



电力系统能量与备用联合优化与精确调度

高云龙^{①②}, 潘金艳^③, 杨子江^④, 高峰^②, 吉国力^{①*}

① 厦门大学自动化系, 厦门 361005;

② 西安交通大学系统工程研究所, 机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049;

③ 集美大学信息工程学院, 厦门 361021;

④ 约克大学信息技术学院, 多伦多 M3J 1P3, 加拿大

* E-mail: gjji@xmu.edu.cn

收稿日期: 2011-07-04; 接受日期: 2011-10-08

国家自然科学基金(批准号: 60921003, 60736027, 61174161, 60974101)、高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20090121110022)、中央高校基本科研业务费专项资金(批准号: 2011121047, 201112G018, CXB2011035)、福建省重点科技计划项目(批准号: 2009H0044)和厦门大学国家“211工程”三期项目(批准号: 0630-E72000)资助

摘要 随着能源与环境危机日益严重, 如何建立精确调度模型成为电力市场逐步完善过程中的一个迫切需要研究的课题. 目前广泛采用的建模方式是将时间离散化, 建立离散时间调度模型, 本文首先举例说明离散时间调度模型中所定义的备用容量上、下限存在不可达的情况, 即离散时间调度模型中的备用容量上、下限约束条件不严格, 从而造成实际调度时存在旋转备用容量无法满足实际需求的情况. 通过对机组出力方式与爬坡率关系的详细分析, 证明了任意调度时段内机组精确可达的备用容量上、下限与该时段首末时刻机组输出功率相关, 并给出了精确可达备用上、下限的计算方法. 基于上面的分析结果, 建立了能量与备用联合优化与精确调度模型, 该模型将能量与备用联合精确调度这样一个连续时间最优控制问题建模成一个非线性规划问题, 从而极大地降低了问题的复杂性, 避免连续时间最优控制问题所存在的求解困难. 应用序列二次规划法对模型进行了数值求解, 并对结果进行了讨论, 进而验证了模型的有效性.

关键词

电力系统优化调度
连续时间调度模型
精确可达备用容量上、下限
序列二次规划

1 引言

电力系统优化调度问题是一类复杂的连续时间最优控制问题, 这类问题不但具有实时系统需求, 还可能十分复杂的离散和连续的动态运行约束, 几乎不可能按连续时间求解^[1-3]. 目前广泛采用的建模方式是将时间离散化, 在一个调度时段内, 假设系统的能量需求恒定, 把机组的出力计划当作能量输出

计划, 用机组的平均输出功率满足这一时段恒定的电能需求^[1-7]. 将时间离散化, 建立离散时间最优调度模型, 可将调度问题由连续时间最优控制问题转化为数学规划问题, 从而大大降低问题的复杂性. 国内外研究人员对此类问题进行了大量研究^[8, 9], 取得了许多重要成果. Lagrange 松弛法是解决此类问题最有效的方法之一^[3, 8, 10-12].

虽然建立离散时间最优调度模型可以大大降低

英文版发表信息: Gao Y L, Pan J Y, Yang Z J, et al. Optimization based accurate scheduling for generation and reserve of power system. *Sci China Tech Sci*, 2012, 55: 223-232, doi: 10.1007/s11431-011-4631-6

问题的复杂性,但是却忽略了发电机组实际运行的物理约束,如发电机组的爬坡能力有限,机组出力不可能每个调度时段起点时刻发生突变,完全按上述离散时间最优调度模型得到的调度计划不可能完全操作实现^[1].文献[1, 2]详细阐述了电力生产中离散时间最优调度即使满足爬坡率约束,也存在能量不可交付的情况.建立离散时间最优调度模型派生出的另一个问题是备用容量上、下限约束条件不严格,从而造成在实际生产调度中,根据离散时间调度模型进行调度时,存在备用容量无法满足实际需求的情况.

在电力系统实际运行时,当机组出力与实际负荷需求有差别时,通常由各种类型的备用补足差额,从而使得系统满足实时负载平衡.因此在电力系统优化调度中,能量输出计划可否精确实现影响系统的备用容量,而降低系统对备用容量的需求可以提高整个系统的经济性^[13],即精确调度可以提高电力系统运行的经济性.但是备用调度计划不可实现通常会影响到发用电的实时平衡,造成负荷缺额,从而降低了电力系统的安全性,因而精确调度对电力系统安全运行也具有重要意义.随着电力系统改革的进一步深入,电力结算方式的精细化,一切影响电力系统经济性与安全性的因素必然会受到重视^[14, 15].

本文首先证明任意调度时段内机组可以提供的备用容量上、下限与该时段起点与终点时刻机组输出功率相关,并给出一个调度时段内完全可达的备用容量上、下限的计算方法.然后基于这种计算方法重新定义 10 min 旋转备用容量上、下限的计算方法.基于新定义的 10 min 备用计算方法建立能量与备用联合优化与精确调度这样一个连续时间最优控制问题,建模成一个非线性规划问题,从而极大地降低了问题的复杂性,避免连续时间最优控制问题所存在的求解困难.通过采用序列二次规划法对精确调度模型进行求解进而求得精确满足时段内能量需求的最优调度,并且使得旋转备用容量上、下限平均可达.最后以一个 8 机组, 24 时段的调度问题为例,进行数值求解,并对结果进行讨论,以验证模型的有效性.

2 符号系统

i : 机组编号, ($i=1, 2, \dots, I$);

k : 调度时段编号, ($k=1, 2, \dots, K$);
 τ : 每个调度时段的时间长度, h;
 $P_{\max, i}, P_{\min, i}$: 机组 i 的输出功率上、下限, MW;
 Δ_i : 机组 i 的爬坡率上限, MW/h;
 $\bar{q}_i, \underline{q}_i$: 机组 i 提供上、下旋转备用容量报价, \$/MW;
 $D(k)$: 第 k 个调度时段总电量需求, MWh;
 $\bar{R}(k), \underline{R}(k)$: 第 k 个时段总的上、下旋转备用容量需求, MW;
 t : 连续时间变量, 从 0 时刻开始计时, 调度周期总时间长度为 $K\tau$;
 $r_i^{\text{up}}(k), r_i^{\text{down}}(k)$: 机组 i 在 k 时段提供的上、下旋转备用, MW;
 $r_{i, \max}^{\text{up}}(k), r_{i, \max}^{\text{down}}(k)$: 机组 i 在 k 时段可达的旋转备用容量上、下限, MW;
 $p_i(k)$: 机组 i 在 k 时段的能量输出, MWh;
 $g_i(t)$: 机组 i 在 t 时刻的输出功率, MW;
 $u_i(t)$: 机组 i 在 t 时刻的输出功率变化率 ($-\Delta_i \leq u_i(t) \leq \Delta_i$), MW/h;
 $C_i(p_i(k))$: 机组 i 在 k 时段发电量为 $p_i(k)$ 时的报价, 假定报价仅与产量有关, \$.

