

基于优先级排序和内点法的机组优化组合

王 剑, 刘天琪, 刘学平

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 机组优化组合的目标是确定电力系统煤耗量和网损最小的发电调度方式。优化模型中考虑了机组爬坡率的限制、输电网络断面安全约束, 针对寻优效率提出了一种优先级排序和内点法相结合的机组组合优化方法。按能耗指标形成机组优先级排序表, 以获得尽可能好的开机方式初始值; 用局部寻优法在初始值附近的可行域内寻求最优组合状态; 对负荷分配的连续性子问题用内点法求解。通过对 IEEE-39 节点 10 机系统进行仿真计算, 验证了所提方法收敛速度快、耗时少, 对处理机组组合问题具有有效性和适用性。

关键词: 机组组合; 优先级表; 内点法; 负荷分配

Unit commitment optimization based on priority list and interior point methods

WANG Jian, LIU Tian-qi, LIU Xue-ping

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The purpose of unit commitment optimization is determining the way that units operate for minimizing the fuel costs and network losses of power system. Considering the ramp rate constraints of the units and the power security constraints in network cross section, hybrid priority list and interior point method is presented. Based on the index of energy consumption, the priority list can be attained, according to which the units' initial state was formed. Local search method is used to search the optimum solution in the the feasible area. Interior point method is used to solve the sub-problem of load dispatching. The method proposed is fast converging, consuming less time, and efficient and applicable to solve the unit commitment problem, which is testified by simulated results of IEEE-39 nodes and 10 units system.

Key words: unit commitment; priority list; interior point method; load dispatch

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)13-0055-06

0 引言

动态经济调度是考虑系统负荷各个时段之间的联系, 计入机组出力的一些技术约束的一种优化调度方法, 是一个动态机组组合问题, 对提高系统经济性和安全性有着重要的意义。近年来, 国家实施节能调度政策^[1], 对于火电机组, 煤耗低的多发、满发, 煤耗高的机组少发、不发, 这可能会导致断面潮流越限^[2], 网络安全制约是必须考虑的问题。

传统经济调度涉及机组启停决策和负荷优化分配, 目前研究工作正在朝着考虑多种约束条件、大规模电网、快速收敛的算法和更好的优化结果方向发展。文献[3-5]分别考虑了机组爬坡速率约束、旋转备用约束、网络断面潮流约束。在算法方面, 文献[6]提出具有状态约束的动态系统优化调度方法, 但计及网络的动态优化调度问题尚需进一步研究。

文献[7]中提出了一种动态经济调度的快速解耦算法。近年来, 智能优化算法引入到电力系统中, 如遗传算法、模拟退火算法、禁忌搜索算法、粒子群算法、蚁群算法、人工神经网络等^[8], 这类算法不要求严格的数学模型, 寻优过程本质是随机的, 迭代次数较多, 计算速度慢, 并且优化结果受初值及寻优规则的影响, 算法本质是启发式的, 缺乏刚性^[9-10]。内点法对于处理含有大量等式和不等式约束的大规模非线性问题, 相比启发式算法, 有计算速度快的优势^[11-13]。

文献[14]提出了考虑负荷变化的经济调度方法。文献[15]根据经济调度中等微增率原理, 提出了节能调度的最优次序法。优先级表法^[16-17]的特点是算法简单、速度快, 为克服其易丢失最优解而出现了一些改进算法。文献[17]提出拉格朗日松弛和逆序排序法解决机组组合问题。

根据排序原则进行机组排序, 构成优先投入顺序表^[16-18], 随负荷需求动态地决策机组的启停。采用局部寻优方法在初始值邻域内寻优, 每一种组合状态对应一个连续子问题, 用内点法进行负荷分配。由于优先顺序法和内点法计算速度快, 本文将两者结合的方法用于求解动态机组组合问题。通过 IEEE-39 节点 10 机系统算例分析验证了该算法的有效性。

