

基于网络流和内点法的电力系统动态经济调度

李秀卿, 罗忠游, 郭芳义

(东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 该文用线性约束网络流来描述电力系统动态经济调度问题,它在计及机组出力上下界约束和输电元件传输功率上下界约束的同时,也考虑了电力网络中功率的流动应遵循的自然规律—Kirchhoff定律,确保了网络流模型解与直流模型解的一致性,并用内点法进行求解。内点法克服了传统方法难以精确处理不等式约束的弊端,使计算结果更精确。同时采用变量重组、矩阵既约和约束松弛技术,减少计算量,加快了计算速度。计算结果表明:该文方法是可行和有效的。

关键词: 电力系统; 协调方程式; 内点法; 网络流; 安全约束; 经济调度

中图分类号: TM734 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2006)10-0037-04

0 引言

电力系统运行可以由经济调度带来巨大的经济效益,因而各发达国家都广泛地开展了这一领域的研究^[1~4]。对于纯火电系统的经济调度问题目前国内外采用的主要是协调方程式法。但协调方程式法存在两大难点:一是协调方程是在不考虑机组上下界约束条件下导出的,因而只有在各个机组均不越界的情况下才获得最优解。但在实际电力系统的调度计算中,往往会出现相当数量的机组越限情况;二是随着系统的扩大,网损及网损微增率的计算量增大,使计算极为复杂。由于这两方面的原因限制了协调方程式法的使用范围,针对这一问题,出现了以网络规划为基础的经济调度方法。网络流模型保留了输电网的拓扑结构,易于分析网络中潮流的分布和处理输电元件安全性约束^[5~9]。但电力系统中的功率分布要满足一定的物理定律,这些定律集中表现为支路欧姆定律、节点电流定律、回路电压定律,只有满足这三条定律的系统有功功率分布才能符合实际系统的潮流分布。文献[5]用网络流规划的方法考虑线路的潮流约束,不足的是没有考虑电压定律,当各线路的电阻和电抗参数相差较大时,网络流的结果和实际潮流分布差别较大。文献[6]把KVL(回路电压定律)作为惩罚项加入目标函数中,在输电元件潮流不越限的情况下,网络流的结果和直流潮流的结果是一致的。文献[7]提出了一种用硬约束来描述输电网络KVL的精确的网络流模型。本文采用这种精确的网络流模型来描述系统的网络结构。

用网络流方法进行电力系统经济调度的文献很多,但结合内点法求解的文献很少。内点法是一种

求解线性规划问题的多项式时间算法,当约束条件和变量数目增加时,它的迭代步数增加较少^[2,9,10]。因此在处理大规模最优化问题时与其它方法相比有其显著的优势^[9]。本文将网络流和内点法相结合来求解电力系统安全约束经济调度问题。

1 安全约束经济调度模型描述

安全约束经济调度的数学模型可表示成下列形式:

$$\min \phi(f, p) \quad (1)$$

$$\text{s t } Af = p - l, Xf = 0 \quad (2)$$

$$f^{\min} \leq f \leq f^{\max}, p^{\min} \leq p \leq p^{\max} \quad (3)$$

式中: $\phi(f, p)$ 是最小化目标函数;A和X分别为电网关联矩阵和基本回路阻抗矩阵; f, p, l 分别为线路的有功潮流、发电机出力和节点有功负荷向量。式(2)表示节点有功平衡和电压定律约束;式(3)表示输电容量约束和发电机最大与最小出力限制。

目标函数由两个费用函数加权而成:

$$\phi(f, p) = \phi_f(f) + \phi_g(p) \quad (4)$$

式中: $\phi_f(f)$ 是输电元件的有功损耗函数, $\phi_g(p)$ 是机组有功费用投标函数, λ 是费用选择系数。

当取系统的边际成本时,网损即可折算成费用。本文将两项费用函数具体表述如下:

$$\phi_f(f) = \frac{1}{2} f R f, \phi_g(p) = \frac{1}{2} p Q p + c p \quad (5)$$

式中:R为输电元件电阻对角矩阵;Q、c为给定的常数或投标策略系数对角矩阵。

2 求解方法

由式(1)~(5)所构成的优化模型,可以表成如下形式的非线性规划问题:

$$\min f(x) = c^T x + \frac{1}{2} x^T H x \quad (6)$$

$$\text{st } h(x) = 0 \quad (7)$$

$$\underline{g} \leq g(x) \leq \bar{g} \quad (8)$$

式(6)是基于式(5)表示的二次形式, c, H 分别对应二次型的列向量和海森矩阵;式(7)由约束条件(2)组成;式(8)由式(3)组成; \bar{g}, \underline{g} 分别为变量的上、下界; x 是由 p, f 组成的求解向量。引入松弛变量 (l, u) $R^r, 0, r$ 为全部不等式的个数, 将式的不等式约束转化为等式约束, 并把目标函数改造为障碍函数, 可得:

$$\begin{cases} \min c^T x + \frac{1}{2} x^T H x - \mu \left(\sum_{j=1}^r \ln l_j + \sum_{j=1}^r \ln u_j \right) \\ \text{s t } h(x) = 0 \\ \bar{g} - g(x) - u = 0 \\ g(x) - l - \underline{g} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: μ 为扰动因子。

显然, 式(9)是只含有等式约束的优化问题, 可以直接用拉格朗日乘子法求解, 其拉格朗日函数为:

$$L(x, y, z, l, u, w, \mu) = c^T x + \frac{1}{2} x^T H x - \mu \left(\sum_{j=1}^r \ln l_j + \sum_{j=1}^r \ln u_j \right) - z^T h(x) - w^T (\bar{g} - g(x) - u) - \sum_{j=1}^r z_j^T (g(x) - l - \underline{g}) \quad (10)$$

式中: R^m, m 为等式约束的个数, $z \in R^r, w \in R^r$, 且 $w \geq 0, z \geq 0, z, w$ 为拉格朗日乘子。

由式(10)可知: 最优解即 KKT条件的推导结果可表示如下:

$$\begin{cases} L_x = c + Hx - A^T z - \nabla_x g(x)(z+w) = 0 \\ L = h(x) = 0 \\ L_z = \bar{g} - g(x) - u = 0 \\ L_w = \bar{g}(x) - l - \underline{g} = 0 \\ L_l^\mu = L W e - \mu e = 0 \\ L_u^\mu = U Z e - \mu e = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: L, U, W, Z 是对角矩阵, e 为各列元素均为 1 的 n 维列向量。

2.1 预测校正方法

针对最优性条件的求解, 原对偶内点法可以看成是牛顿法的变形, 下面对本文采用的预测校正方法的整体流程进行论述:

给 $x^0 > 0, z^0 \geq 0, w^0 \geq 0, \mu^0 = 0, (l^0, u^0) = 0$ 赋初

值, 在初始点对最优性条件线性化, 得到求解线性系统的牛顿迭代修正方程:

$$\begin{bmatrix} \bar{H} & \nabla h(x) & \nabla g(x) & -\nabla g(x) & 0 & 0 \\ h(x)^T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \nabla g(x)^T & 0 & 0 & 0 & -I & 0 \\ -\nabla g(x)^T & 0 & 0 & 0 & 0 & -I \\ 0 & 0 & L & 0 & Z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & U & 0 & W \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \\ w \\ l \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_x \\ -L \\ -L_z \\ -L_w \\ -L_l^\mu \\ -L_u^\mu \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: $\bar{H} = \nabla^2 h(x) + \nabla^2 g(x)(z-w) - \nabla^2 f(x)$, $\nabla^2 h(x), \nabla^2 g(x), \nabla^2 f(x)$ 分别是 $h(x)$ 和 $f(x)$ 的海森矩阵。

记 $X = (x, l, u), t = (z, w)$, 就 $k=0, 1, \dots$ 进行如下迭代计算 (以下在描述中省略迭代次数的标记 k):

- a 设置 $\mu = 0$ 。
- b 解式(12), 以确定仿射方向 $[\bar{x}^T, \bar{z}^T, \bar{w}^T, \bar{l}^T, \bar{u}^T]^T$ 。
- c 取 $\alpha = 0.9995$ 和 $\mu = n^{-1/2}; \mu = (\frac{\mu}{n})^2$ 。