3 电力系统优化调度中的机组备用问题

3.1 旋转备用容量上、下限的定义及离散时间调度模型中的计算办法

在电力系统中,备用主要是为了提高整个系统的安全性而引入的,从世界范围来看,备用通常按照其响应性能分为自动发电控制(AGC)、旋转备用、非旋转备用和替代备用等几类,其具体名称因地而异^[13].其中旋转备用是指为了调整系统中短时负荷波动,并在发电或输电系统故障时可快速提供的同步容量,一般而言,电力系统优化与调度中所指的备用通常为旋转备用,即系统中同步机组在响应时间(通常为 10 min)内可以提供的升、降负荷容量^[3, 5, 16, 17].本文为了方便说明问题,首先将离散时间调度模型中通常使用的 10 min 响应时间扩展到一个调度时段(1 h),通过对一个调度时段内的旋转备用容量上、下限的计算方法进行分析,指出按照离散时间调度模型中给出的计算方法得到的旋转备用容量上、下限存在不可达的情况,然后对机组出力方式与备用容量的耦合

关系进行详细分析, 给出了一个调度时段内精确可达的旋转备用容量上、下限的计算方法.

按照本文符号系统, 离散时间调度模型中机组在一个调度时段内可以提供的旋转备用容量上、下限计算方法如下^[3-7, 18]:

$$\begin{cases} r_{i,\max}^{\text{up}}(k) = \min\left(P_{\max,i} - \frac{p_i(k)}{\tau}, \tau \cdot \Delta_i\right), \\ r_{i,\max}^{\text{down}}(k) = \min\left(\frac{p_i(k)}{\tau} - P_{\min,i}, \tau \cdot \Delta_i\right). \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\frac{p_i(k)}{\tau}$ 为机组 i 在第 k 个调度时段内的平均功率.

3.2 旋转备用容量上、下限不可达举例

考虑这样一台机组, 最小发电功率为 150 MW, 最大发电功率为 450 MW, 最大爬坡速率为 120 MW/h. 假定每个调度时段为 1 h, 该机组在当前时段起点时刻输出功率为 200 MW, 如图 1 中 B 点所示. 假设当前时段该机组的计划能量输出为 260 MWh. 为了满足计划能量输出, 机组需要从起点时刻全力爬升, 此时机组在该调度时段内的出力方式如图 1 中 BD 所示.

根据(1)式可以得到调度时段内机组能够提供的旋转备用容量上限 $r_{i,\max}^{\text{up}}(k)$ 为:

$$\begin{aligned} r_{i,\max}^{\text{up}}(k) &= \min((450 - 260) \text{ MW}, 120 \text{ MW}) \\ &= 120 \text{ MW}. \end{aligned} \quad (2)$$

事实上, 机组为了实现计划能量输出, 需要从该调度时段起点时刻全力爬升, 由于机组调节速率有限(爬坡率上限约束), 该调度时段内机组再无力提供额外的升负荷能力, 即 $r_{i,\max}^{\text{up}}(k)$ 不可达, 同理可以举例说明(1)式定义的旋转备用容量下限 $r_{i,\max}^{\text{down}}(k)$ 存在不

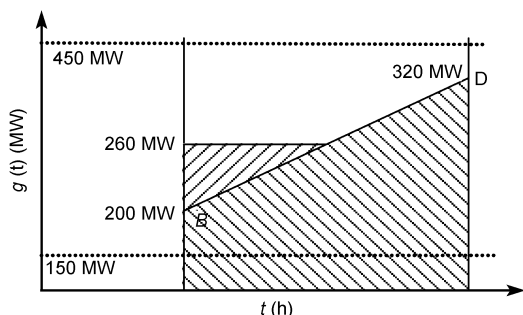


图 1 机组的输出功率与电量

可达的情况.

离散时间调度模型忽略了机组输出功率随时间连续变化的特性, 而造成(1)式所确定的旋转备用容量上、下限不可达. 在电力市场环境(如日前电力市场或实时市场)下, 即使发电机组的中标电量和备用容量要经过其机组状态和实际出力点的检验, 通过公式(1)计算的旋转备用容量上、下限, 仍然存在定义不严格的问题, 从而造成实际调度中机组无法在响应时段内完成中标备用容量.

3.3 连续时间最优调度中旋转备用容量上、下限的计算方法

在连续时间最优调度中, 机组 $i(i=1, 2, \dots, D)$ 在 t 时刻的输出功率 $g_i(t)$, 机组 i 在 t 时刻的输出功率变化率 $u_i(t)$, 以及机组 i 在 k 时段($k=1, 2, \dots, K$)的发电量 $p_i(k)$ 满足如下积分关系:

$$g_i(t) = g_i(0) + \int_0^t u_i(\zeta) d\zeta, \quad \forall t \in [0, K\tau]. \quad (3)$$

$$p_i(k) = \int_{(k-1)\tau}^{k\tau} g_i(t) dt. \quad (4)$$

Δ_i 为机组的爬坡率上限, 用来表示机组的最大升、降负荷能力. 事实上, 机组 i 在 t 时刻可实现的输出功率变化率上限不仅与机组的最大升、降负荷能力相关, 而且与机组 i 在该时刻的出力水平 $g_i(t)$ 有关, 如当 $g_i(t) = P_{\max,i}$ 时, 机组在该时刻无法升负荷, 此时机组可实现的升负荷输出功率变化率上限为 0; 反之当 $g_i(t) = P_{\min,i}$ 时, 机组在该时刻无法降负荷, 此时机组可实现的降负荷输出功率变化率上限为 0. 因为机组 i 的输出功率 $g_i(t)$ 是时间 t 的连续函数, 可知机组 i 在 t 时刻可实现的升、降负荷输出功率变化率上限也是时间 t 的函数, 并且随机组 i 的出力水平的变化而有所不同. 为了描述方便, 不妨设机组 i 在 t 时刻可实现的升负荷输出功率变化率上限为 $\hat{\Delta}_i(t)$, 可实现的降负荷输出功率变化率上限为 $\check{\Delta}_i(t)$, 则 $0 \leq \hat{\Delta}_i(t) \leq \Delta_i$, $0 \leq \check{\Delta}_i(t) \leq \Delta_i$, 即机组 i 在 t 时刻可实现的升、降负荷输出功率变化率上限应满足机组爬坡率上限的物理约束.

