

互联电网的直流最优潮流分解算法研究

刘科研¹, 盛万兴², 李运华¹

(1.北京航空航天大学, 北京市 海淀区 100083; 2.中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100085)

Research on Decomposition Algorithm of DC Optimal Power Flow in Large Scale Interconnection Power Grids

LIU Keyan¹, SHENG Wanxing², LI Yunhua¹

(1. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Haidian District, Beijing, 100083, China;

2. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100085, China)

ABSTRACT: This paper investigated an optimal method of optimal power flow in large scale interconnected power grids. A decomposition collaborative model based on partial duality is analyzed, and a parallel algorithm based on DC optimal power flow model is presented in multi-region decomposition of interconnected power grids. The OPF computation of large power grid is decomposed into multi regions subproblems, which is a quadratic programming problem used to solve a DC optimal power flow. The condition of multi-region optimal convergence is discussed. The information of interchanging between regions is export price and boundary nodal bus phase angle. The IEEE RTS-96 systems with two, three and four interconnected regions are studied to illustrate the effect of the proposed approach and prove to have a great future in real time OPF computation of interconnected power system.

KEY WORDS: interconnected area power grid; optimal power flow; area decomposition; quadratic programming; partial duality; parallel computation

摘要: 研究了大系统互联电网的最优潮流优化策略, 基于部分对偶理论分析了电网分区的分解协调模型, 提出了一种基于直流最优潮流模型的互联电网多区域分解最优潮流并行求解算法, 将一个大的电网互联系统分解成多个区域子问题, 每个区域子问题是个典型的二次规划问题, 使用直流最优潮流模型来求解互联电网的最优潮流分布, 讨论了分区优化收敛条件。通过交换输出电价和边界节点相位角, 完成区域间的信息交换。使用上述分解算法对 IEEE RTS-96 算例的多个互联区域进行了分析, 结果表明本文算法是一种有效的求解算法, 适合大区电网互联后在线分布式动态 OPF 计算。在电力系统有极大的应用前景。

基金项目: 国家重点基础研究专项经费项目(G1998030405)。

Project Supported by Special Fund of the National Priority Basic Research of China (G1998030405)。

关键词: 互联电网; 最优潮流; 区域分解; 二次规划; 部分对偶; 并行求解

0 引言

在电力市场环境, 输电网络开放和电力系统互联正成为电力市场的发展方向, 对于大系统互联电网而言, 尽管每个区域都有自己的独立系统运行员(ISO), 区域间仍然需要相互协调以保证系统的可靠性和经济运行。为了实现更大范围的资源优化配置, 同时在更大的市场内进行竞争, 网络互联与区域间的功率交换日益频繁^[1]。

分布式最优潮流(OPF)是大型互联电力系统优化运行的有力分析工具。将一个大的系统的 OPF 问题按区域分解成几个较小的子问题的 OPF 求解主要基于 3 种考虑^[2-3]: ①保留每个区域的独立性来进行总的优化问题的计算; ②以分布方式或并行方式求解最优潮流问题, 提高计算速度; ③使区域调度员能够协调地调度电网, 而无需知道其他区域的运行数据以及获得跨区域电力交易最优价格。多区域分解算法近些年来有了一定的研究。现有的多区域分解的算法主要分为 2 大类, ①引入虚拟母线或虚拟发电机, 并将其复制到各个区域的分解方法^[4-7]; ②不改变网络结构, 在各区域中考虑联络线潮流影响后的分解方法^[8-12]。

本文提出了一种基于直流最优潮流多区域分解的分布式并行算法, 通过分解区域间的联络线, 使一个大的多区域互联的电网分解成多个相对独立的区域, 而各个区域间的联系通过区域间联络线信息的交换获得。需交换的联络线信息包括与耦合约

束相对应的拉格朗日乘子和联络线两端的节点相位角信息。分解后的互联电网可以在一种分布式的环境下求解多区域联网的最优潮流问题。

1 多区域直流最优潮流数学模型

对于多区域的互联电网，以区域 A 和毗邻区域 B 两个区域为例，多区域互联电网总的最优潮流问题的数学模型可以表示为

$$P_1 \begin{cases} \min. F(X_A, X_B) = f(X_A, X_B) \\ \text{s.t.} \begin{cases} h_A(X_A, X_B) = 0 \\ h_B(X_A, X_B) = 0 \\ g_A(X_A) \leq 0 \\ g_B(X_B) \leq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

