先对高耗能用户所在节点向下进行搜索,判断是否存在重要用户,如果需要进行负荷转移,则将重要负荷所在联络开关状态置为 1,并转入负荷转移程序模块;如果无需转移负荷,则相应联络开关基因位状态置 0。

3.4 负荷转移模块

为了减轻计算量,并凸显可中断负荷在保障重要负荷供电的作用,本文假设可中断负荷存在于重要负荷失电后所在区域,且只通过与通电区域相连的联络开关进行转移。其原理如图 3 所示。

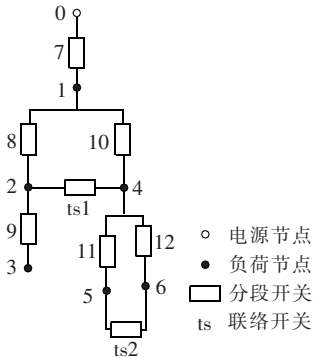


图 3 负荷转移示意图

Fig.3 Sketch map of load transfer

分段开关 12 断开,负荷点 6 失电。负荷点 6 中连接有可中断负荷和重要负荷,且该总负荷超过了 ts2 的最大容许转移负荷,则为了减少负荷点 6 中的重要负荷失电,中断负荷点 6 中的部分可中断负荷,优先保证重要负荷的供电。

3.5 Pareto 最优解集

当迭代次数达到规定数值后,如果解集中解的个数大于 1 个,则首先根据染色体的联络开关状态对应基因位的状态,判断是否存在重要负荷的转移,即相应基因位如果为 0,则所求解集即为最终最优解集;如果为 1,则根据 F_2 、 F_3 的重要等级排序,在所求解集中,形成依次使各自目标函数值最小的解集,作为最优解集。

3.6 其他操作^[6]

- a. 交叉、变异操作:均匀交叉和均匀变异策略。
- b. 终止条件:满足最大迭代次数要求。

最后进行潮流计算^[15],并判断该优化方案是否满足潮流越限约束。

4 算例分析

算例系统根据文献[16]给出的 33 节点、12.66 kV 的 5 网孔系统进行修改;系统总有功负荷为 5.87 MW,该时段有功负荷缺口为 0.63 MW。接线图见图 4。

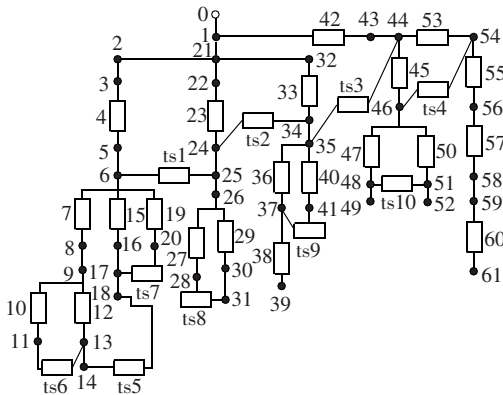


图 4 配网结构示意图

Fig.4 Sketch map of distribution network

4.1 限电方案比较

负荷等级信息如表 1 所示。可中断负荷节点最大限电能力为该节点总用电的 80%。种群规模均为 20,交叉率为 0.5,变异率为 0.01,最大迭代次数为 500。

负荷管理限电方案比较如表 2 所示。按照中国现行的负荷管理方法,即根据负荷的历史用电量进行限电,操作时涉及线路上重要用户,如节点 14、17 等;而根据本文限电方案则优先对不包含重要用户的线路进行限电,并且对包含重要用户的线路,如用户 14、17、18、20,通过控制可中断负荷 13、16、24,保证了重要用户的供电。

表 1 负荷等级信息

Tab.1 Information of load priority

负荷分类	负荷编号
重要用户节点	1,2,3,5,6,14,17,18,20,21,22,25,26,32,37,44
高耗能用户节点	8,9,11,16,28,31,39,46,48,49,51,52,61
终端可控可中断用户节点	13,16,24,30,34,35,41,43,54,56,58,59

表 2 负荷管理限电方案比较

Tab.2 Comparison of load management between load control schemes

负荷管理策略	限电方案
初始策略	8,9,11,13,14,16,17,18,20,28,30,31,39
优化策略	39,46,48,49,51,52,61,11,16,30,34,35,41