$\mu = (\frac{\mu}{n})^2, n$ 为求解向量的维数。

- d 解式(13), 确定牛顿搜索方向: $[\bar{x}, \bar{z}, \bar{w}, \bar{l}, \bar{u}]^T$ 。

$$\begin{bmatrix} \bar{H} & \nabla h(x) & \nabla g(x) & -\nabla g(x) & 0 & 0 \\ h(x)^T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \nabla g(x)^T & 0 & 0 & 0 & -I & 0 \\ -\nabla g(x)^T & 0 & 0 & 0 & 0 & -I \\ 0 & 0 & L & 0 & Z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & U & 0 & W \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \\ w \\ l \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_x \\ -L \\ -L_z \\ -L_w \\ -L_l^\mu \\ -L_u^\mu \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中:

$$\begin{cases} \tilde{L}_l^u = LZe + \tilde{L} \tilde{Z}e - \mu e \\ \tilde{L}_u^u = UWe + \tilde{U} \tilde{W}e - \mu e \end{cases} \quad (14)$$

e. 选择适当的步长且保持其为内点, $\alpha = \min(1, \dots)$ 。其中:

$$= \min\left\{\frac{-l}{l} \quad l < 0; \frac{-u}{u} \quad u < 0; 1\right\}$$

$$= \min\left\{\frac{-w}{w} \quad w < 0; \frac{-z}{z} \quad z < 0; 1\right\}$$

f 构成新的迭代:

$$\begin{aligned} X &= X + \alpha X \\ t &= t + \alpha t \end{aligned}$$

由于对应问题满足对偶定理,所以原问题变量和对偶问题变量取相同的步长。

2.2 初始值的选择

通常,好的初始值可以加速算法的收敛,但我们仿真发现,本文算法对初始值不敏感,取初始值等于控制变量上下界的平均值即可收敛到最优解。初始值选择如下:

$$\begin{aligned} x^0 &= (\underline{x} + \bar{x}) / 2, \quad u^0 = e \\ z^0 &= w^0 = e \\ l^0 &= g(x^0) - \underline{g}, \quad u^0 = \bar{g} - g(x^0) \end{aligned}$$

3 线性系统求解

由于式 (12)和式 (13)表示的线性系统共享一个系数矩阵,下面的论述只针对式 (12)表示的线性系统。该线性系统可以通过消去松弛变量和拉格朗日乘子来缩减系统规模。从式 (12)中消去 $[w, u, l, z]$,获得简约的修正方程为:

$$\begin{bmatrix} H(\cdot) & \nabla h(x) \\ \nabla h(x)^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\cdot) \\ -h(x) \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{cases} l = L_z + \nabla g(x)^T x \\ u = L_w - \nabla g(x)^T x \\ z = -L^{-1}(Zl + L_l^u) \\ w = -U^{-1}(Wu + L_u^u) \end{cases} \quad (16)$$

式中: $H(\cdot) = \bar{H} - \nabla g(x) S \nabla g^T$; $S = U^{-1}W - L^{-1}Z$; $(\cdot) = L_x - \nabla g(x) [U^{-1}(WL_w + L_u^u) - L^{-1}(ZL_z + L_l^u)]$

$\nabla g(x) S \nabla g^T$ 为障碍矩阵。显然,式 (15)的维数仅仅取决于等式约束的维数,与不等式约束的维数无关,有效的保证了算法对系数规模的不敏感性。并且,简约修正方程式经过重排可获得一个类似于节点导纳矩阵的稀疏矩阵。在实现算法时,可以充

分利用矩阵的稀疏性,进行稀疏存储、稀疏三角分解以提高解算效率。

3.1 约束松弛

通常,支路潮流不等式约束的数目可能非常大,若全部引入式 (16)所示的优化问题,则约束矩阵的维数将变得十分庞大,从而影响解算速度。在迭代计算时可采用约束松弛技术,只把起作用的约束引入到式 (16)中,而在实际电力系统中负荷过载的支路很少,即反应在数学模型中的有效约束很少,大量的线路安全性约束为无效约束,从而大大降低问题的规模,提高解算速度。

