

# 基于电网分区和辅助问题原理的电力系统 多区域有功负荷经济调度

李强<sup>1</sup>, 韩爱稳<sup>2</sup>, 赵洪山<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学电气工程学院, 河北 保定 071003; 2. 邢台勘探设计院, 河北 邢台 054001)

摘要: 随着电网规模的扩大, 电网计算优化问题中计算时间长、收敛速度慢等问题变得严重。针对此问题, 该文利用基于电网分区和辅助问题原理 APP(Auxiliary Problem Principle)的分布式并行优化模型来解决多区域有功负荷的经济调度, 并且把各个区域内的虚拟发电机看成真实发电机, 推导出其耗量特性曲线。仿真结果表明, 本方法具有较强的收敛性和快速性。

关键词: 电力系统; 电网分区; 辅助问题原理; 经济调度

中图分类号: TM71; TM73 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2006)11-0031-04

## 0 引言

随着电力系统规模的不断扩大和对实时分析与控制要求的不断提高, 传统串行算法分析计算较大的电力系统往往存在计算机内存不足, 收敛速度慢等维数灾问题。利用基于电网分区和辅助问题原理 (APP)的分布式优化算法把一个从地理上分割成各个区域, 分别解决各个区域的优化问题, 并且可以通过约束乘数的迭代更新来协调各个区域的优化问题。在迭代更新时, 需要各区域同步进行, 且相邻区域间数据交换量非常少。这样在分布多处理器环境下可以减少通信量并增加计算能力, 满足粗粒度计算的要求。这种算法最早应用于日发电计划优化<sup>[1]</sup>。

目前, 基于区域划分和辅助问题原理 (APP)的分解协调分布式算法已在优化潮流计算<sup>[2~5]</sup>、状态估计<sup>[6]</sup>、无功优化<sup>[7]</sup>等方面得到了一定应用。本文应用基于区域划分和 APP方法的分布式算法来解决多区域有功负荷的经济调度, 这种多区域的经济调度能够实现规模经济效益, 实现更大范围的资源优化配置, 提高市场效率。首先, 对一实际电力系统从地理上进行分区, 然后应用 APP原理建立与原问题等效的并且相对独立的子分区有功负荷的经济调度, 其次, 推导出虚拟发电机的耗量特性曲线, 这样有利于编程实现。最后, 对所建模型进行编程仿真。

## 1 分布式有功负荷经济调度

### 1.1 区域的分割

如图 1所示, 一个大的电力系统分成两个重叠的区域 a和 b, 在重叠区域的边界变量用向量 y来

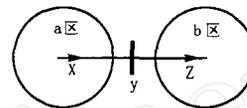


图 1 一个电力系统分解成两个重叠的区域 a和 b

Fig 1 Decomposition of a power system into two overlapping regions a and b

表示, a和 b区域的核心变量分别用向量 x、z来表示。在重叠区域, 对于每条联络线都必须包括一条母线, 如果没有就建立一条“虚拟母线”。在每条联络线上都有有功、无功流过母线, 母线上有电压幅值和相角。我们以发电机最小运行费用为目标函数并且假设在重叠区域内没有发电机, 则整个电力系统的目标函数可表示为:  $f(x, z) = f_a(x) + f_b(z)$ , 其中,  $f_a(x)$ 为 a区域总的发电费用,  $f_b(z)$ 为 b区域总的发电费用。根据这种假设可以写出 a区域的等式约束  $h_a(x, y) = 0$ 和 b区域的等式约束  $H_b(y, z) = 0$ 。同样, 可以写出 a区域的不等约束  $g_a(x, y) \leq 0$ 和 b区域的不等约束  $g_b(y, z) \leq 0$ 。这样, 有功经济调度问题可以写成下式:

$$\min_{\substack{(x, y) \\ (y, z)}} \{ f_a(x) + f_b(z) \} \quad (1)$$

式中:  $A = \{ (x, y) \mid h_a(x, y) = 0, g_a(x, y) \leq 0 \}$ ,

$B = \{ (y, z) \mid h_b(y, z) = 0, g_b(y, z) \leq 0 \}$ 。

根据分解协调法, “复制”边界变量 y为  $y_a$ 、 $y_b$  分别属于区域 a、b。这样, 对于  $0$ 的常数, 式 (1) 就等于:

$$\min_{\substack{(x, y) \\ (y, z)}} \left\{ \begin{aligned} f_a(x) + f_b(z) + \frac{\lambda}{2} (y_a - y_b) \\ (y_a - y_b) > 0, y_a - y_b = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中:  $y_a = (P_a, Q_a, V_a, \dots)^T$ ,