式中： F 为优化目标函数，表示总的机组燃料费用为最小，是二次函数的形式； X_A, X_B 分别为与区域 A 和 B 相关的变量，是包含发电机出力 P 和母线相位角 q 的矢量形式；式 $h_A(X_A, X_B)$ 、 $h_B(X_A, X_B)$ 分别表示区域 A, B 的耦合方程； $g_A(X_A)$ 、 $g_B(X_B)$ 分别为区域 A 和 B 内的等式和不等式约束，通常包括潮流方程等式约束，发电机出力不等式约束，支路潮流约束等。

对上述多区域直流最优潮流模型式(1)，可以列写 Lagrange 方程为

$$L(y) = f(X_A, X_B) - I_1^T h_A(X_A, X_B) - I_2^T h_B(X_A, X_B) - m_1^T g_A(X_A, X_B) - m_2^T g_B(X_A, X_B) \quad (2)$$

式中， $I_1 \in R^{p_1}, I_2 \in R^{p_2}, m_1 \in R^{m_1}, m_2 \in R^{m_2}$ ，是约束对应的 Lagrange 乘子向量；记

$$y = (X_A, X_B, I_1, I_2, m_1, m_2)^T \quad (3)$$

式(3)为原变量和对偶变量的组合向量。

2 电网分区直流 OPF 分解协调模型

2.1 优化问题的等价分解理论

解决大系统优化问题的基本思想是将总体问题设法分解为一系列的子问题，通过对子问题各自进行局部优化，使问题得以简化。常见的分解法有 3 种：Benders 分解法^[13]，Dantzig-Wolfe 分解法和拉格朗日松弛分解法。本文基于部分对偶理论^[14]把全局的最优潮流求解问题分解成为多个区域协同优化求解的问题。

在此以二次规划为例，对部分对偶做一说明。假设 $Ex \leq d$ 是容易求解的约束，而 $Ax \leq b$ 是复杂难以求解的约束，则二次规划问题可以写成等式(4)的对偶问题如下：

$$\max_x \{cx^2 : Ax \leq b, Ex \leq d\} = \min_{y \geq 0} \{ \max_x \{cx^2 - y(Ax - b) : Ex \leq d\} \} \quad (4)$$

根据部分对偶理论，可以把式(1)中的复合等式约束移到目标函数中，得到问题 P_2 ，假设 $\bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{I}_3, \bar{I}_4$ 分别是与式(1)中 I_1, I_2, I_3, I_4 对应的拉格朗日乘子。如果 $(X_A^*, X_B^*, \bar{I}_1^*, \bar{I}_2^*, \bar{I}_3^*, \bar{I}_4^*)$ 满足 P_1 的一阶 KKT(Karush-Kuhn-Tucker)最优条件，那么当 $\bar{I}_1 = \bar{I}_1^*$ 且 $\bar{I}_2 = \bar{I}_2^*$ 时， $(X_A^*, X_B^*, \bar{I}_3^*, \bar{I}_4^*)$ 满足问题 P_2 ，即

$$P_2 \begin{cases} \min. F = f(X_A, X_B) - \bar{I}_1 h_A(X_A, X_B) - \bar{I}_2 h_B(X_A, X_B) \\ \text{s.t.} \begin{cases} g_A(X_A) \leq 0 \\ g_B(X_B) \leq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

P_2 的目标函数具有“可分离结构”形式，通过固定其中一个区域中的变量，可以得到 P_2 分解后的 2 个子问题 P_3 和 P_4 如下：

$$P_3 \begin{cases} \min. F(X_A) = f_A(X_A, \bar{X}_B) - \bar{I}_2 h_B(X_A, \bar{X}_B) \\ \text{s.t.} \begin{cases} h_A(X_A, \bar{X}_B) = 0 \\ g_A(X_A) \leq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

$$P_4 \begin{cases} \min. F(X_B) = f_B(\bar{X}_A, X_B) - \bar{I}_1 h_A(\bar{X}_A, X_B) \\ \text{s.t.} \begin{cases} h_B(\bar{X}_A, X_B) = 0 \\ g_B(X_B) \leq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

