

数据挖掘方法在实时厂级负荷优化分配中的应用

曾德良, 杨婷婷, 程晓, 刘吉臻

(华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京市 昌平区 102206)

Application of Data Mining Method in Real-time Optimal Load Dispatching of Power Plant

ZENG De-liang, YANG Ting-ting, CHENG Xiao, LIU Ji-zhen

(School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, Changping District, China)

ABSTRACT: A solution to real-time optimal load dispatching problem of power plant was introduced in this paper. Based on analysis of operating data, it was proved that the characteristics curve of unit coal consumption rate (CCR) against load are constructed by discrete points and it can't be fit by linear regression. In the default condition of accurate thermodynamic calculation, factors impacting unit CCR for power supply are studied. Multi-factors weight distribution method based on information entropy was employed to predict CCR for power supply at different operating points based on history and real-time data. Thus, discrete mathematical model between load and CCR was build up for each unit. Based on the proposed speediness and economy constraints, global optimal solution for optimal load dispatching was approached by dynamic programming method. The method proposed in this paper was applied in Panshan power plant of China Datang Corporation and it was proved to be practical and effective.

KEY WORDS: optimal load dispatching problem of power plant; data mining; coal consumption rate for power supply; dynamic programming method; global optimization

摘要: 介绍一种解决实时厂级负荷优化分配问题的方法。通过大量的分析现场数据,认为机组煤耗特性曲线不能进行回归和拟合,而是一些离散点连接而成的曲线。在默认热力学计算准确的条件下,分析了影响机组供电煤耗率的因素,研究了基于信息熵的多因素权重分配方法,结合海量历史数据相对准确地预测出各个工作点下的供电煤耗率,从而建立负荷与供电煤耗率之间的实时离散模型,采用动态规划法求得快速性和经济性约束条件下的全局最优解。该方法在大唐国际盘山电厂得到实际验证,结果证明该方法准确、实用。

基金项目: 国家 863 高技术基金项目(2007AA041105, 2007AA04Z163)。

The National High Technology Research and Development of China 863 Program (2007AA041105, 2007AA04Z163).

关键词: 厂级负荷优化分配; 数据挖掘; 供电煤耗率; 动态规划法; 全局最优解

0 引言

电力系统的深入改革,厂网分开,竞价上网,以及煤的价格持续上涨迫使电厂提高运行的经济性。负荷优化分配技术在不对电厂硬件设施进行改造的前提下,仅需对中调的针对各个单元机组的负荷指令重新分配,就能有效提高电厂运行的经济性^[1]。

求解负荷优化分配问题的基础是机组煤耗特性曲线。目前,机组负荷优化分配问题的传统求解方法有等微增率法、混合整数规划法、拉格朗日松弛法^[2-3]。这些传统方法多是建立在机组煤耗特性曲线能用多项式拟合的前提下,一般使用如下 2 次多项式描述机组煤耗特性:

$$F_i = a_{0[i]} + a_{1[i]} \times p_i + a_{2[i]} \times p_i^2, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

式中: n 为电厂参与负荷分配机组总台数; p_i 为第 i 台机组负荷指令; F_i 为第 i 台机组运行煤耗量; a_0, a_1, a_2 为煤耗特性函数系数^[4-5]。

此 2 次多项式是由典型负荷点下的负荷和供电煤耗量数据经最小二乘法拟合而成。供电煤耗量数据一般由机组制造厂家提供或定期热力试验获得。

随着计算机技术和优化理论的发展,动态规划法^[4-6]、人工神经网络^[7-8]、遗传算法^[9-11]、粒子群算法^[12-14]等智能算法被应用到机组负荷优化分配问题中,这些方法对煤耗特性函数的形式无特殊要求,但是它们仍沿用了式(1)所示的 2 次函数。

根据对机组运行特性和海量历史数据的分析,认为这种计算特性函数的方法存在诸多问题:

1) 引用的不同负荷点下的供电煤耗量数据通常来自于机组设计数据。当机组长期运行后,由于设备变化(改造、老化等)、外部环境异动(煤质,环

境温度)以及运行水平的升降,机组的煤耗特性曲线会严重偏离设计曲线。

2) 引用的不同负荷点的数据通常处于典型工况。由于电厂经常面对诸如环保约束变化、自动化发电控制(automatic generation control, AGC)约束变化等情况,典型工况不一定是其常见的运行工况,这也会降低煤耗特性曲线的准确性。

3) 通过对海量历史数据的统计分析,可以得到煤耗特性的统计学意义上的分布规律,但这些一般是定性的结论。试验证明,多次用简单的最小二乘法来拟合不同的数据段得到的机组煤耗特性曲线缺乏一致性,因此是不科学的。

图1为某电厂3#机组在稳定工况下实际采集一段时间的负荷和供电煤耗率的数据。可以看出,即使在同一负荷下,由于机组运行工况和外界条件的变化,机组的煤耗率也是离散分布在较大的区间内,因此,要通过回归、拟合等方法获得解析的煤耗特性曲线几乎是不可能的。

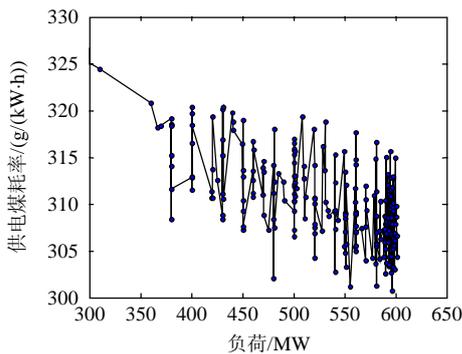


图1 3#机组负荷煤耗图
Fig. 1 Statistics data of unit load and coal consumption rate of unit 3

如何获得科学准确的实时供电煤耗特性是负荷优化分配亟待解决的问题。本文利用电厂中积累的海量数据,将数据挖掘方法引入到煤耗特性函数的求取中,利用基于信息熵的多因素权重分配方法来求取影响煤耗率的各因素权重,进而预测出当前值班时以及其它条件下不同负荷点的煤耗率,建立负荷与煤耗率之间的实时离散函数模型。本文详细讨论了算法的具体实现,并提出了快速性和经济性约束条件,结合动态规划法实现了机组实时的负荷优化分配。

1 数据挖掘方法

1.1 基于信息熵的多因素权重分配方法

模糊聚类方法在处理事务相关信息时没有任何事例信息的损失,基于信息熵的粗糙集理论^[15-16]

在进行数据处理时无需提供数据之外的先验信息并且能够提供各因素的重要性大小,本文将这2种方法结合起来进行多因素问题的研究^[17-19]。基于信息熵的多因素权重分配方法如下。

1) 确定需要处理的样本对象,抽取因素数据。设有待处理的 n 个样本组成的集合为

$$\mathbf{X} = \{\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \mathbf{X}_3, \dots, \mathbf{X}_n\} \quad (2)$$

每个样本用 m 个指标特征值向量表示

$$\mathbf{X}_i = \{x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}, \dots, x_{mi}\} \quad (3)$$

则可用 $m \times n$ 阶特征值矩阵表示

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

对需要处理的样本对象进行聚类。

2) 建立模糊相似关系。矩阵中的各特征值首先进行归一化,然后采用最大最小法建立模糊相似矩阵 $\mathbf{R}_{n \times n}$, 方法如下:

$$R_{ij} = \sum_{k=1}^m x_{ik} \wedge x_{jk} / \sum_{k=1}^m x_{ik} \vee x_{jk} \quad (5)$$

3) 利用模糊等价闭包法求出模糊等价矩阵,然后根据模糊等价矩阵确定分类数目。分2步完成:

① 首先根据模糊等价矩阵确定 p 个适当的阈值范围,记为 $\alpha_i, i=1,2,\dots,p$; 在各阈值范围内进行分类,记录采用不同的阈值范围时各类中所包含的元组的名称及个数,记为 $C_i, i=1,2,\dots,p$ 。