由于 t 时刻机组的输出功率变化率为 $u_i(t)$, 此时可实现的上、下旋转备用应在输出功率变化率 $u_i(t)$ 的基础上, 由机组的剩余升、降负荷能力提供, 即可实现的上旋转备用为 $\hat{\Delta}_i(t) - u_i(t)$, 下旋转备用为 $u_i(t) -$

$(-\tilde{\Delta}_i(t))$, 亦即 $u_i(t) + \tilde{\Delta}_i(t)$. 根据旋转备用的定义, 机组 i 在第 k 个调度时段内可提供的升、降负荷容量, 亦即上、下旋转备用为:

$$\begin{cases} r_i^{\text{up}}(k) = \int_{(k-1)\tau}^{k\tau} (\hat{\Delta}_i(t) - u_i(t)) dt, \\ r_i^{\text{down}}(k) = \int_{(k-1)\tau}^{k\tau} (u_i(t) + \tilde{\Delta}_i(t)) dt. \end{cases} \quad (5)$$

当机组 i 在 k 时段内提供上、下旋转备用时, 必需满足安全运行条件的约束, 即机组在升、降负荷的同时, 必须保证调度时段内机组的输出功率都落在功率上、下限范围内, 且输出功率的变化率满足爬坡率上限约束. 当已知机组 i 在第 k 时段起点时刻输出功率为 $g_i((k-1)\cdot\tau)$, 输出功率控制函数为 $u_i(t)$, 则机组 i 在第 k 时段内 ($k=1, 2, \dots, K$) 可提供的旋转备用容量上、下限应通过求解下面两个优化问题得到:

$$\begin{cases} r_{i,\max}^{\text{up}}(k) = \max_{\Delta_i(t)} r_i^{\text{up}}(k), \\ \text{s.t. } r_i^{\text{up}}(k) = \int_{(k-1)\tau}^{k\tau} (\hat{\Delta}_i(t) - u_i(t)) dt, \\ g_i((k-1)\cdot\tau) + \int_{(k-1)\tau}^t \hat{\Delta}_i(\zeta) d\zeta \leq P_{\max,i}, \\ -\tilde{\Delta}_i(t) \leq u_i(t) \leq \hat{\Delta}_i(t), \\ 0 \leq \hat{\Delta}_i(t) \leq \Delta_i, \\ (k-1)\cdot\tau \leq t \leq k\cdot\tau. \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} r_{i,\max}^{\text{down}}(k) = \max_{\tilde{\Delta}_i(t)} r_i^{\text{down}}(k), \\ \text{s.t. } r_i^{\text{down}}(k) = \int_{(k-1)\tau}^{k\tau} (u_i(t) + \tilde{\Delta}_i(t)) dt, \\ g_i((k-1)\cdot\tau) - \int_{(k-1)\tau}^t \tilde{\Delta}_i(\zeta) d\zeta \geq P_{\min,i}, \\ -\tilde{\Delta}_i(t) \leq u_i(t) \leq \hat{\Delta}_i(t), \\ 0 \leq \tilde{\Delta}_i(t) \leq \Delta_i, \\ (k-1)\cdot\tau \leq t \leq k\cdot\tau. \end{cases} \quad (7)$$

(6)式中的约束条件 $g_i((k-1)\cdot\tau) + \int_{(k-1)\tau}^t \hat{\Delta}_i(\zeta) d\zeta \leq P_{\max,i}$

其中 $(k-1)\cdot\tau \leq t \leq k\cdot\tau$, 保证机组在升负荷的同时该调度时段内任意时刻的输出功率满足功率上限约束.

同理(7)式中的约束条件 $g_i((k-1)\cdot\tau) - \int_{(k-1)\tau}^t \tilde{\Delta}_i(\zeta) d\zeta \geq P_{\min,i}$ 其中 $(k-1)\cdot\tau \leq t \leq k\cdot\tau$, 表示机组在降负荷的同时保证该调度时段内任意时刻的输出功率满足功率

下限约束.

由(6)与(7)式可知, 调度时段内的旋转备用容量上、下限取决于 $u_i(t)$, 而实际调度中 $u_i(t)$ 根本无法提前确定. 下面证明机组 i 在 k 时段内精确可达的旋转备用容量上、下限可表示为该时段初、末时刻瞬时输出功率的二元函数, 与 $u_i(t)$ 无关.

定理 1. 对于机组 i 在 k 时段内的任意一个完全可实现的输出功率 $g_i(t)$ 其中 $(k-1)\cdot\tau \leq t \leq k\tau$, 机组 i 在该时段内可以提供的精确可达的旋转备用容量上、下限为:

$$\begin{cases} r_{i,\max}^{\text{up}}(k) = \min(g_i((k-1)\cdot\tau) + \tau \cdot \Delta_i, P_{\max,i}) - g_i(k\cdot\tau), \\ r_{i,\max}^{\text{down}}(k) = g_i(k\cdot\tau) - \max(g_i((k-1)\cdot\tau) - \tau \cdot \Delta_i, P_{\min,i}). \end{cases} \quad (8)$$

证明. 首先证明机组 i 在 k 时段精确可达的最大上旋转备用.

因为 $g_i(t)$ 其中 $(k-1)\cdot\tau \leq t \leq k\cdot\tau$ 已知, 则根据 $g_i(t)$ 可以确定机组 i 在 k 时段起点时刻输出功率为 $g_i((k-1)\cdot\tau)$, 终点时刻机组输出功率为 $g_i(k\cdot\tau)$, 由(3)式可得:

$$\begin{aligned} g_i(k\cdot\tau) &= g_i(0) + \int_0^{k\cdot\tau} u_i(t) dt \\ &= g_i(0) + \int_0^{(k-1)\tau} u_i(t) dt + \int_{(k-1)\tau}^{k\cdot\tau} u_i(t) dt \\ &= g_i((k-1)\cdot\tau) + \int_{(k-1)\tau}^{k\cdot\tau} u_i(t) dt. \end{aligned} \quad (9)$$

则:

$$\int_{(k-1)\tau}^{k\tau} u_i(t) dt = g_i(k\cdot\tau) - g_i((k-1)\cdot\tau). \quad (10)$$

由(5)式可得:

$$\begin{aligned} r_i^{\text{up}}(k) &= \int_{(k-1)\tau}^{k\tau} (\hat{\Delta}_i(t) - u_i(t)) dt \\ &= \int_{(k-1)\tau}^{k\tau} \hat{\Delta}_i(t) dt - \int_{(k-1)\tau}^{k\tau} u_i(t) dt. \end{aligned} \quad (11)$$

将(10)式代入(11)式可得:

$$r_i^{\text{up}}(k) = \int_{(k-1)\tau}^{k\tau} \hat{\Delta}_i(t) dt - (g_i(k\cdot\tau) - g_i((k-1)\cdot\tau)). \quad (12)$$

用(12)式定义的 $r_i^{\text{up}}(k)$ 替换(6)式中的 $r_i^{\text{up}}(k)$, 则(6)式可变为:

$$\left\{ \begin{array}{l} r_{i,\max}^{\text{up}}(k) = \max_{\Delta_i(t)} r_i^{\text{up}}(k), \\ \text{s.t. } r_i^{\text{up}}(k) = \int_{(k-1)\tau}^{k\tau} \widehat{\Delta}_i(t) d\zeta - (g_i(k \cdot \tau) - g_i((k-1) \cdot \tau)), \\ g_i((k-1) \cdot \tau) + \int_{(k-1)\tau}^t \widehat{\Delta}_i(\zeta) d\zeta \leq P_{\max,i}, \\ -\widehat{\Delta}_i(t) \leq u_i(t) \leq \widehat{\Delta}_i(t), \\ 0 \leq \widehat{\Delta}_i(t) \leq \Delta_i, \\ (k-1) \cdot \tau \leq t \leq k \cdot \tau. \end{array} \right. \quad (13)$$

下面分两种情况.