$$c_{2b} = \frac{1}{2}, \quad c_{1b} = -P_a^k + (- + )P_b^k + \frac{k}{p},$$

$$c_{0b} = \frac{1}{2}P_b^{k^2}.$$

这样, 目标函数可以统一成  $\min \sum_{i \in S_G} (a_{2i} P_{Gi}^2 + a_{1i} P_{Gi} + a_{0i})$  的形式。式中,  $S_G$  为区域内所有发电机集合,  $P_{Gi}$  为发电机  $i$  的有功出力。当发电机  $i$  是虚拟发电机时, 耗量特性曲线参数要随迭代次数的增加不断变化。

### 3 应用实例

MP1是一种支持消息传递编程模型的库, 并成为这种编程模型的代表和事实上的标准, 它的最终目的是服务于进程间通信这一目标。MP1提供了可靠的通信接口, 并提供接口可以方便 C语言和 Fortran77的调用。应用 MP1我们可以实现多微机间的通信来模拟分布式计算环境。

#### 3.1 简单的有功负荷经济调度模型及程序流程图

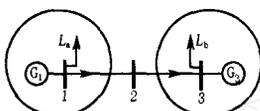


图 2 分解前的电力系统

Fig 2 Power system pre-decomposition

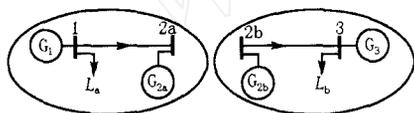


图 3 分解后的电力系统

Fig 3 Power system post-decomposition

图 2、3分别为分解前、后的系统。有关数据如下：

有功负荷  $L_a = L_b = 0.5$ , 发电机  $G_1$  的耗量特性曲线  $f(G_1) = 0.5P_1^2$ , 发电机  $G_3$  的耗量特性曲线  $f(G_3) = P_3^2$ 。这里我们省略了网损和各个发电机的有功出力的上下界的约束。

区域 a内有有功负荷经济调度如下：

$$\min \left\{ \begin{aligned} &0.5P_1^2 + \frac{1}{2}P_{2a}^2 + \\ &[(- + )P_{2a}^k - P_{2b}^k + \frac{k}{p}P_{2a} + \frac{1}{2}P_{2a}^{k^2}] \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$s.t. P_1 + P_{2a} = 0.5,$$

区域 b内有有功负荷经济调度如下：

$$\min \left\{ \begin{aligned} &P_3^2 + \frac{1}{2}P_{2b}^2 + [(- + )P_{2a}^k + (- + )P_{2b}^k + \\ &^k]P_{2b} + \frac{1}{2}P_{2b}^{k^2} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$s.t. P_{2b} + P_3 = 0.5,$$

$$P_{2b}^{k+1} = P_{2b}^k + (Y_{2a}^k - Y_{2b}^k) \quad (16)$$

程序流程图见图 4。

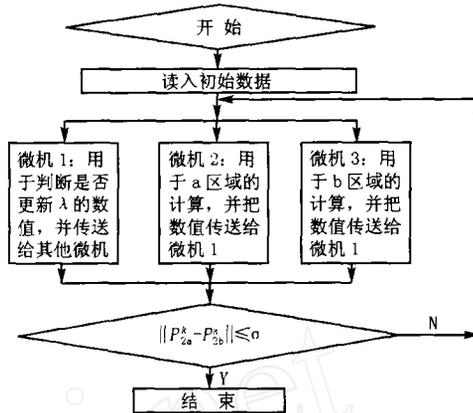


图 4 程序流程图

Fig 4 Program flow diagram

#### 3.2 仿真结果与分析

本算例用 C++语言编写, 用 MP1和多微机来模拟分布式计算。其中,  $\frac{1}{2} = 0.375$  用于结束循环的判断条件  $\epsilon = 0.00001$ 。

在一台微机上应用串行算法来解决本算例共用 43 次迭代, 第 43 次数据如表 1 所示, 在三台微机上应用并行算法来解决本算例共用 17 次迭代, 第 17 次数据如表 2 所示。在分布式计算中用于更新  $\lambda$  的微机计算耗时 5.507050, 用于 a 区域计算的微机耗时 3.572943, 用于 b 区域计算的微机耗时 1.781760。

表 1 串行算法的数值

Tab 1 Serial algorithm value

a 区域	$P_1 = 0.6667$	$P_{2a} = 0.1667$
b 区域	$P_3 = 0.3333$	$P_{2b} = -0.1667$
整个区域	$P_1 = 0.666658$	$P_3 = 0.333333$