1 机组组合的数学模型

1.1 目标函数

机组组合数学模型中目标函数为系统机组运行煤耗和启停煤耗最小。

$$\min. \sum_{i \in T} \sum_{i \in N} [u_{it} F(P_{Git}) + u_{i(t-1)} S_i] \quad (1)$$

式中: T 为系统调度期间的时段数; N 表示系统的机组数; P_{Git} 为机组 i 在 t 时段的有功功率; $F_i(P_{Git})$ 表示机组的煤耗函数, 一般表示为发电机出力有功功率的二次函数: $F_i(P_{Git}) = a_i P_{Git}^2 + b_i P_{Git} + c_i$, 式中 a_i , b_i , c_i 为第 i 台发电机的耗量特性参数。 S_i 表示发电机组的启停煤耗, 表示为: $S_i = S_{0,i} + S_{1,i}(1 - e^{-T_{it}^{\text{off}}/\tau_i})$, $S_{0,i}$ 、 $S_{1,i}$ 和 τ_i 为机组 i 的启动耗量特性参数; T_{it}^{off} 为机组 i 在时段 t 的已停机时间。

1.2 系统约束条件

系统约束包括负荷平衡约束, 旋转备用约束, 断面潮流约束等, 可表示如下:

$$\sum_{i=1}^N P_{Gi}(t) = P_{LD}(t) + P_{\text{loss}}(t) \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N R_i(t) \geq p_r(t) \quad (3)$$

$$P_{L\min} \leq P_{Li} \leq P_{L\max} \quad (4)$$

式中: $P_{LD}(t)$ 为系统时段 t 的系统总负荷需求; $P_{\text{loss}}(t)$ 为系统在 t 时段的网络损耗; $R_i(t)$ 为机组 i 在 t 时段提供的旋转备用; $p_r(t)$ 为系统在时段 t 的旋转备用需求; P_{Li} 为系统网络断面的有功功率; $P_{L\min}$ 和 $P_{L\max}$ 分别为断面允许的最大、最小功率。

1.3 单机组约束条件

单机组约束包括机组出力的上下限约束, 机组爬坡率约束, 机组最小启停时间约束等。

$$P_{G\min} \leq P_{Gi} \leq P_{G\max} \quad (5)$$

$$-r_i \leq P_i(t) - P_i(t-1) \leq r_i \quad (6)$$

$$T_{it}^{\text{on}} \geq T_{i\min}^{\text{on}}, T_{it}^{\text{off}} \geq T_{i\min}^{\text{off}} \quad (7)$$

式中: $P_{G\min}$ 、 $P_{G\max}$ 分别表示机组 i 输出功率的上、下限; r_i 为机组 i 允许增减负荷的最大值; $T_{i\min}^{\text{on}}$ 、 $T_{i\min}^{\text{off}}$ 表示机组最小开、停机时间。

2 机组组合问题的求解方法

2.1 机组排序及形成初始可行解

衡量机组煤耗的指标很多, 根据不同的机组和负荷特点可选定不同的参数指标, 其目的都是在满足一定的约束条件下, 按该指标顺序投切机组, 使一次能源消耗最小。结合煤耗的最小比耗量, 本文采用 $\lambda_i = \frac{\mu_{\min}}{P_{\max}}$ 作为排序指标^[18]。

在实时调度中, 根据短期负荷预测得到的功率偏差 ΔP 确定上调、下调调度方式, 按机组序位表, 在上调调度中, 找出排序最前的机组上调; 下调调度中, 找出排序最后的机组下调。动态调度的本质在于已知 $t_0 - 1$ 时段机组输出功率的情况下确定当前时段 t_0 机组的输出功率。

文献[15]中提出的小步长最优次序法只能处理机组开机状态已确定的负荷分配问题, 本文在此基础上做了改进, 使得排序法能处理爬坡率约束和最大出力约束的同时, 也能决策机组的启停。为了简便, 只说明上调调度的情况。