1) 当 $g_i((k-1) \cdot \tau) + \tau \cdot \Delta_i \leq P_{\max,i}$.

因为 $0 \leq \widehat{\Delta}_i(t) \leq \Delta_i$, 则当 $\widehat{\Delta}_i(t) = \Delta_i$ 时, 有 $\max_{\Delta_i(t)} \left(\int_{(k-1)\tau}^{k\tau} \widehat{\Delta}_i(t) dt \right) = \tau \cdot \Delta_i$. 又因为 $g_i((k-1) \cdot \tau) + \tau \cdot \Delta_i \leq P_{\max,i}$, 所以 $\widehat{\Delta}_i(t) = \Delta_i$ 时, 对于任意时刻 $t((k-1) \cdot \tau \leq t \leq k \cdot \tau)$ 满足约束条件 $g_i((k-1) \cdot \tau) + \int_{(k-1)\tau}^t \widehat{\Delta}_i(\zeta) d\zeta \leq P_{\max,i}$.

又因为 $u_i(t)$ 满足安全运行约束, 即 $-\Delta_i \leq u_i(t) \leq \Delta_i$, 所以当 $\widehat{\Delta}_i(t) = \Delta_i$ 时, 约束条件 $0 \leq \widehat{\Delta}_i(t) \leq \Delta_i$ 且 $\widehat{\Delta}_i(t) \geq u_i(t)$ 满足. 那么

$$\begin{aligned} r_{i,\max}^{\text{up}}(k) &= \max_{\Delta_i(t)} r_i^{\text{up}}(k) \\ &= \max_{\Delta_i(t)} \left(\int_{(k-1)\tau}^{k\tau} \widehat{\Delta}_i(t) dt - (g_i(k \cdot \tau) - g_i((k-1) \cdot \tau)) \right) \\ &= g_i((k-1) \cdot \tau) + \max_{\Delta_i(t)} \left(\int_{(k-1)\tau}^{k\tau} \widehat{\Delta}_i(t) dt \right) - g_i(k \cdot \tau) \\ &= g_i((k-1) \cdot \tau) + \tau \cdot \Delta_i - g_i(k \cdot \tau). \end{aligned} \quad (14)$$

2) 当 $g_i((k-1) \cdot \tau) + \tau \cdot \Delta_i > P_{\max,i}$.

由约束条件 $g_i((k-1) \cdot \tau) + \int_{(k-1)\tau}^t \widehat{\Delta}_i(\zeta) d\zeta \leq P_{\max,i}$,

其中 $(k-1) \cdot \tau \leq t \leq k \cdot \tau$, 并且 $0 \leq \widehat{\Delta}_i(t) \leq \Delta_i$, 可得

$$\begin{aligned} &\max_{\Delta_i(t)} \left(g_i((k-1) \cdot \tau) + \int_{(k-1)\tau}^{k\tau} \widehat{\Delta}_i(t) dt \right) \\ &= \min(P_{\max,i}, g_i((k-1) \cdot \tau) + \tau \cdot \Delta_i). \end{aligned}$$

又因为 $g_i((k-1) \cdot \tau) + \tau \cdot \Delta_i > P_{\max,i}$, 所以

$$\max_{\Delta_i(t)} \left(g_i((k-1) \cdot \tau) + \int_{(k-1)\tau}^{k\tau} \widehat{\Delta}_i(t) dt \right) = P_{\max,i}.$$

因为 $u_i(t)$ 满足安全运行约束, 即 $-\Delta_i \leq u_i(t) \leq \Delta_i$, 且对于任意 $t((k-1) \cdot \tau \leq t \leq k \cdot \tau)$, 都有 $P_{\min,i} \leq g_i((k-1) \cdot \tau) + \int_{(k-1)\tau}^t u_i(\zeta) d\zeta \leq P_{\max,i}$. 所以当 $\max_{\Delta_i(t)} \left(g_i((k-1) \cdot \tau) + \int_{(k-1)\tau}^{k\tau} \widehat{\Delta}_i(t) dt \right) = P_{\max,i}$ 时, 必定存在 $\widehat{\Delta}_i(t)$ 满足约束条件 $0 \leq \widehat{\Delta}_i(t) \leq \Delta_i$ 且 $\widehat{\Delta}_i(t) \geq u_i(t)$. 那么

$$\begin{aligned} r_{i,\max}^{\text{up}}(k) &= \max_{\Delta_i(t)} r_i^{\text{up}}(k) \\ &= \max_{\Delta_i(t)} \left(\int_{(k-1)\tau}^{k\tau} \widehat{\Delta}_i(t) dt - (g_i(k \cdot \tau) - g_i((k-1) \cdot \tau)) \right) \\ &= \max_{\Delta_i(t)} \left(g_i((k-1) \cdot \tau) + \int_{(k-1)\tau}^{k\tau} \widehat{\Delta}_i(t) dt \right) - g_i(k \cdot \tau) \\ &= P_{\max,i} - g_i(k \cdot \tau). \end{aligned} \quad (15)$$

结合(14)与(15)式可得:

$$r_{i,\max}^{\text{up}}(k) = \min(g_i((k-1) \cdot \tau) + \tau \cdot \Delta_i, P_{\max,i}) - g_i(k \cdot \tau), \quad (16)$$

同理可得:

$$r_{i,\max}^{\text{down}}(k) = g_i(k \cdot \tau) - \max(g_i((k-1) \cdot \tau) - \tau \cdot \Delta_i, P_{\min,i}).$$

至此定理 1 全部证完.

推论. 机组 i 在 k 时段完全可实现的旋转备用容量上、下限与机组在该时段的出力方式 $g_i(t), ((k-1) \cdot \tau \leq t \leq k \cdot \tau)$ 的具体形式无关, 即与机组的出力控制函数 $u_i(t)$ 无关.