② 从全部属性中依次删除各个属性后再进行步骤2)、3),在此重复的步骤中,仍然按①中所确定的阈值范围进行分类。将删除第 j 个属性后所得的各分类中所包含的元组的名称及个数记录为 $C'_{ji}, i=1,2,\dots,p, j=1,2,\dots,m$, 将以此考察各属性对分类的影响。

4) 确定系统的初始信息熵,然后根据条件熵的定义确定删除各因素后在各个置信水平时的互信息量的大小 $I_{\alpha_i}(C_i; C'_{ji})$ 。由互信息量的含义可知,删除某一因素后从初始分类中所获得的信息量的大小与被删除的因素所含信息量的大小呈相反关系,因此可用删除某一因素后的分类与初始分类的互信息量的倒数来表示因素所含信息量相对大小。结合3),将在不同的置信水平上的互信息量加权处理用来表示因素所含信息量,可用下式表示:

$$M_j = \sum_{i=1}^p \alpha_i \frac{1}{I_{\alpha_i}(C_i; C'_{ji})} \quad (6)$$

5) 利用各因素所含信息量的相对大小进行归一化来进行权重分配，权重的分配公式为

$$w_j = M_j / \sum_{j=1}^m M_j \quad (7)$$

1.2 加权一次移动平均预测

参与预测的变量 $x_i(i=1,2,\dots,n)$ ，各个变量的权重 $k_i(i=1,2,\dots,n)$ ，将参与预测的数据按照在预测中的作用不同分配不同的权重，进行一次移动平均预测，预测值记为 \hat{x}_{n+1} ，计算公式如下：

$$\hat{x}_{n+1} = \frac{k_1 x_1 + k_2 x_2 + \dots + k_n x_n}{k_1 + k_2 + \dots + k_n} = \sum_{i=1}^n k_i x_i / (\sum_{i=1}^n k_i) \quad (8)$$

2 机组负荷优化分配的数学模型

2.1 建立数据仓库

在预设定的时间内，机组主要运行参数均稳定在一定范围内，认为机组处于稳定状态。只有在机组处于稳定状态下采集到的数据对负荷优化分配才有实际意义。

机组运行工作点按负荷段划分，为了更好的体现机组特性，工作点越多越好，但工作点太多，势必带来计算量大的问题；计算量同时与整个电厂机组的数量有关，当前电厂的机组数量一般都不大，因此可以将工作点步距取为 1% 额定负荷或 1 MW。

在分析热力计算过程和负荷优化分配过程后，得到影响机组供电煤耗率大小的主要因素：锅炉效率、发电负荷、辅机耗电量、班组值信息、循环水流量、循环水温度、主汽温度、压力、流量、再热蒸汽温度、压力、流量和抽汽流量等。

从历史数据中分别采集不同工作点下的上述数据和由热力计算得到的供电煤耗率数据，经过数据预处理后，保存到数据库中，建立一个简单的数据仓库^[20]。

2.2 实时供电煤耗率加权移动平均预测

在某一个负荷工作点下，影响供电煤耗率的因素有：辅机耗电量、循环水温度、流量、主蒸汽压力、流量、再热蒸汽压力、流量以及运行人员的操作和设备老化等。设备老化的影响无法衡量，但其可以在实际热力学计算供电煤耗率中体现出来。假设电厂有 5 个值，班组值信息分一值，二值，三值，四值，五值。如果是当前值值班，那么该值信息为 1，否则值信息为 0。

首先，按照时间的先后顺序，从数据仓库中提取在某一个负荷工作点下的 n 个最新的供电煤耗率及其 12 个影响因素构成的一组数据：

供电煤耗率 L : $l_1, l_2, l_3, \dots, l_n$

一值值班 A : $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$

二值值班 B : $b_1, b_2, b_3, \dots, b_n$

三值值班 C : $c_1, c_2, c_3, \dots, c_n$

四值值班 D : $d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$

五值值班 E : $e_1, e_2, e_3, \dots, e_n$

辅机耗电量 F : $f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$

循环水温度 G : $g_1, g_2, g_3, \dots, g_n$

⋮

再热蒸汽压力 K : $k_1, k_2, k_3, \dots, k_n$

再热蒸汽流量 M : $m_1, m_2, m_3, \dots, m_n$

然后应用 1.1 节介绍的多因素权重分配方法，计算出在该工作点下，影响供电煤耗率的 12 个因素的权重，分别为： w_1, w_2, \dots, w_n ，其中 w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 分别表示电厂 5 个值对供电煤耗率的影响权重，将机组方面因素对供电煤耗的影响归为一类，权重用 w_0 表示，计算公式为