式中， \bar{x}_A 和 \bar{x}_B 取前一次迭代中的值。

由 KKT 最优性条件定理得， P_3 和 P_4 组合的一阶 KKT 条件可以表达为：若 X_A, X_B 为 P_3 和 P_4 的最优解，且 $\nabla g_A(X_A), \nabla g_B(X_B)$ 线性无关，则存在 $I_A, I_B \geq 0$ ，使下列方程成立：

$$\nabla F(X_A) + \nabla F(X_B) + I_A \cdot \nabla g_A(X_A) + I_B \cdot \nabla g_B(X_B) = 0 \quad I_j g_j(x) = 0, j = A, B \quad (8)$$

P_3 和 P_4 组合的一阶 KKT 条件与 P_1 的一阶 KKT 最优性条件一致。根据二次规划的性质可知，KKT 条件不仅是最优解的必要条件，而且是充分条件；局部的最优解就是全局最优解。

2.2 电网分区的直流最优潮流模型

如图 1 所示，电网 S 的 2 个子区域 A 和 B 通过联络线支路 ij 互联，通过对支路 ij 引入 2 个联络线变量 T_{ij} 和 T_{ji} ，从而“断开联络线”。在求解区域 A 子问题时，保留联络线 ij^A ，在求解区域 B 子问题时，保留联络线 $i^B j$ 。

根据分解协调模型 P_3 和 P_4 ，结合直流最优潮流模型，对联络线 ij^A 有联络线约束 $(q_i^A - q_j^A) / x_{ij} - T_{ij}^A = 0$ 成立；对联络线 $i^B j$ 有 $(q_i^B - q_j^B) /$

$x_{ij} - T_{ij}^B = 0$; 区域耦合的等式约束有 $q_j^A = q_j^B$, $q_i^A = q_i^B$ 。把区域耦合的等式约束代入到联络线的约束平衡方程中, 其中相应的耦合约束就可以写成

$$h_A(X_A, \bar{X}_B) = (q_i^A - \hat{q}_j^B) / x_{ij} - T_{ij}^A = 0 \quad (9)$$

$$h_B(\bar{X}_B, X_B) = (q_j^B - \hat{q}_i^A) / x_{ij} - T_{ij}^B = 0 \quad (10)$$

应用局部对偶的分布协调模型, 分解后的区域 A 的数学模型可以表示为

$$\begin{cases} \min. F(X_A) = f_A(X_A) - \hat{I}_{ji}^B \cdot h_B(X_A, \bar{X}_B) \\ \text{s.t.} \quad g_A(X_A) \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

同理可以写出区域 B 解耦后的数学模型为

$$\begin{cases} \min. F(X_B) = f_B(X_B) - \hat{I}_{ij}^A \cdot h_A(\bar{X}_A, X_B) \\ \text{s.t.} \quad g_B(X_B) \leq 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中, $\hat{I}_{ji}^B, \hat{I}_{ij}^A$ 对应于 P_3 和 P_4 中的 \bar{I}_2 和 \bar{I}_1 。

各分区之间的参数协调通过拉格朗日乘子 I 的更新来实现。区域间需要交换的变量包括边界点的相位角 \hat{q}_i^A (\hat{q}_j^B) 和输出电价 \hat{I}_{ij}^A (\hat{I}_{ji}^B)。以发电机有功出力 P , 母线相位角 q 和联络线上功率 T_{ij} 为变量 X_A 的区域 A 的二次规划优化问题如下:

$$\begin{cases} \min. F(x_A) = f_A(x_A) - \hat{I}_{ji}^B \cdot h_B(x_A, \hat{x}_B) \\ \text{s.t.} \quad B \cdot q_A + R_A \cdot T_A = P_A - D_A \end{cases} \quad (13)$$