优化策略实施前后系统负荷曲线变化如图 5、6 所示。

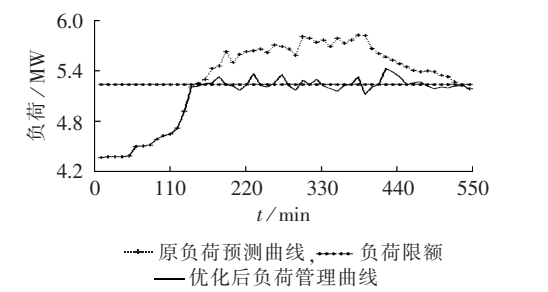


图 5 优化前负荷管理效果图
Fig.5 Result of load management before optimization

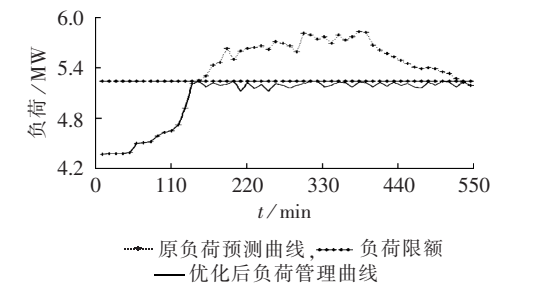


图 6 优化后负荷管理效果图
Fig.6 Result of load management after optimization

图 5 是按照现行的分轮限电所出现的结果,本文假设分轮限电时间段长度为 30 min。之所以出现波动性,是因为上一轮限电的负荷恢复供电时,由于用户生产计划的变动、储能设备的启停等原因而产生反弹,其相应中断能力有所波动。而现行方法未予以考虑,调度仍按照原负荷预测结果进行限电,导致出现越过安全限额的小尖峰;在本轮次的剩余时间,调度根据尖峰额度加大限电量,而上一轮次的负荷反弹效应结束,导致出现小低谷。反弹后的负荷超过了系统容许的最大限额,威胁系统安全;而使用本文方法,能够明显消除反弹负荷,并留有一定裕度,满足系统安全稳定运行,如图 6 所示。

实施前后能效和可靠性比较如表 3 所示。其中,整体能效为通过计算各个用户的限电量的相反数,并与相应用户能效指数相乘,然后求和所得,即为优化后的目标函数 F_1 的取值的相反数。由表 3 可见,本文方法在满足负荷限额的基础上,用电整体能效比初始策略提升了 43.3%;同时,重要负荷失电量比初始策略降低了 55.7%,提升了系统可靠性。

表 3 节能效果和负荷损失比较		
Tab.3 Comparison of energy saving and load loss		
负荷管理策略	整体能效	重要负荷失电量/(MW·h)
初始策略	-1.19	0.95
优化策略	-0.83	0.42

4.2 限电损失分析

本文其中一个工业用户的生产线总共有 $N=80$ 台设备,可中断设备 $n=15$ 台,各设备间不存在生产上的关联关系,相互独立,设备生产用电情况相同。

17:00 与 22:00 负荷的均值与方差如表 4 所示。表中, $\sigma_T(t)$ 、 $\mu_T(t)$ 与 $\sigma_1(t)$ 、 $\mu_1(t)$ 分别代表总负荷与可中断负荷的方差与均值,采样时间分别为 17:00 与 22:00。

表 4 17:00 与 22:00 时负荷的均值与方差				
Tab.4 Expected load and standard deviation at 17:00 and 22:00				
采样时间	$\sigma_T(t)$	$\mu_T(t)$	$\sigma_1(t)$	$\mu_1(t)$
17:00	0.764	0.421	0.759	0.356
22:00	0.686	0.550	0.679	0.485

令 $c_1=c_2=1$,并假设需要中断电力 40 kW,则利用黄金分割算法^[15],得到停电损失与限电信号之间的关系如图 7 所示,图中的三角所指示的标度为第一阶段不考虑负荷随机特性时所得到的限电额度。

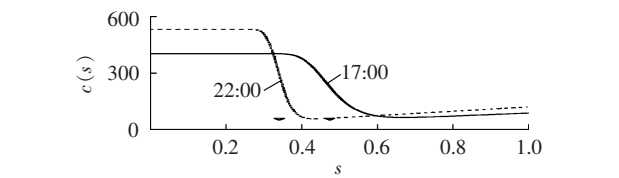


图 7 $n=15$ 时限电信号与停电损失关系图
Fig.7 Relationship between load shedding cost and change signal($n=15$)

n 取 50 和 100 时限电信号与停电损失关系图分别见图 8、9。可见,随着可中断设备数量的增多,曲线斜率将会逐渐加大。参加中断的负荷越多,调度下达的中断指令应越小,即参与限电的可中断用户越多,每个用户分摊的负荷缺口比例越小,从而调度对每个用户下达的中断负荷的百分比相应较小,即可满足系统的缺口。同时,当所有可中断设备均参加负荷管理时,第一阶段与第二阶段的限电优化额度相同,各台设备的限电百分比最小,停电总损失最小。

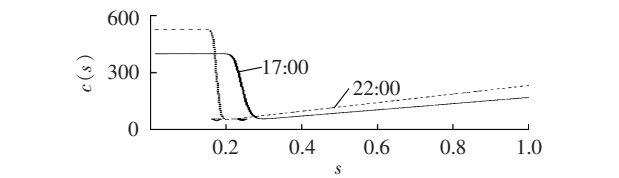


图 8 $n=50$ 时限电信号与停电损失关系图
Fig.8 Relationship between load shedding cost and change signal($n=50$)