3.2 预测校正法求解流程

a 给定初始值;

b 置 $\mu = 0$,解式 (15) ~式 (16),接着通过式 (14)计算 $\tilde{L}_l^u, \tilde{L}_u^u$,取代式 (15) ~式 (16)中的 L_l^u, L_u^u ,再次求解式 (15) ~式 (16),得到牛顿搜索方向;

c 如果 KKT条件按规定的收敛条件(本文最大偏差取 10^{-5})满足,则输出结果,算法结束,否则转向 d;

d 由牛顿搜索方向和步长对所求变量进行修正,并转向 b。

4 算例与分析

为了验证本文方法的正确性和有效性,本文以 IEEE 30标准测试系统算例进行计算,并与文献 [2]和文献 [7]进行了比较。发电机节点数据取自文献 [2],节点负荷和变压器支路参数取自文献 [7],标准算例计算表明:本文方法不仅具有较高的计算精度,而且比传统方法具有更快的计算速度,CPU时间仅为文献 [2]方法的 60% ~ 80%。表 1给出了本文算法对 IEEE 30节点系统的计算结果(取系统边际价格, $\lambda = 1$)。由此可见,本文方法具有良好的计算性能。

表 1 IEEE30系统的计算结果

Tab 1 Calculation result of IEEE 30 system

机组编号	本文方法	文献 [2]	文献 [7]
PG1	1.761 8	1.759 5	1.762 6
PG2	0.488 1	0.488 4	0.488 4
PG5	0.214 9	0.2152	0.215 1
PG8	0.222 4	0.222 9	0.221 5
PG11	0.121 7	0.122 7	0.121 4
PG13	0.120 0	0.120 0	0.120 0
总发电量	2 928 9	2 928 6	2 929 0
系统损耗	0.094 8	0.094 6	0.094 8
总发电成本	802.399 1	802.398 6	802.400 0

5 结论

本文提出的基于网络流和内点法相结合的电力系统安全约束调度算法,不仅克服了传统网络流难以得到可行经济流的缺点,同时可精确的考虑实际电力系统中的等式和不等式约束,使计算结果更精确。为了减少计算量,提高计算效率,所采用的变量重组和矩阵既约的技术及约束松弛技术,在电力系统的其他优化中也同样适用。标准算例表明,用本算法研究安全有功经济调度问题,不仅具有较快的计算速度,而且计算精度比一般网流法要高得多,因此本方法是可行的。

参考文献:

- [1] Youssef H K, ElNaggar KM. Genetic Based Algorithm for Security Constrained Power System Economic Dispatch [J]. Electric Power Systems Research, 2000, 53: 47-51.
- [2] Irisarri G, Kimball L M. Economic Dispatch with Network and Ramping Constraints via Interior Point Methods [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13 (1): 236-241.
- [3] 唐巍,李殿璞. 电力系统经济负荷分配的混沌优化方法 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20 (10): 36-40.
TANG Wei, LI Dian-pu. Chaotic Optimization for Economic Dispatch of Power Systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20 (10): 36-40.
- [4] 侯云鹤,熊信银,吴耀武,等. 基于广义蚁群算法的电力系统经济负荷分配 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (3): 59-64.
HOU Yun-he, XIONG Xin-yin, WU Yao-wu, et al. Economic Dispatch of Power Systems Based on Generalized Ant Colony Optimization Method [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (3): 59-64.
- [5] Ge S Y, Chung T S. Optimal Active Power Flow Incorporating Power Flow Control Needs in Flexible AC Trans on Systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999.
- [6] Jizhong Z, Mamoh J A. Multi-area Power Systems Economic Dispatch Using Nonlinear Convex Network Flow Programming [J]. Electric Power Systems Research, 2001, 59 (1): 13-20.
- [7] Carvalho M F, Soares S, Ohishi T. Optimal Active Power Flow Dispatch by Network Flow Approach [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1988, 3: 1640-1647.
- [8] Streiffert D. Multi Area Economic Dispatch with Tie Line Constraints [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10 (4): 1946-1951.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 谭伦农,张保会. 市场环境下的事故备用容量 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (11): 54-58.
TAN Lun-nong, ZHANG Bao-hui. Reserve Capacity for Accident in Power Market Environment [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (11): 54-58.
- [12] 杨梓俊,丁明,孙昕. 电力市场下综合考虑可靠性和旋转备用效益的机组组合 [J]. 电网技术, 2003, 27 (6): 13-18.
YANG Zi-jun, DING Ming, SUN Xin. Unit Commitment Problem Under the Condition of Electricity Market Considering System Reliability and Benefit from Spinning Reserve [J]. Power System Technology, 2003, 27 (6): 13-18.