$$q_{ref} = 0 \quad (14)$$

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (15)$$

$$|(q_i - q_j) / x_{ij}| \leq F_{ij}^{\max} \quad (16)$$

$$(q_i^A - \hat{q}_j^B) / x_{ij} - T_{ij}^A = 0 \quad (17)$$

$$|T_{ij}^A| \leq T_{ij}^{\max} \quad (18)$$

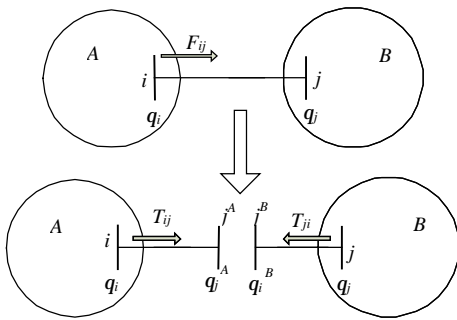


图 1 直流 OPF 区域分解示意图

Fig. 1 Area decomposition of DC-OPF

3 在线并行求解算法

本文对参考母线的处理采用文献[15]的处理方式, 即于整个互联电网使用一个松弛母线, 通过加入边界母线节点注入潮流 \hat{q}_j^B / x_{ij} 和对地导纳 $1/x_{ij}$ 来等价联络线潮流的作用, 对于不同区域参考母线

相位角的同步问题就可以避免。

节点电价与输出电价的确定为: 对于式(13)~(18), 可以列写拉格朗日函数 L , 由 $\partial L / \partial T_A = 0$ 可以得到

$$I_{ij}^A = I_i^A + g_{ij}^A \quad (19)$$

式中, I_i^A 和 g_{ij}^A 分别是式(13)和(18)的拉格朗日乘子, 表示区域 A 的边界母线 i 的节点电价和联络线 ij 的传输租用价格。

算法优化终止的条件是: 每个区域从联络线上输出的潮流与毗邻区域接收到的潮流之和小于一个给定的收敛精度 e , 即

$$|T_{ij}^{A(k)} + T_{ji}^{B(k)}| \leq e \quad (20)$$

总的计算流程如图 2 所示, 本文所提出的算法是一个分布式并行算法, 分布式并行最优潮流的计算步骤如下:

(1) 电网分区。采用电网分区的分解协调模型把电网分解为数个分区。

(2) 分布式并行计算求解。其子步骤为:

1) 每个客户机收到 1 个来自毗邻区域客户机的运行标识符, 客户机开始初始化, 初始化所有联络线的输送功率和区域 B 的输出电价, $T_{ij} = 0$, $\hat{q}_B = 0$ 和 $\hat{I}_{ji}^B = 0$;

2) 以 P_A 和 q_A 为变量, 使用式(13)~(15)求解自主区域的 OPF 问题, 根据对应式(13)的拉格朗日乘子, 计算边界点价格 I^A , 使用式(19)计算输出价格 I_{ij}^A , 初始 $(g_{ij}^A)^k = 0$;

3) 与毗邻区域交换输出电价 I_{ij}^A 和边界点相位角 q_i^A ;

4) 以 P^A 和 T^A 为变量, 求解修正的 OPF 子问题式(13)~(18), 其中, \hat{I}_{ji}^B 和 \hat{q}_j^B 作为常量, 第 k 次迭代取第 $k-1$ 次的值, 即 $(\hat{I}_{ji}^B)^k = (I_{ji}^B)^{k-1}$, $\hat{q}_j^B = (q_j^B)^{k-1}$;

5) 以 q^A 为变量, 求式(13)的约束条件。如果支路潮流方程越界, 客户机修正过载线路约束集, 循环到步骤 4);

6) 根据对应式(13)的拉格朗日乘子 I^A , 得到边界点价格;

7) 使用式(19)计算输出电价 I_{ij}^A ;

8) 判断收敛条件, 如果不收敛, 服务器发送标志给每个客户机, 每个客户机与毗邻区域交换每条联络线 ij 上的 I_{ij}^A , q_i^A 和 T_{ij}^A , 进入新的循环到步骤