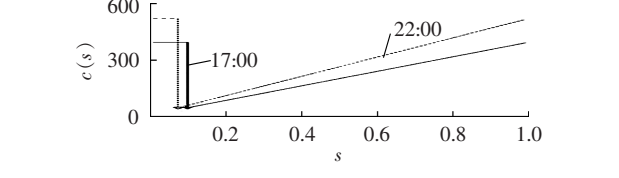


图 9 $n=100$ 时限电信号与停电损失关系图
Fig.9 Relationship between load shedding cost and change signal($n=100$)

5 结语

本文建立了两阶段负荷管理优化模型,在第一

阶段,在给定用户能耗系数的前提下,提出了以标尺竞争机制为基础的负荷限电次序与限电额度优化模型,一方面保证负荷管理的公平性,另一方面最大限度地提升整体用电能效,督促企业降低能耗;第二阶段,利用两状态马尔科夫过程分析工业负荷的随机特性,提出 OaR 决策模型,在给定置信度与停电损失的条件下,确定计及中断能力的随机优化限电额度。算例分析表明,对于较小的工厂,由于生产设备有限,可限负荷量较小,调度对其下达限电指标,较之第一阶段所计算的指标要大;反之,对于较大的工厂,参与中断的负荷较多,对其下达的调度信号更接近第一阶段的指标。如何精确量化、分析统计用户的停电损失、能耗系数,将是下一步的研究重点。

参考文献:

- [1] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告[M]. 北京: 中国市场出版社, 2011: 23-37.
- [2] CONCORDIA C, FINK L H, POULLIKAKAS G. Load shedding on an isolated system[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(3): 1467-1472.
- [3] ISAKSEN L, MA F, SIMONS N. Bibliography on load management [J]. IEEE Trans Power App Syst, 1981, 100(5): 2597-2601.
- [4] AALAMI H, YOUSEFI G R, MOGHADAM M P. Demand response model considering EDRP and TOU programs[C]//Transmission and Distribution Conference and Exposition. Tehran, Iran: [s.n.], 2008: 1-6.
- [5] SIOSHANSI R. Evaluating the impacts of real-time pricing on the cost and value of wind generation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2010, 25(2): 741-748.
- [6] KURUCZ C N, BRANDT D, SIM S. A linear programming model for reducing system peak through customer load control programs [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(4): 1817-1824.
- [7] 刘健, 王双虎, 明正峰. 需求侧负荷管理中最优错峰计划的生成 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 47-50.
- LIU Jian, WANG Shuanghu, MING Zhengfeng. Optimal peak load shifting plan for demand side management [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 47-50.
- [8] HUANG Kunyuan. Demand subscription services—an iterative dynamic programming for the substation suffering from capacity shortage[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2): 947-953.
- [9] 国家发改委. 国家发改委[2011]832号 关于印发《有序用电管理办法》的通知[S]. 北京: 国家发改委, 2011.
- [10] SHLEIFER A. A theory of yardstick competition [J]. Rand Journal of Economics, 1985, 16(3): 319-322.
- [11] 岳顺民, 余贻鑫. 配电市场价格监管方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(25): 13-18.
YUE Shunmin, YU Yixin. Price regulation of electricity distribution market [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(25): 13-18.
- [12] HSU H P. Theory and problems of probability, random variables, and random processes[M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1997: 57-88.
- [13] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005: 72-93.
- [14] KOTZ S, BALAKRISHNAN N, JOHNSON N L. Continuous multivariate distributions: models and applications[M]. New York, USA: Wiley, 2000: 101-120.
- [15] PRESS W H, TEUKOLSKY S A, VETTERLING W T, et al. Numerical recipes in C, the art of scientific computing[M]. 2nd ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1999: 93-107.
- [16] ARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.

作者简介:

张粒子(1963-), 女, 北京人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要从事电力系统分析和电力经济等领域的研究;

杨 阳(1987-), 男, 河北沧州人, 博士研究生, 主要从事电力市场、电力系统优化运行等方面的研究 (E-mail: youngalexandern@126.com)。

Industrial load management based on energy efficiency yardstick competition and OaR

ZHANG Lizi, YANG Yang

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Since the present load control does not consider the energy efficiency, load priority and stochastic capability of industrial loads, a two-stage load management scheme is proposed. At the first stage, a model based on yardstick competition is built to optimize the load control sequence and system energy efficiency, which is solved by the NSGA-II combined with heuristic algorithm; at the second stage, the stochastic characteristics of industrial loads are analyzed by the two-state Markov process and a decision-making model of OaR (Objective-at-Risk) is constructed to stochastically optimize the load control scheme for eliminating the load payback and enhancing the feasibility and practicability of the proposed method. The optimized load control amount and sequence are calculated for a distribution network respectively by the improved NSGA-II and the golden section method and results prove the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Key words: load management; yardstick competition; Markov process; load payback; optimization