设有 i 台机组, 按 λ_i 从小到大排序后, 根据机组序号依次叠加调节小步长 (取机组 i 的爬坡率 δ_i), $\Delta P_i = \Delta P_i + \delta_i$ 。若迭代次数 $n > i$ 时, 仍不满足 $\Delta P_i > \Delta P$, 说明系统中已确定开机的机组没有足够可发电容量满足不平衡功率, 需按机组顺序将第 $i+1$ 台机组开机以满足负荷平衡。

当 $P_{G(i+1)\min} > \Delta P$ 时, $\Delta P'$ 取 $P_{G(i+1)\min} - \Delta P$, 对已开机的 i 台机组进行下调调度, 直到满足负荷平衡为止。以此来决策第 $i+1$ 台机组的启停状态。若 $i+1$ 大于机组数 N , 则不能满足负荷需求。时段 t_0 机组的输出功率作为 $t_0 + 1$ 时段的初值进行下一时刻的计算。最终形成初始可行解。

2.2 组合可行解的修正和局部寻优

在 2.1 节得到的初始机组组合可行解基础上, 考虑每台机组的最小开停机时间, 以及某时段必开或必停机约束, 在其邻域内作修正。机组在没达到最小停机时间时要求启动, 则应把这段时间设为开机。如某台机组最小停机时间为 4 h, 则 2、3、4 时段应设为开机, 或时段 1、5 停机。

表 1 考虑最小停机时间的修正

Tab.1 Correction of unit state

时段	1	2	3	4	5	6
调整前	1	0	0	0	1	0
方案 1	1	1	1	1	1	0
方案 2	0	0	0	0	1	0
方案 3	1	0	0	0	0	0

机组在没达到最小开机时间要求停机时, 与上面方法类似, 在初始解邻域内修正获得组合可行域。与随机寻优算法相比, 大大缩小了搜索空间, 减少了计算量。

传统启发式方法在求解过程中容易丢失最优解。局部寻优法是从一个尽可能好的初始解出发, 在其邻域内搜索寻优, 通过迭代求得最优解或次优解。为此, 将局部寻优法和优先级表法^[16]相结合来求解问题。局部寻优法搜索过程中, 若在邻域内发现比出发点更好的解, 则将出发点替换, 并作为新的出发点进行下一次局部寻优。若在邻域中没有发现比出发点更好的解, 则在局部寻优法中引入跳出局部最优解的跳坑策略^[18]。跳坑策略即是当搜索陷入局部极小值点时, 在可行域中选择一个可行解作为局部寻优新的出发点。以此形成了一个全局决策过程, 克服了传统优先级表法找不到最优解的缺陷。

2.3 内点法负荷分配

由于内点法收敛速度快, 能处理含有大量等式不等式约束条件, 适合于有较多变量的优化问题。连续子问题中, 将机组的出力作为变量, 网络约束表达成机组输出功率的线性不等式约束形式嵌入到对偶函数中。式 (4) 中的 P_{Li} 表示为机组出力的函数。

$$P_{Li} = f(P_{Gn}) \quad (8)$$

内点法初始点应取在可行域内, 并在可行域的边界设置“障碍”使迭代点接近边界时其目标函数值迅速增大, 从而保证迭代点均为可行域的内点^[11]。原一对偶内点法将不等式约束式 (包括式 (4)) 转化为等式约束, 再把目标函数改造为障碍函数:

$$\min . f(x) - \mu \sum_{i=1}^r \log(l_i) - \mu \sum_{i=1}^r \log(u_i) \quad (9)$$

式中扰动因子 $\mu > 0$ 。只含有等式约束的优化问题可以直接采用拉格朗日乘子法求解, 构造拉格朗日函数为:

$$L = f(x) - y^T h(x) - z^T [g(x) - l - \underline{g}] - w^T [g(x) + u - \bar{g}] - \mu \sum_{i=1}^r \log(l_i) - \mu \sum_{i=1}^r \log(u_i) \quad (10)$$