收稿日期: 2005-10-25; 修回日期: 2005-12-19

作者简介:

李秀卿 (1954 -), 男, 教授, 研究方向为电力系统规划, 电力系统经济调度;

罗忠游 (1976 -), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统经济调度工作; E-mail: luozhongyou@sohu.com

郭芳义 (1979 -), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统可靠性分析工作。

Dynamic economic dispatch combining network flow and interior point approaches

LIXiu-qing, LUO Zhong-you, GUO Fang-yi

(Northeast China Institute of Electric Power Engineering, Jilin 132012, China)

Abstract: In this paper, the dynamic economic dispatch is formulated as a network flow problem with additional linear constraints. Transmission flow limits and the generator power upper and lower limits are taken into account, simultaneously, both Kirchhoff's laws are

(下转第 45 页 continued on page 45)

- 书店, 1996
- ZHANG Wei-ying Game Theory and Informational Economics [M]. Shanghai: Shanghai Sanlian Bookstore, 1996
- [8] 马莉,文福拴, David A K 采用分段报价规则的竞价策略初探 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26(9): 16-19
- MA Li, WEN Fu-shuan, David A K A Preliminary Investigation on Bidding Strategies Employing Step-wise Bidding Rules [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(9): 16-19
- [9] 魏宗舒. 概率论与数理统计教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1983
- WEI Zong-shu Probability and Mathematics Statistics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1983
- [10] 翟桥柱, 周佃民, 管晓宏. 发电竞价曲线的特征研究 [J]. 电网技术, 2002, 26(12): 9-12
- ZHA I Qiao-zhu, ZHOU Dian-min, GUAN Xiao-hong Study on Characteristics of Curves Generation Bidding [J]. Power System Technology, 2002, 26(12): 9-12
-
- 收稿日期: 2005-10-21; 修回日期: 2005-11-28
- 作者简介:
- 杨根 (1981 -), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力市场理论及发电厂报价技术支持系统; E-mail: yanggen_mumu@163.com
- 周杰娜 (1958 -), 女, 教授, 主要从事电力市场理论、发电厂报价技术支持系统、电力系统运行与控制的研究工作;
- 胡志勇 (1980 -), 男, 助理工程师, 主要从事电力系统运行管理工作。

Application of bidding strategies based on probability theory and game theory for generation companies

YANG Gen¹, ZHOU Jie-na¹, HU Zhi-yong²

(1. School of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550003, China;

2 Nanyang Power Supply Branch, Nanyang 473000, China)

Abstract: In electricity market environment, generation company can gain maximum profits with tactical bidding strategies. Based on these present bidding strategies, this paper presents a mathematical bidding model based on probability theory and game theory. In order to meet the maximum profits for generation company, it details the successful bidding possibility of generation company, and draws an optimal bidding strategies that can fulfill the maximum expectation profits by comparing the possibility distributing of bidding and market clearing price (MCP) and solving mathematical expectation. A simple numerical example proves, the given model and method are effective and feasible.

Key words: electricity market; game theory; probability theory; bidding strategy

(上接第 26 页 continued from page 26)

Analysis of the transient stability of the one-machine infinite bus system using VLSI

ZHANG Xiao-fang, CHEN Xing-ying

(Department of Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Considering the importance of the simulation of the power system, firstly, this paper presents the researches and advantages of using analogue VLSI to solve the transient stability of the power system. Then, a single-machine infinite-bus power system (invariable) is mapped to the chip of the analogue VLSI through a series of the formulas and the model is created at Pspice. At last, it is simulated both with and without damp. The result is basically the same as the result of Matlab. The reason of the inaccuracy is analysed and the method to solve the problem is mentioned. The simulation time of Pspice is several ns, so the simulation time is largely increased.

Key words: power system simulation; analogue VLSI; power system transient stability; power-angle curve; Pspice

(上接第 40 页 continued from page 40) also considered, which ensure the solution of the model is DC bad flow solution. The problem is solved by interior point methods. On one hand, this algorithm can handle inequality constraints conveniently which is quite difficult in traditional methods, in this way, the computational results are more accurate. On the other hand, little computation and computational efficiency are achieved by rearrangement variable, reduced correction equation and relaxation technique. The numerical examples and results show that the method is feasible and effective.

Key words: power system; coordination equation; interior point; network flow model; security-constrained; economic dispatch