证明. 由定理 1 的证明过程可知当机组 i 在第 k 时段起点时刻输出功率 $g_i((k-1) \cdot \tau)$ 与终点时刻输出功率 $g_i(k \cdot \tau)$ 已知时, 对于该时段内的任意满足安全运行约束的出力控制函数 $u_i(t)$, (8)式都成立, 因而可实现的旋转备用容量上、下限与机组的出力方式 $u_i(t)$ 的具体形式无关, 即与机组的出力控制函数 $u_i(t)$ 无关. 至此推论 1 证毕.

3.4 离散与连续时间调度模型中的旋转备用容量上、下限的相互关系

如果按照目前广泛采用的离散时间建模方式, 则调度时段内系统需求恒定, 用机组的平均功率代替调度时段内的能量输出计划, 则有:

$$g_i((k-1) \cdot \tau) = g_i(k \cdot \tau) = \frac{P_i(k)}{\tau}, \quad (17)$$

此时精确可达的旋转备用容量上、下限((8)式)变为:

$$\begin{aligned} r_{i,\max}^{\text{up}}(k) &= \min\left(g_i((k-1)\cdot\tau) + \tau\cdot\Delta_i, P_{\max,i}\right) - g_i(k\cdot\tau) \\ &= \min\left(P_{\max,i} - \frac{p_i(k)}{\tau}, \tau\cdot\Delta_i\right) \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} r_{i,\max}^{\text{down}}(k) &= g_i(k\cdot\tau) - \max\left(g_i((k-1)\cdot\tau) - \tau\cdot\Delta_i, P_{\min,i}\right) \\ &= \min\left(\frac{p_i(k)}{\tau} - P_{\min,i}, \tau\cdot\Delta_i\right). \end{aligned} \quad (19)$$

由(18)和(19)式可得: 在离散时间模型中, 用机组的平均功率代替调度时段内的能量输出计划, 造成(8)式与(1)式等价. 所以采取离散时间建模方式会造成调度计划在实际操作中存在不可实现的可能性, 为了确保调度计划的精确可实现, 必需建立连续时间最优调度模型.

3.5 连续时间最优调度模型中 10 min 旋转备用容量上、下限的计算方法

定理 1 给出了连续时间最优调度模型中一个调度时段内精确可达的旋转备用容量上、下限计算方法, 进而在推论中指出可实现的旋转备用容量上、下限与机组在该时段的出力方式的具体形式无关. 但是在电力系统实际应用中旋转备用通常要用 30, 15, 10 min 甚至更短这样的分钟级衡量, 用一个调度时段(通常为 1 h)作为衡量尺度, 仅存在理论意义, 实际应用价值不大.

如果要使用定理 1 得出的结论来计算分钟级响应时段内精确可达的旋转备用容量上、下限, 必须提前知道备用响应起点与终点的瞬时输出功率. 把调度时段缩短为备用响应时段是解决这个问题的一种办法, 但由此会带来另外两个问题: 一个是随着调度时段的缩短, 在一个调度周期内的调度时段个数将显著增加, 由此造成该调度问题的规模急剧增大, 为问题的求解带来困难. 另外一个更重要的问题是我们根本无法提前得知备用响应的具体时刻, 由此造成根据响应时段来调整调度时段的方法根本不可行.

另一个办法就是根据(8)式定义调度时段内分钟级(通常为 10 min)平均可达旋转备用容量上、下限, 如下式所示:

$$\begin{cases} r_{i,\max}^{\text{up}}(k) \\ = \min\left(\frac{g_i((k-1)\cdot\tau) + \tau\cdot\Delta_i - g_i(k\cdot\tau)}{6\tau}, P_{\max,i} - g_i(k\cdot\tau)\right), \\ r_{i,\max}^{\text{down}}(k) \\ = \min\left(\frac{g_i(k\cdot\tau) - (g_i((k-1)\cdot\tau) - \tau\cdot\Delta_i)}{6\tau}, g_i(k\cdot\tau) - P_{\min,i}\right). \end{cases} \quad (20)$$

这样做虽然将备用上、下限精确可达变为调度时段内平均意义上的可达, 但是这样做可以带来以下好处: 1) 在保证能量输出计划精确可实现与备用容量上、下限在平均意义上可达的条件下, 问题的规模没有发生变化, 不会为问题的求解带来困难; 2) 由于机组对备用响应的具体时刻并不确定, 而是由系统的实时负载平衡情况和运行机组故障等一系列情况共同确定^[19-23], 是一个随机量, 因而此处考虑备用在平均意义上的可实现更符合实际情况, 而且与离散时间最优调度中机组在响应时段内(通常为 10 min)可提供的旋转备用容量上、下限计算方法相比, 这样的备用计算方式可以以更大概率保证当系统出现故障时仍保持运行基本正常.

4 调度时段内能量输出上、下限

文献[1]详细分析了含积分约束的生产制造系统优化调度问题, 并证明了单台生产设备在各时段的产量上、下限可表示为该设备在相应时段初、末时刻生产率的二元函数. 如果用 $g_{i,k-1}$ 表示 $g_i((k-1)\cdot\tau)$ 用 $g_{i,k}$ 表示 $g_i(k\cdot\tau)$, 则本文可以直接将该结论引用如下:

定理 2. 设 $p_i(k)$, $g_i(t)$, $u_i(t)$ 满足(3)和(4)式, 且 $-\Delta_i \leq u_i(t) \leq \Delta_i$, $P_{\min,i} \leq g_i(t) \leq P_{\max,i}$, 则有下述结论成立:

(i)

$$|g_{i,k} - g_{i,k-1}| \leq \Delta_i \cdot \tau; k = 1, 2, \dots, K. \quad (21)$$

(ii)

$$\underline{p}_i(g_{i,k-1}, g_{i,k}) \leq p_i(k) \leq \bar{p}_i(g_{i,k-1}, g_{i,k}), k = 1, 2, \dots, K. \quad (22)$$