式中 y, z, w 均为拉格朗日乘子。定义 $Gap = l^T z - u^T w$ 为对偶间隙。可用牛顿—拉夫逊法求解, 其修正方程式如下:

$$J \cdot \Delta X = F(X) \quad (11)$$

由式 (11) 解出修正量 ΔX , 再对变量进行修正, 返回继续迭代, 直到满足一定收敛条件。收敛结果即为某种组合下负荷优化分配。

2.4 算法的求解步骤

优先级排序和内点法相结合的算法解决机组组合问题, 其算法流程如图 1 所示。主要计算步骤如下:

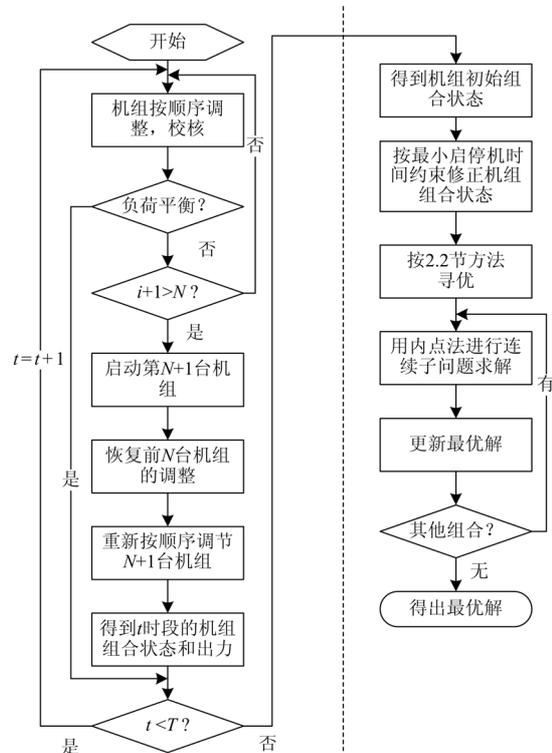


图 1 算法流程图

Fig.1 Flow chart of the improved method

- (1) 计算机组的排序指标, 按 λ_i 值从小到大排序。
- (2) 根据超短期负荷预测的功率偏差量按顺序逐次上调或下调机组出力, 确定直到满足负荷平衡时所需启停的机组状态。每调节一台机组采用直流潮流法检验一次网络断面是否越限, 若有越限的线路则放弃此次调整, 转到下一台机组的调整, 即试探法。

(3) 用上一时段的机组出力作为初值，考虑机组最大最小出力、爬坡率限制下，决策下一时段可行机组组合状态，直到所有时段计算完成。

(4) 按各机组最小开停机时间约束，修正机组启停状态，从而得到一系列可行组合解，形成可行域。

(5) 在某种确定的组合方式下用内点法进行负荷优化分配，线路制约按 2.3 节的直接嵌入法考虑到连续子问题中。

(6) 比较目标函数值，更新最优解。

3 算例仿真

3.1 对 10 机系统结果分析

表 2 10 台机组初始组合方案
Tab.2 Initial state of the 10-units

机组	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1~3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
5	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
8~10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

用 2.2 节的方法修正初始组合方案，去掉那些不满足最小启停时间的组合状态，得出组合解的可行域，如表 3 所示。机组 4 的最小开机时间为 4 h，则对机组 4 的修正方案见表 3。