$$w_0 = 1 - w_1 - w_2 - w_3 - w_4 - w_5 \quad (9)$$

当全厂的负荷指令还没有分配到机组的时候，机组的各个运行参数都是未知，只有值信息是已知。本文以当前值信息为关键因素，采用当前值和机组方面因素对工作点的供电煤耗率的影响权重作为加权一次移动平均预测公式中的权值，以 n 个供电煤耗率作为式(8)中的预测变量。假设当前值班的为第 i 值($i=1,2,\dots,5$)，第 i 值的权重为 w_i ，则预测的供电煤耗率 L 为

$$L = \begin{bmatrix} w_0 \\ \vdots \\ w_i \\ \vdots \\ w_0 \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \end{bmatrix} \cdot l \cdot \left\{ \begin{bmatrix} w_0 \\ \vdots \\ w_i \\ \vdots \\ w_0 \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \right\}^{-1} \quad (10)$$

式中：
$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \dots & a_n \\ b_1 & b_2 & \dots & b_n \\ c_1 & c_2 & \dots & c_n \\ d_1 & d_2 & \dots & d_n \\ e_1 & e_2 & \dots & e_n \end{bmatrix}; \quad l = [l_1 \ l_2 \ \dots \ l_n]^T;$$

$[w_0 \ \dots \ w_i \ \dots \ w_0]$ 的构成方法为，若当前为第 i 值值班，则此向量中第 i 个元素为 w_i ，其它元素为 w_0 。

2.3 建立负荷与供电煤耗率之间离散模型

当中调负荷指令下达后，对机组的每一个负荷工作点，根据已知的机组值信息，按 2.2 节介绍的方法预测出当前值值班时每个工作点下的供电煤耗率 L ，从而得到负荷和供电煤耗率关联的一组数据：

$$(p_1, L_1), (p_2, L_2), \dots, (p_m, L_m)$$

其中, m 为工作点个数; p_i 为负荷。这组数据就构成当前时刻负荷和供电煤耗率之间的实时离散模型:

$$L = f(p_i), \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

2.4 负荷优化分配的约束条件

2.4.1 快速性约束条件

为了使整个电厂快速完成电网负荷要求, 对某台机组所分配的负荷应该与其响应负荷变化的能力成正比, 因此需寻找满足下式的总煤耗最低的分配方案:

$$\frac{P_i}{P_{i-1}} \geq \frac{V_i}{V_{i-1}} \quad (12)$$

式中: P_i 为第 i 台机组分配的负荷; V_i 为第 i 台机组实际可以达到的变负荷速率, $V_i \geq V_{i-1}$ 。

若没有满足上述条件的负荷分配方案, 则记录分配方案煤耗最低的前 k 名, 按照下式查找负荷分配方案:

$$\Delta = \max_{j=1}^k \left(\sum_{i=2}^n \Delta_i \right) \quad (13)$$

式中: $\Delta_i = \frac{P_i}{P_{i-1}} - \frac{V_i}{V_{i-1}}$; n 为机组台数。

2.4.2 经济性约束条件

1) 全厂负荷优化分配采用轮流调节的方法, 以投入最少机组来完成负荷调节任务为原则, 最大程度地减少机组变负荷的频度。根据全厂总负荷与总负荷指令的差值是否大于 $5k$ MW, 确定需要变负荷的机组最大台数 k 。

2) 在选择机组加、减负荷时, 首先判断各机组负荷短时间内的变化趋势(上升、下降、无变化), 避免机组在短时间内反向变负荷, 即机组完成一次加负荷任务后, 让其稳定运行一段时间后再承担减负荷任务, 减少机组热负荷波动产生的疲劳损耗。