(22)式中的 $\underline{p}_i(g_{i,k-1}, g_{i,k})$, $\bar{p}_i(g_{i,k-1}, g_{i,k})$ 表示在第 k 段起点与终点时刻输出功率已知的情况下, 该段能量输出上、下限. 解析表达式如下:

$$\underline{p}_i(g_{i,k-1}, g_{i,k}) = \begin{cases} \frac{(g_{i,k-1} - P_{\min,i})^2 + (g_{i,k} - P_{\min,i})^2}{2\Delta_i} + P_{\min,i} \cdot \tau, & \text{if } g_{i,k-1} + g_{i,k} < 2P_{\min,i} + \Delta_i \tau, \\ \frac{(g_{i,k-1} - g_{i,k})^2}{4\Delta_i} + \frac{\tau}{2} \cdot (g_{i,k-1} + g_{i,k}) - \frac{\Delta_i \tau^2}{4}, & \text{if } g_{i,k-1} + g_{i,k} \geq 2P_{\min,i} + \Delta_i \tau. \end{cases} \quad (23)$$

$$\bar{p}_i(g_{i,k-1}, g_{i,k}) = \begin{cases} \frac{(P_{\max,i} - g_{i,k-1})^2 + (P_{\max,i} - g_{i,k})^2}{2\Delta_i} + P_{\max,i} \cdot \tau, & \text{if } g_{i,k-1} + g_{i,k} \geq 2P_{\max,i} - \Delta_i \tau, \\ \frac{(g_{i,k-1} - g_{i,k})^2}{4\Delta_i} + \frac{\tau}{2} \cdot (g_{i,k-1} + g_{i,k}) + \frac{\Delta_i \tau^2}{4}, & \text{if } g_{i,k-1} + g_{i,k} < 2P_{\max,i} - \Delta_i \tau. \end{cases} \quad (24)$$

(iii) (22)式给出的 $p_i(k)$ 的上、下界是可以达到的, 即分别存在适当的生产率函数 $g_i(t)$ 和生产率变化率函数 $u_i(t)$ 使得(23)和(24)式中的两个不等式成为等式。

基于定理1和定理2可以将电力系统中精确调度问题, 这样一个连续时间最优控制问题建模为一个数学规划问题。

5 能量与备用联合优化与精确调度模型

这一节在上两节分析的基础上给出能量与备用联合优化与精确调度模型, 为了方便描述与分析, 本文暂未引入描述机组开、关机状态的离散决策变量和约束, 但是本文所建立的模型分析了积分关系对能量与备用联合调度影响的主要特点, 该模型具有良好的可扩展性。

本文以购买电能与备用费用最小为目标, 购买模型如下:

$$\min_{r_i^{\text{up}}(k), r_i^{\text{down}}(k), P_i(k)} \left(\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I (C_i(P_i(k)) + \bar{q}_i r_i^{\text{up}}(k) + \underline{q}_i r_i^{\text{down}}(k)) \right), \quad (25)$$

包括下面的约束条件。

(a) 系统负载平衡约束:

$$\sum_{i=1}^I p_i(k) = D(k), \quad k = 1, 2, \dots, K. \quad (26)$$

(b) 系统备用需求约束:

$$\sum_{i=1}^I r_i^{\text{up}}(k) \geq \bar{R}(k), \quad k = 1, 2, \dots, K, \quad (27)$$

$$\sum_{i=1}^I r_i^{\text{down}}(k) \geq \underline{R}(k), \quad k = 1, 2, \dots, K. \quad (28)$$

(c) 备用容量上、下限约束:

$$0 \leq r_i^{\text{up}}(k) \leq r_{i,\max}^{\text{up}}(k), \quad k = 1, 2, \dots, K; \quad i = 1, 2, \dots, I, \quad (29)$$

$$0 \leq r_i^{\text{down}}(k) \leq r_{i,\max}^{\text{down}}(k), \quad k = 1, 2, \dots, K; \quad i = 1, 2, \dots, I, \quad (30)$$

其中 $r_{i,\max}^{\text{down}}(k), r_{i,\max}^{\text{up}}(k)$ 由式(20)确定。

(d) 功率上、下限约束:

$$P_{\min,i} \leq g_i((k-1) \cdot \tau) \leq P_{\max,i}, \quad k = 1, 2, \dots, K; \quad i = 1, 2, \dots, I. \quad (31)$$

(e) 爬坡率约束:

$$|g_i(k \cdot \tau) - g_i((k-1) \cdot \tau)| \leq \Delta_i \cdot \tau, \quad k = 1, 2, \dots, K; \quad i = 1, 2, \dots, I. \quad (32)$$

(f) 能量上、下限约束:

$$\underline{p}_i(g_{i,k-1}, g_{i,k}) \leq p_i(k) \leq \bar{p}_i(g_{i,k-1}, g_{i,k}), \quad k = 1, 2, \dots, K; \quad i = 1, 2, \dots, I. \quad (33)$$

其中 $\underline{p}_i(g_{i,k-1}, g_{i,k}), \bar{p}_i(g_{i,k-1}, g_{i,k})$, 由(23)与(24)式定义。

(g) 调度初始时刻机组出力水平约束:

$$g_i(0) = g_{i,0}^*. \quad (34)$$

除了上面所介绍的约束条件外, 本模型还包含一些等式约束: (20), (23), (24). 这些等式在上两节已经做了详细介绍, 此处就不再赘述。

(25)~(34)式将电力系统能量与备用联合优化与精确调度建模成为一个数学规划问题, 不仅大大降低问题的复杂性, 而且保证了机组的能量输出计划精确可实现, 且机组在调度时段内的旋转备用容量上、下限也平均可达。

6 模型求解办法

模型能否精确求解也是影响调度计划可否实现

的关键步骤. 文献[1]中证明了定理 2 中给出的 $p_i(g_{i,k-1}, g_{i,k})$ 是一个凸函数, $\bar{p}_i(g_{i,k-1}, g_{i,k})$ 是一个凹函数, 然后在生产成本为凸函数时, 基于该结论证明了精确满足累积产量实时需求的生产制造系统优化调度模型为一个凸规划问题. 参考文献[1]的证明方法, 同理可以证明本文第 5 节中建立的能量与备用联合优化与精确调度模型, 在生产成本为凸函数的条件下为一个凸规划问题. 凸规划问题的任意局部最优解也是全局最优解, 能够非常有效求解, 一些经典算法都能非常迅速地收敛到全局最优解^[1]. 本文采用 Matlab6.5 优化工具箱中的序列二次规划方法对精确调度模型进行求解.

7 仿真验证

本文用一个具有 8 台机组的电力系统作为测试对象, 原始数据来源于文献[1], 对应地将模型(25)~(34)式中参数设置为: $I=8, K=24 \text{ h}, \tau=1 \text{ h}$. 系统上、下旋转备用需求均为各调度时段系统平均负荷需求的 5%. 各机组的报价函数表达式为:

$$C_i(p_i(k)) = a_i(p_i(k))^2 + b_i p_i(k) + c_i, \quad (35)$$

表 1 各机组的主要参数

Unit No. (<i>i</i>)	$P_{\max,i}$	$P_{\min,i}$	Δ_i	a_i	b_i	c_i	\bar{q}_i	q_i	$g_i(0)$
1	455	150	600.6	0.00031	17.62	970	1.86	0.27	300
2	455	150	600.6	0.00031	17.62	970	1.86	0.27	300
3	180	25	247	0.00395	19.5	456	0.96	0.09	60
4	170	25	243	0.00395	19.7	450	0.96	0.19	55
5	162	25	243	0.00399	19.8	445	0.97	0.20	55
6	162	25	240	0.00398	19.7	450	0.96	0.20	60
7	80	25	144	0.00712	22.26	370	1.1	0.22	30
8	65	10	102.3	0.00222	27.27	665	1.35	0.27	10