表 3 对机组 4 的修正
Tab.3 Correction for the 4th unit

机组	1	2	3	4	23	24
4	1	1	1	1	0	0

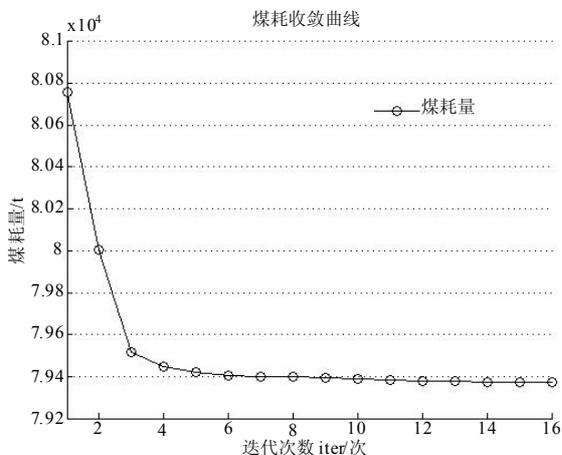


图 2 煤耗的收敛特性曲线
Fig.2 Convergence of the fuel cost

以 IEEE-39 节点系统为例，机组参数取自文献[3]中的 10 机系统。在进行优先顺序排序时，第一时段的初始值取最大和最小功率的平均值，校验潮流越限时只考虑系统中的网络断面（线路 9-39，3-4，16-17）的传输功率。设置内点法最大迭代次数 $k_{max}=50$ ，中心参数 $\sigma \in (0,1]$ ，取 $\sigma=0.1$ ，收敛精度 $\varepsilon=10^{-5}$ 。取 $[l,u]^T > 0$ ， l 中元素在 $g(x)$ 等于边界时取 1， $g(x)$ 不等于边界时取实际值与边界值之差； u 类似。 z 取全 1 向量， w 元素全取 -1。程序用 Matlab 7.0 编写在计算机上运行。

按 2.1 节中的优先顺序法，选取初始值，从煤耗最小的机组开始投入直到满足系统负荷需求，经过 24 个时段的计算，形成如表 2 的初始组合方案。

在可行域内对连续子问题进行内点法寻优，计算各种组合状态下的煤耗量，从而比较选取最优组合状态。

最优组合状态确定下燃煤费用随着迭代次数的增加收敛过程如图 2 所示，最后的煤耗量为 79 369.5 t，而文献[3]采用的拉格朗日松弛法煤耗量为 81 245.5 t。迭代过程中对偶间隙的变化如图 3。内点法收敛速度很快，只需要 16 次就能达到优化结果。

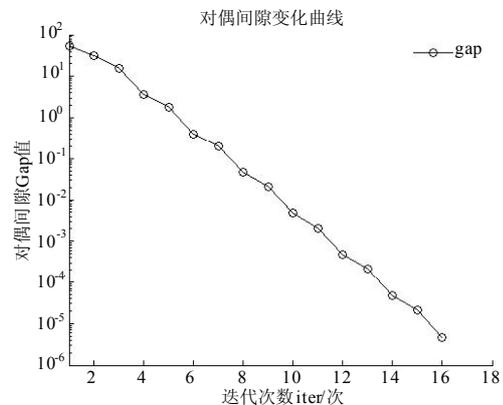


图 3 对偶间隙的变化曲线
Fig.3 Change of the gap with iteration

3.2 网络约束对机组组合的影响

以上是 10 机系统在断面功率没有越限情况下

的仿真结果。断面中的三条线路(9-39, 3-4, 16-17)传输功率分别为 146 MW, 203 MW, 274 MW。现将线路 9-39 最大输电容量限制在 120 MW, 线路 16-17 限制在 260 MW, 运行结果为 80 331.4 t, 煤耗增加 931.9 t。

表明当网络制约作用时, 机组组合结果发生改变, 部分低耗能机组必须减出力甚至停机, 而部分高耗能机组必须增出力或开机以满足负荷平衡, 即出现序位表中靠前的机组减小出力, 靠后的机组增加了出力, 总体上增大了系统的能耗。

3.3 对 20 和 40 机系统结果分析

文献[3]中的 10 机系统数据经过复制, 负荷需求加一倍, 得到 20 机系统。对 20 机系统进行测试, 得到煤耗量为 159 031.5 t, 计算时间为 1.7 s。40 机同理。