3 寻优算法

负荷和供电煤耗率之间的实时离散模型即机组的煤耗特性, 在此基础上, 本文采用动态规划算法来实现负荷优化分配。在算法实现之前, 首先要考虑 2.4.2 节提出的经济性约束条件, 即根据投入最少机组的原则和机组变负荷趋势情况来确定参与负荷优化分配的机组台数 n 。

算法实现过程中, 采用离散造表法来求解。计算分为 2 步: 顺序造表, 逆序分配。

首先, 将负荷优化分配过程根据机组台数划分为 n 个阶段; 第 i 阶段的状态变量为 X_i , 代表前 i

台机组的负荷; 第 i 阶段的决策变量为 P_i , 代表第 i 台机组的负荷, $P_{i\min}$ 、 $P_{i\max}$ 分别代表第 i 台机组的负荷上下限值; 最优值函数 $F_i(X_i)$ 代表前 i 台机组总负荷为 X_i 时的平均煤耗率, 因此动态规划求解负荷优化过程分析如下。

1) 顺序造表

① 第 1 步

$$F_1(X_1) = f_1(P_1) \quad (14)$$

式中 $P_{1\min} \leq P_1 \leq P_{1\max}$ 。 X_1 以一定的步长遍历其取值区间 $[P_{1\min}, P_{1\max}]$, 同时记录相关数据。

② 第 2 步

$$F_2(X_2) = \min_{P_2} \frac{(X_2 - P_2)F_1(X_2 - P_2) + P_2 f_2(P_2)}{X_2} \quad (15)$$

式中: $\sum_{i=1}^2 P_{i\min} \leq X_2 \leq \sum_{i=1}^2 P_{i\max}$; $P_{2\min} \leq P_2 \leq P_{2\max}$ 。

X_2 以一定的步长遍历其取值区间, 联合第一阶段的计算结果, 计算 P_2 所对应的 $F_2(X_2)$ 的最优值, 同时记录相关数据。

③ 中间步

$$F_j(X_j) = \min_{P_j} \frac{(X_j - P_j)F_{j-1}(X_j - P_j) + P_j f_j(P_j)}{X_j} \quad (16)$$

式中: $\sum_{i=1}^j P_{i\min} \leq X_j \leq \sum_{i=1}^j P_{i\max}$; $P_{j\min} \leq P_j \leq P_{j\max}$ 。

X_j 以一定的步长遍历其取值区间, 联合前一阶段的计算结果, 计算 P_j 所对应的 $F_j(X_j)$ 的最优值, 同时记录相关数据。

以此类推, 一直计算到第 n 步, 结合第 $n-1$ 步的计算结果, 计算 $X_n = P_{\text{total}}$ 时, 不同 P_n 取值所对应 $F_n(X_n)$ 的值, 最后求出最优值。

2) 逆序查表

对应全厂总负荷为 P_{total} 时, 在第 n 阶段可以直接从表中查出第 n 台机组所应承担的优化负荷 P_n ; 在第 $n-1$ 阶段, 查询对应总负荷为 $X_{n-1} = P_{\text{total}} - P_n$ 的优化负荷 P_{n-1} ; 根据状态转移方程 $X_i = X_{i+1} - P_{i+1}$ 依此类推, 即可确定 n 个阶段下的最优负荷优化分配结果 $\{P_n, P_{n-1}, \dots, P_2, P_1\}$ 。

得到以上分配结果后, 验证其是否满足 2.4.1 节提出的快速性约束条件(如式(12)所示), 即机组分配到的负荷与其负荷响应能力相匹配。若满足, 那么得到的结果即最优的负荷分配结果; 反之, 取第 n 阶段表中的次优解对应的一组分配结果, 再次进行验证, 依此类推; 若煤耗率最低的前 5 个分配方案均不满足式(12), 则取 $k=5$, 求取满足式(13)的最

优分配方案。

通过以上方法，得到同时满足快速性约束条件和经济性约束条件的负荷优化分配全局最优解。

4 应用实例

将本文所述负荷优化分配方法应用到大唐国际盘山电厂中，该厂 3 号机和 4 号机功率均为 300~600 MW，变负荷速率均为 15 MW/min，工作点步距取为 1 MW。