表 2 各调度时段系统的负荷需求与上、下旋转备用需求

<i>k</i>	$D(k)$	$\bar{R}(k)$	$\underline{R}(k)$	<i>k</i>	$D(k)$	$\bar{R}(k)$	$\underline{R}(k)$	<i>k</i>	$D(k)$	$\bar{R}(k)$	$\underline{R}(k)$
1	765	38.25	38.25	9	1465	73.25	73.25	17	1390	69.5	69.5
2	805	40.25	40.25	10	1465	73.25	73.25	18	1450	72.5	72.5
3	875	43.75	43.75	11	1683	84.15	84.15	19	1370	68.5	68.5
4	915	45.75	45.75	12	1688	84.4	84.4	20	1320	66	66
5	976	48.8	48.8	13	1470	73.5	73.5	21	1350	67.5	67.5
6	1055	52.75	52.75	14	1420	71	71	22	1300	65	65
7	1265	63.25	63.25	15	1360	68	68	23	840	42	42
8	1270	63.5	63.5	16	1360	68	68	24	760	38	38

其中 a_i (\$/(MW/h)²), b_i (\$/MW/h), c_i (\$为)非负常数. 各机组的主要参数及系统需求见表 1 和表 2.

在 Core Duo 2.4 GHz, Windows 环境下, 应用 Matlab 6.5 优化工具箱中的序列二次规划方法对问题求解, 获得 1#机组和 3#机组的最优电量. 因为电量可以表示为单位时间内的平均功率, 故可用调度时段内的平均功率表示最优电量, 结果如图 2 和 3 所示.

本实验中 1#机组的生产成本最低, 因此在负荷需求较大时, 处于满负荷运转; 3#机组的生产成本最高, 因此仅在负荷需求较大时发电功率较大, 在负荷需求很低时发电功率处于较低水平. 由文献[1, 7]可知, 根据机组的最优电量可以构造一个比较平稳的出力曲线, 在爬升约束的条件下, 完全满足最优电量可实现. 算例测试结果表明, 本文提出的方法是有效的, 得到了最优的调度计划.

1#机组和 3#机组的最优上、下旋转备用容量曲线如图 4 和 5 所示.

因为 1#机组的生产成本较低, 因此在负荷需求较大时处于满负荷运转, 此时该机组没有提供上旋转备用的能力. 如图 2 所示 1#机组在 5 至 22 时段处于满出力运行状态, 但在该时段内 1#机组不提供上旋转备用, 如图 4 所示; 又如图 3 所示 3#机组在 10

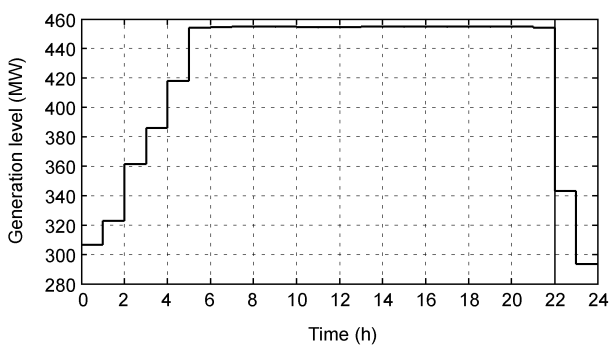


图2 1#机组的最优电量

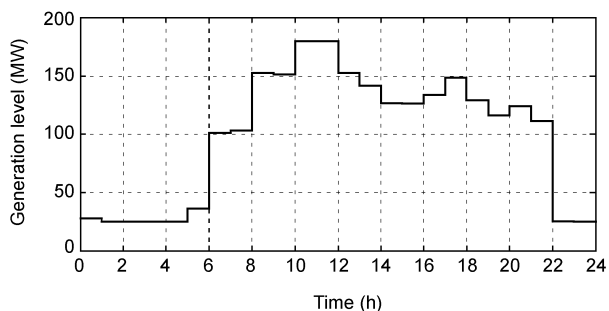


图3 3#机组的最优电量

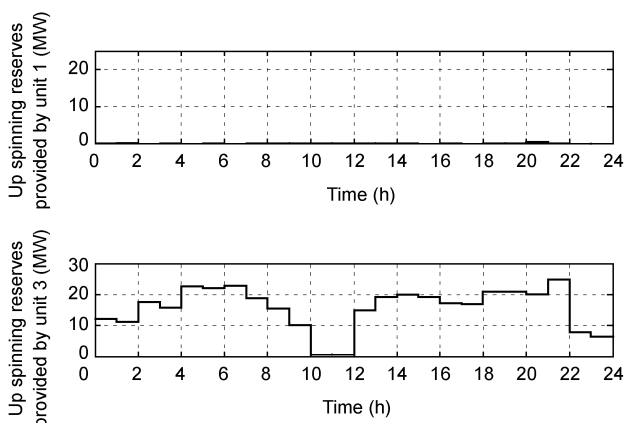


图4 1#与3#机组的最优上旋转备用容量

至12时段处于满出力运行状态,此时3#该机组没有提供上旋转备用的能力,在该时段内3#机组也不提供上旋转备用,如图4所示.但是此时1#机组与3#机组具有足够的提供下旋转备用.如3#机组上、下备用报价都低,所以3#机组最优的上、下备用容量都比较高,特别是3#机组在10至12时段,因为此时机组处于满出力状态,此时具有最大的下旋转备用容量,结果如图5所示.所以本文所建立的能量与备用联合优化与精确调度模型考虑了,机组输出功率的连

续时间变化特性,从而保证了调度计划的可实现.

比较离散时间最优调度中机组在10 min内可提供的旋转备用容量上、下限与(20)式定义的旋转备用容量上、下限,结果如图6所示.

从图6可以看出根据本文方法得到的机组可提供的旋转备用容量上、下限与传统方法得到的旋转备用容量上、下限比较相似,但不完全相同.如图6中第1个时段到第5个时段,按照本文方法得到的1#机组的备用容量上限小于按照离散时间调度模型得到的备用容量上限;在第23,24个时段,1#机组的备用容量下限小于按照离散时间调度模型得到的旋转备用容量下限,这是因为本文所建立的模型考虑了机组输出功率变化的连续性,将机组备用定义为除了满足计划能量输出外的额外升、降负荷能力,因而根据本文的计算方法得到的备用容量上、下限平均可达.