表 4 煤耗和时间的比较

Tab.4 Comparison of the fuel cost and time

系统	煤耗/t	计算时间/s
10 机	79 369.5	1.2
20 机	159 031.5	1.7
40 机	317 950.3	2.5

表 4 结果表明内点法收敛速度快, 计算速度高, 随着系统规模变大, 该算法仍能快速得到优化结果。

4 结论

本文提出优先顺序法和内点法相结合的方法, 收敛速度快, 能获得很好的优化结果, 且计算速度明显快于随机搜索算法, 适合动态调度的在线应用。

将局部寻优法及跳坑策略运用到寻优过程中, 弥补了传统优先级表法只能获得次优解的缺点。与局部寻优法相比随机寻优法大大缩小了搜索范围, 提高了计算速度。跳坑策略防止了陷入局部最优。

考虑了网络断面潮流越限, 采用直流潮流模型的试探法决策机组初始启停状态; 在连续子问题中, 线路功率约束作为发电机出力的函数不等式直接嵌入到内点法对偶函数中, 网络制约得到有效处理。

参考文献

[1] 李云, 霍平. 《节能发电调度办法》政策解读[J]. 电力学报, 2008, 23 (3): 215-217.
LI Yun, HUO Ping. The policy interpretation of the energy conservation power generating and distribution code[J]. Journal of Electric Power, 2008, 23 (3): 215-217.

[2] 杨卫红, 郭利杰, 单葆国. 关停小火电机组对“十一五”规划电网的影响分析[J]. 电力技术经济, 2007,

19 (4): 10-13.

YANG Wei-hong, GUO Li-jie, SHAN Bao-guo. Analysis on influence of closing down small thermal power generating units on the power network of the 11th five-year plan[J]. Electric Power Technologic Economics, 2007, 19 (4): 10-13.

- [3] 韩学山, 柳焯. 考虑发电机组输出功率速度限制的最优机组组合[J]. 电网技术, 1994, 18 (6): 11-16.
HAN Xue-shan, LIU Zhuo. Optimal unit commitment including unit ramp rate[J]. Power System Technology, 1994, 18 (6): 11-16.
- [4] 王民量, 张伯明, 夏清. 考虑机组爬坡速率和网络安全的经济调度新算法[J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (5): 14-20.
WANG Min-liang, ZHANG Bo-ming, XIA Qing. A novel economic dispatching algorithm with unit ramp rate and network security constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24 (5): 14-20.
- [5] 张利, 赵建国, 韩学山. 考虑网络安全约束的机组组合新算法[J]. 电网技术, 2006, 30 (21): 50-55.
ZHANG Li, ZHAO Jian-guo, HAN Xue-shan. A new unit commitment algorithm considering network security constraints[J]. Power System Technology, 2006, 30 (21): 50-55.
- [6] 范炜, 管晓宏. 具有状态约束的动态系统优化调度方法及其应用[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(13): 38-42.
FAN Wei, GUAN Xiao-hong. A new method for optimizing dynamic system with state constraints and its application to the generation units scheduling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(13): 38-42.
- [7] 韩学山, 柳焯. 考虑机组爬坡速率和网络安全约束的经济调度解耦算法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (13): 32-37.
HAN Xue-shan, LIU Zhuo. Decoupled economic dispatch including unit ramp rate and network security constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (13): 32-37.
- [8] 陈皓勇, 王锡凡. 机组组合问题的优化方法综述[J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (14): 51-56.
CHEN Hao-yong, WANG Xi-fan. A survey of optimization-based methods for unit commitment[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (14): 51-56.
- [9] Habib R M, Hasan M S, Caro L. A new genetic algorithm with lamarckian individual learning for generation scheduling[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18 (3): 1181-1186.
- [10] Ting T O, Rao M V C, Loo C K. A novel approach for unit commitment problem via an effective hybrid particle

swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21 (1): 411-418.

[11] 赵建国, 韩学山, 程时杰. 网络流和内点法相结合的有功动态优化调度[J]. 电力系统及其自动化, 2003, 27 (23): 22-27.
ZHAO Jian-guo, HAN Xue-shan, CHENG Shi-jie. Optimal active power dispatch combining network flow and interior point methods[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (23): 22-27.