负荷优化分配软件运行在厂级监控信息系统 (supervisory information system in plant level, SIS) 的计算站中。计算软件从实时/历史数据库中获取 2 台机组的实时及历史数据，计算结果回写入数据库，并通过数据发布平台展示。计算软件具有 3 个手/自动站，分别为厂级负荷优化分配主站、3#机组负荷站和 4#机组负荷站。

由于当前的实际情况，中调的厂级指令没有下达到全厂，因此全厂负荷指令通常为各机组 AGC 指令之和。另外，多种因素也导致负荷优化分配系统无法投入闭环控制，所以无法计算负荷优化分配系统投入给电厂带来的经济效益。

但是，可以对比按实际 AGC 指令运行时的全厂平均煤耗率和经负荷优化分配之后计算的全厂平均煤耗率，对比结果如表 1 所示。由表 1 可以看出，经负荷优化分配后，全厂平均煤耗率明显降低，方法的有效性得以验证。

表 1 实际运行煤耗率和优化运行煤耗率对比
Tab. 1 Comparison between actual and optimal coal consumption rate

负荷指令/MW	实际指令/MW		优化指令/MW		实际煤耗率/(g/(kW·h))	优化煤耗率/(g/(kW·h))
	3#	4#	3#	4#		
902	450	452	372	530	314.49	313.02
614	310	304	300	314	328.16	324.73
768	375	393	372	396	318.87	317.38
850	424	426	400	450	317.25	314.97

5 结论

准确的煤耗特性函数是解决负荷优化分配问题的前提和基础。由于集散控制系统 (distributed control system, DCS) 和 SIS 的推广，电厂中已积累了大量的历史运行数据。本文基于海量数据，通过模糊聚类、粗糙集理论等数据挖掘方法建立负荷和供电煤耗率之间的离散模型，预测出当前的机组煤耗特性。采用动态规划寻优方法获得满足多约束条件的负荷分配的全局最优解。离散模型实时修正，

实现了负荷优化分配实时性。本文解决了现阶段负荷优化分配对解析 2 次函数的依赖问题，成功实现了优化分配在现场的应用，且作为一个应用模块在火电厂得到推广。

参考文献

- [1] 沈炯, 金林, 陈来九. 火电单元机组负荷最优预见控制系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(3): 14-17.
Shen Jiong, Jin Lin, Chen Laijiu. Simulating study on load preview control system of a thermal power unit[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(3): 13-17(in Chinese).
- [2] 周新利. 基于 SIS 平台的火电厂厂级在线负荷优化分配系统[D]. 保定: 华北电力大学, 2008.
Zhou Xinli. The thermal power plant on-line load optimal dispatch system based on SIS[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2008(in Chinese).
- [3] Guan X, Luh P B, Zhang L. Nonlinear approximation method in lagrangian relaxation-based algorithm for hydrothermal scheduling [J]. IEEE Trans. on Power Conversion, 1995, 10(2): 245-252.
- [4] 王治国, 刘吉臻, 谭文, 等. 基于快速性与经济性多目标优化的火电厂厂级负荷分配研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 86-92.
Wang Zhiguo, Liu Jizhen, Tan Wen, et al. Multi-objective optimal load distribution based on speediness and economy in power plants [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19): 86-92(in Chinese).
- [5] 张晓玲. 电厂负荷优化分配方法及其在 SIS 中的实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
Zhang Xiaoling. Economic dispatch research and its application in SIS[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004(in Chinese).
- [6] Snyder W L, Powell H D, Rayburn J C. Dynamic programming approach to unit commitment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1987, 2(2): 239-350.
- [7] Lee K W Y, Yome A S, Park J H. Adaptive Hopfield neural network for economic load dispatch[J]. IEEE Transactions on Power System, 1998, 13(2): 519-526.
- [8] 万文军, 周克毅, 胥建群, 等. 动态系统实现火电厂机组负荷优化分配[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(2): 125-129.
Wan Wenjun, Zhou Keyi, Xu Jianqun, et al. Dynamic system on economic dispatch among thermal power units[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(2): 126-129(in Chinese).
- [9] 左浩, 陈昆薇, 洪潮, 等. 机组负荷最优分配的改进遗传算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2001, 13(2): 16-19.
Zuo Hao, Chen Kunwei, Hong Chao, et al. A refined genetic algorithm to optimize of the unit commitment[J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities, 2001, 13(2): 16-19(in Chinese).
- [10] 倪敏, 陈彦桥, 刘吉臻, 等. 基于遗传算法的火电机组负荷优化分配方法研究[J]. 华北电力大学学报, 2006, 33(5): 64-67.
Ni Min, Chen Yanqiao, Liu Jizhen, et al. Study on load optimal dispatching method for fossil-fired units based on genetic agorithm [J]. Journal of North China Electric Power University, 2006, 33(5): 64-67(in Chinese).
- [11] Swarup K S, Yamashiro S. A genetic algorithm approach to generator unit commitment[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2003, 25(9): 679-687.