表 2 并行算法的数值

Tab 2 Parallel algorithm value

a 区域	$P_1 = 0.666665$	$P_{2a} = 0.166665$
b 区域	$P_3 = 0.333337$	$P_{2b} = -0.166663$
整个区域	$P_1 = 0.666665$	$P_3 = 0.333337$

由以上数据分析可以看出利用多微机的分布式算法大大地减少了迭代次数, 有效地节省了计算时间。用于更新  $\lambda$  的微机计算耗时明显比其他两台微机计算耗时多, 这是因为这台微机通信量比其他

两台大,通信耗时多。用于 a 区域计算的微机和用于 b 区域计算的微机耗时并不相等,这说明两台微机的计算负荷不相等。所以,合理地分配计算负荷给各个微机并减少微机间的通信量可以进一步提高分布式算法的计算速度。

#### 4 结论

本文应用基于 APP 原理的分布式算法,将大电网的有功经济调度问题分解为多个区域相互协调的并行有功经济调度问题,通过简单算例对本算法进行测试,说明本算法有较好的收敛性。基于 APP 原理的分布式算法利用多微机并行处理各个子问题,加快了求解整个问题的速度,在仿真中发现,合理地进行区域划分,来满足计算负荷的平均分配,并减少区域间的通信量,对分布式算法计算速度的提高是十分重要的。

#### 参考文献:

- [1] Batut J, Renaud A. Daily Generation Scheduling Optimization with Transmission Constraints: a New Class of Algorithms[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 7(3): 982-989.
- [2] Kim B K, Baldick R. Coarse-Grained Distributed Optimal Power Flow[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(2).
- [3] Baldick R, Kim B H, Chase C, et al A Fast Distributed Implementation of Optimal Power Flow[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3).
- [4] Kim B H, Baldick R. A Comparison of Distributed Optimal Power Flow Algorithms[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2).
- [5] Hur D, Park J K, Kim B H. Evaluation of Convergence Rate in the Auxiliary Problem Principle for Distributed Optimal Power Flow[J]. IEE Proc—Gener, Transm and Distrib, 2002, 149(5).
- [6] 任先成,韩富春.分布式电力系统状态估计[J].电力系统及其自动化学报,2003,15(5):11-13,85.  
REN Xian-cheng, HAN Fu-chun Distributed Power System State Estimation[J]. Proceedings of the EPSA, 2003, 15(5): 11-13, 85.
- [7] 程新功,厉吉文,曹立霞,等.基于电网分区的多目标分布式并行无功优化研究[J].中国电机工程学报,2003,23(10):109-113.  
CHENG Xin-gong, LI Ji-wen, CAO Li-xia, et al Multi-objective Distributed Parallel Reactive Power Optimization Based on Subarea Division of the Power Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 109-113.
- [8] Cohen G Optimization by Decomposition and Coordination: a Unified Approach[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1978, 23(2).
- [9] Cohen G Auxiliary Problem Principle and Decomposition of Optimization Problems[J]. Journal of Optimization Theory and Application, 1980, 32(3): 277-305.
- [10] Murphy L, Contreras J, Wu F L. A Decomposition Coordination Approach for Large-Scale Optimization[J].
- [11] Contreras J, Losi A, Russo M, et al Simulation and Evaluation of Optimization Problem Solutions in Distributed Energy Management Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(1).

收稿日期: 2005-11-23; 修回日期: 2006-01-03

#### 作者简介:

李强(1977-),男,硕士,主要从事分布式优化潮流算法的研究;E-mail: lq\_male@126.com

韩爱稳(1964-),女,高工,从事工作为变电站二次设计;

赵洪山(1965-),男,博士,副教授,研究方向包括电力系统自动化、混杂系统动态分析和电力系统离散事件动态分析。

### Multi-region field active load of power system in economic dispatch based on subarea division and auxiliary problem principle

LI Qiang<sup>1</sup>, HAN Ai-wen<sup>2</sup>, ZHAO Hong-shan<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Xingtai Exploration Design Academy, Xingtai 054001, China)

**Abstract:** Along with the enlarging of electric network, the problem which long-time computing and slow rapidity of convergence become serious in the electric network computing. To handle this problem, this paper utilizes distributed parallel optimization model which based on subarea division and auxiliary problem principle (APP) to solve multiregion field active load in economic dispatch. It takes the virtual generator as real generator to deduce its rate of consumption characteristic. Simulation shows that this means is fast and has a good convergence property.

**Key words:** power system; subarea division; auxiliary problem principle; economic dispatch