8 结论

传统的调度模型中假设机组在各个调度时段起

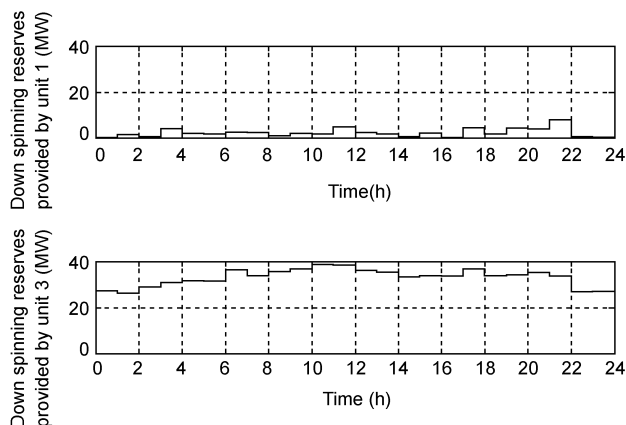


图5 1#与3#机组的最优下旋转备用容量

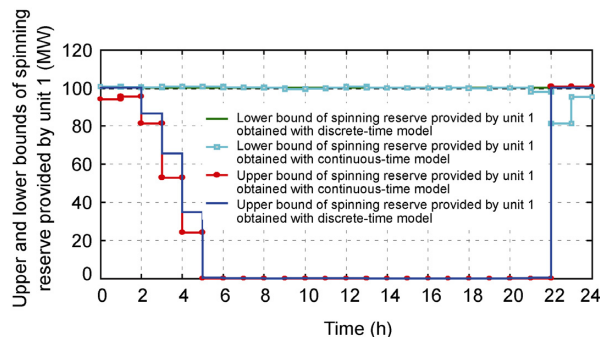


图6 1#机组的旋转备用容量上、下限

点时刻输出功率可以发生瞬时变化, 因此在建立模型的过程中假设一个调度时段内系统需求为恒定值, 用机组的平均功率满足这一时段恒定的需求. 机组输出功率可以发生瞬时变化的假设条件, 不仅造成了在实际调度中存在调度计划无法操作实现的情况, 而且也造成了调度模型中所定义的旋转备用容量上、下限存在不可达的情况, 即调度模型中的备用上、下限约束条件不严格, 从而导致实际调度中存在备用容量无法满足实际需求的情况. 这些都为整个电力系统的稳定性与安全性带来隐患.

本文首先指出了当前时段机组完全可达的旋转

备用容量上、下限与该时段起点与终点时刻机组输出功率相关, 并给出了旋转备用容量上、下限的计算方法. 分析了机组爬坡率的影响, 建立了能量与备用联合优化与精确调度模型, 该模型将能量与备用联合优化并精确调度这样一个连续时间最优控制问题建模成一个非线性规划问题, 从而极大地降低了问题的复杂性, 避免连续时间最优控制问题所存在的求解困难. 该模型克服了离散时间调度模型中的调度结果不可实现问题, 能够保证调度计划精确可实现与备用容量上、下限在平均意义上可达. 实例测试表明本文提出的模型非常有效.

参考文献

- 1 管晓宏, 翟桥柱, 冯泳翰, 等. 一类含积分约束的生产制造系统优化调度. 中国科学: 技术科学, 2010, 40(1): 41-51
- 2 Guan X H, Gao F, Svoboda A J. Energy delivery capacity and generation scheduling in the deregulated electric power market. IEEE Trans Power Syst, 2000, 15(4): 1275-1280
- 3 翟桥柱. 电力系统优化调度模型与算法研究. 博士学位论文. 西安: 西安交通大学, 2005. 1-22
- 4 Stacke F, Cuervo P. A combined pool/bilateral/reserve electricity market operating under pay-as-bid pricing. IEEE Trans Power Syst, 2008, 23(4): 1601-1610
- 5 Wang J X, Wang X F, Wu Y. Operating reserve model in the power market. IEEE Trans Power Syst, 2005, 20(1): 223-229
- 6 Gan D Q, Litvinow E. Energy and reserve market designs with explicit consideration to lost opportunity costs. IEEE Trans Power Syst, 2003, 18(1): 53-59
- 7 高云龙, 高峰, 潘金艳, 等. 高耗能企业关口平衡优化调度及其输出功率控制方式. 中国电机工程学报, 2010, 30(19): 76-83
- 8 Flynn M, Sheridan W P, Dillon J D, et al. Reliability and reserve in competitive electricity market scheduling. IEEE Trans Power Syst, 2001, 16(1): 78-87
- 9 Salam M S, Nor K M, Hamdam A R. Hydrothermal scheduling based Lagrangian relaxation approach to hydrothermal coordination. IEEE Trans Power Syst, 1998, 13(1): 226-235
- 10 Sand G, Engell S. Modeling and solving real-time scheduling problems by stochastic integer programming. Comp Chem Eng, 2004, 28(6): 1087-1103
- 11 Guan X H, Guo S G, Zhai Q Z. The conditions for obtaining feasible solutions to security-constrained unit commitment problems. IEEE Trans Power Syst, 2005, 20(4): 1746-1756
- 12 Fisher M L. The Lagrangian relaxation method for solving integer programming problems. Manage Sci, 2004, 50(12): 1861-1871
- 13 Gooi H B, Mendes D P, Bell K R W, et al. Optimal scheduling of spinning reserve. IEEE Trans Power Syst, 1999, 14(4): 1485-1490
- 14 高云龙, 高峰, 翟桥柱, 等. 大型用电企业关口平衡问题研究. 中国电机工程学报, 2009, 29(19): 70-77
- 15 高云龙, 潘金艳, 吉国力, 等. 基于 Boosting 梯度下降理论的时间序列建模方法. 中国科学: 技术科学, 2011, 41(7): 929-943
- 16 Wang C J, Encinas N, Galiana F D. Demand-side reserve offers in joint energy/reserve electricity markets. IEEE Trans Power Syst, 2003, 18(4): 1300-1306
- 17 Yamin D H Y. Spinning reserve uncertainty in day-ahead competitive electricity markets for GENCO's. IEEE Trans Power Syst, 2005, 20(1): 521-523
- 18 葛炬, 王飞, 张粒子. 含风电场电力系统旋转备用获取模型. 电力系统自动化, 2010, 36(6): 32-36
- 19 孟祥星, 韩学山. 不确定性因素引起备用的探讨. 电网技术, 2005, 29(1): 30-34
- 20 谭伦农, 张保会. 市场环境下的事故备用容量. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 54-58
- 21 李文沅, 周家启, 颜伟, 等. 基于可靠性的电力系统设备备用规划方法. 中国电机工程学报, 2006, 26(15): 7-11
- 22 何永秀, 黄文杰, 谭忠富, 等. 电力备用市场化运营需求研究. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 46-50
- 23 余贻鑫, 李鹏. 大区电网弱互联对互联系统阻尼和动态稳定性的影响. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 6-11