- [12] 王友, 马晓茜, 刘翱. 自动发电控制下的火电厂厂级负荷优化分配[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(14): 103-107.
Wang You, Ma Xiaoqian, Liu Ao. Study on plant-level optimal load distribution based on automatic generation control[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(14): 103-107(in Chinese).
- [13] 王治国, 刘吉臻, 谭文, 等. 基于改进 PSO 算法的快速性厂级负荷优化分配研究[J]. 华北电力大学学报, 2006, 33(5): 19-24.
Wang Zhiguo, Liu Jizhen, Tan Wen, et al. Optimal load distribution for speediness in power plants based on modified PSO[J]. Journal of North China Electric Power University, 2006, 33(5): 19-24(in Chinese).
- [14] 侯云鹤, 鲁丽娟, 熊信良, 等. 改进粒子群算法及其在电力系统经济负荷分配中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 95-100.
Hou Yunhe, Lu Lijuan, Xiong Xinyin, et al. Enhanced particle swarm optimization algorithm and its application on economic dispatch of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 95-100(in Chinese).
- [15] Intan R, Mukaidono M. Generalization of rough sets and its applications in information system[J]. Intelligent Data Analysis, 2002, 6(4): 323-339.
- [16] 丁守祯, 桑琳, 朱全英, 等. 基于信息熵的粗糙集属性约简及其应用[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(35): 245-248.
Ding Shouzhen, Sang Lin, Zhu Quanying, et al. Attribute reduction in rough set based on information entropy and its application [J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(35): 245-248(in Chinese).
- [17] 黄定轩. 基于客观信息熵的多因素权重分配方法[J]. 系统工程理论方法应用, 2002, 12(4): 321-324.
Huang Dingxuan. Means of weights allocation with multi-factors based on impersonal message entropy[J]. Systems Engineering Theory Methodology Applications, 2002, 12(4): 322-324(in Chinese).
- [18] Hu Qinghua, Yu Daren, Xie Zongxia, et al. Fuzzy probabilistic approximation spaces and their information measures[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2006, 14(2): 191-201.
- [19] Hu Qinghua, Yu Daren, Xie Zongxia. Information-preserving hybrid data reduction based on fuzzy-rough techniques[J]. Pattern Recognition Letters, 2006, 27(5): 414-423.
- [20] 康晓东. 基于数据仓库的数据挖掘技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 90-112.
Kang Xiaodong. Data mining technology based on data warehouse[M]. Beijing: China Machine Press, 2003: 90-112(in Chinese).



曾德良

收稿日期: 2009-11-15。

作者简介:

曾德良(1969—), 男, 副教授, 研究方向为大机组建模与控制、电厂监控信息系统等, zdl@ncepu.edu.cn;

杨婷婷(1981—), 女, 博士研究生, 研究方向为火电机组智能优化控制、运行优化;

程晓(1978—), 男, 博士研究生, 研究方向为火电厂负荷优化、电厂实时管理系统;

刘吉臻(1951—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为火电机组非线性建模与控制、大机组智能优化控制、电厂信息监控系统等。

(编辑 李婧妍)