[12] 李秀卿, 罗忠游, 郭芳义. 基于网络流和内点法的电力系统动态经济调度[J]. 继电器, 2006, 34(10): 37-40, 45.
LI Xiu-qing, LUO Zhong-you, GUO Fang-yi. Dynamic economic dispatch combining network flow and interior point approaches[J]. Relay, 2006, 34 (10): 37-40, 45.

[13] 韦化, 李滨, 杭乃善, 等. 基于现代内点非线性规划的大规模水火电力系统最优潮流的理论分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (4): 5-8.
WEI Hua, LI Bin, HANG Nai-shan, et al. An analysis of interior point theory for large-scale hydrothermal optimal power flow problems[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (4): 5-8.

[14] 韩学山, 柳焯. 一种实用的电力系统在线动态经济调度模型[J]. 中国电力, 2002, 35 (9): 28-32.
HAN Xue-shan, LIU Zhuo. A practical model of on-line dynamic economic dispatching in power system[J]. Electric Power, 2002, 35 (9): 28-32.

[15] 王超, 张晓明, 唐茂林, 等. 四川电网节能减排发电实时调度优化模型[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(4): 93-96.

WANG Chao, ZHANG Xiao-ming, TANG Mao-lin, et al. Real-time dispatching optimization model for energy-saving and emission-reduction generation in sichuan grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (4) : 93-96.

[16] Senjyu T, Shimabukuro, Uezato K, et al. A fast technique for unit commitment problem by extended priority list[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18 (2): 822-888.

[17] 杨朋朋, 韩学山. 基于改进拉格朗日乘子修正方法的逆序排序机组组合[J]. 电网技术, 2006, 30 (9): 40-45.
YANG Peng-peng, HAN Xue-shan. Unit commitment based on improved lagrangian multiplier modification method[J]. Power System Technology, 2006, 30 (9): 40-45.

[18] 黎静华, 韦化. 求解机组组合问题的邻域搜索法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (13): 33-40.
LI Jing-hua, WEI Hua. Unit commitment via local search point method[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (13): 33-40.

收稿日期: 2009-08-23; 修回日期: 2009-09-23

作者简介:

王 剑 (1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: sword_king@126.com

刘天琪 (1962-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, IEEE 会员, 研究方向为电力系统分析计算与稳定控制, 高压直流输电和调度自动化;

刘学平 (1985-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制, 分布式发电。

(上接第 54 页 continued from page 54)

[9] 王增平, 刘浩芳, 徐岩, 等. 基于改进型相关法的单相自适应重合闸新判据[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 49-55.
WANG Zeng-ping, LIU Hao-fang, XU Yan, et al. A new criterion for single-phase adaptive automatic reclosure based on improved correlation algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(4): 49-55.

[10] 索南加乐, 孙丹丹, 付伟, 等. 带并联电抗器输电线路单相自动重合闸永久故障的识别原理研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(11): 75-81.
SUONAN Jia-le, SUN Dan-dan, FU Wei, et al. Identification of permanent faults for single-phase auto-reclosure on transmission lines with shunt reactors[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(11): 75-81.

[11] 索南加乐, 邵文权, 宋国兵, 等. 带并联电抗器输电线路永久性故障识别新方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(28): 80-85.

SUONAN Jia-le, SHAO Wen-quan, SONG Guo-bing, et al. A new method to identify permanent faults for transmission lines with shunt reactors[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(28): 80-85.

[12] 索南加乐, 邵文权, 宋国兵. 基于参数识别的单相自适应重合闸研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(1): 48-54.
SUONAN Jia-le, SHAO Wen-quan, SONG Guo-bing. Study on single-phase adaptive reclosure based on parameter identification[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(1): 48-54.

收稿日期: 2009-12-03; 修回日期: 2010-02-27

作者简介:

赵庆明 (1975-), 男, 博士, 主要从事电力系统继电保护以及安全稳定方面的研究工作; E-mail: qingmingzhao@eyou.com

李 斌 (1976-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统继电保护与故障分析。