4)。如果双边的每条联络线潮流以 ϵ 偏差收敛，则迭代求解结束。

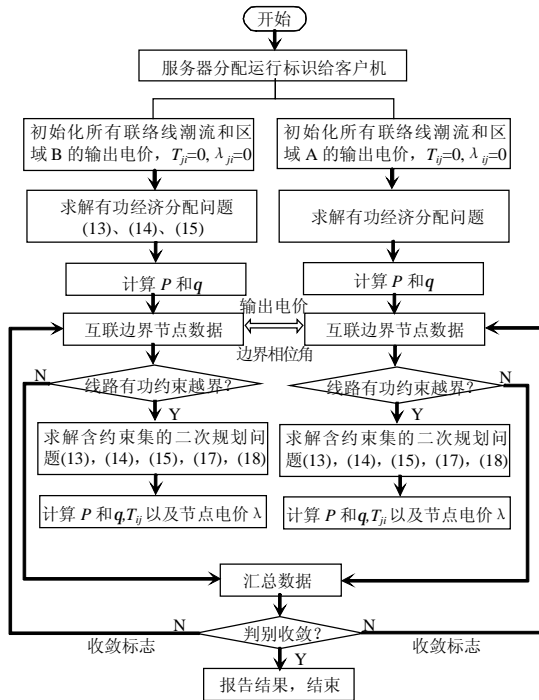


图2 分布并行 OPF 计算流程图

Fig. 2 Flowchart of distributed parallel computation

4 算例分析

根据本文所提出的数学模型和计算方法，分别对标准测试系统 IEEE RTS-96^[16]的多个测试系统进行了研究，各个系统实验数据见表 1。

本文采用 VC++6.0 编程，辅助 IMSL C 5.5 标准库函数^[17]，使用并行虚拟机 (parallel virtual machine, PVM) 软件^[18]建立并行计算环境来求解互联电网直流最优潮流问题。获得的数值结果如表 2 所示。其中的迭代次数表示为了获得全网一致的 OPF 解算法外层迭代(即互换边界数据)的次数。

表 1 RTS-96 测试数据参数

Tab. 1 Characteristics of test systems

编号	系统名称	分区数	母线数	联络线数	边界点数	支路数
1	RTS96-2	2	48	3	6	76
2	RTS96-3	3	73	5	10	115
3	RTS96-4	4	97	7	14	128

从表 2 测试系统的数值结果来看，随着分区数的增加，数据交换越来越频繁，迭代次数将增多，但随着计算规模的不断增大，系统计算时间并没有成倍地增加，从而说明本算法具有较好的鲁棒性。以 3 个区域互联的 IEEE RTS-96 互联电网系统为例，对以下 4 种算法进行比较：

(1) 算法 a 为应用本文算法，在单机上进行伪

并行计算。

(2) 算法 b 为应用本文算法，在 3 台客户机和一台服务器上进行分布式并行优化。

(3) 算法 c 为文献[15]所提出的分布式并行 DC-OPF 算法。

(4) 算法 d 为文献[2]使用的分布式求解 AC-OPF 算法。

表 2 测试系统的数值结果

Tab. 2 Numerical results for test cases

测试系统	算法	迭代次数	计算时间/s
RTS96-2	未分解	10	0.0781
	分解后	7	0.0650
RTS96-3	未分解	14	0.090
	分解后	16	0.081
RTS96-4	未分解	25	0.350
	分解后	28	0.120

表 3 不同算法的比较

Tab. 3 Comparison of different algorithm

算法	计算模型	计算时间/s
a	DC-OPF	0.155
b	DC-OPF	0.081
c	DC-OPF	0.094
d	AC-OPF	3.3

表 4 使用该算法得到的 RTS-96 的 3 个区域发电机组出力调整

Tab. 4 Generator output adjustment by algorithm given in this paper

母线编号	101	102	107	113	115	116	118	121	122	123
区域 A 初始出力/MW	183.6	183.6	186	399	167	155	400	400	300	660
区域 A 调整后出力/MW	183.6	183.6	200.1	354.12	167	155	400	400	300	660
区域 B 初始出力/MW	81.6	81.6	75	207	167	155	400	400	300	612.9
区域 B 调整后出力/MW	78.96	79.94	103.32	206.85	167	155	400	400	300	651.01
区域 C 初始出力/MW	183.6	183.6	186	400.5	167	155	400	400	300	660
区域 C 调整后出力/MW	183.6	183.6	294.57	260.73	167	155	400	400	300	660

算法 a, b 中使用的机器配置相同，收敛精度 ϵ 取 0.01MW。比较结果见表 3，从表 3 中可以看出使用本文所提算法的计算加速比为 2.26，并行效率为 75.3%。与并行算法相比，算法 a 的伪并行算法在求解小型系统的最优潮流问题所用的时间相差不大，其中主要的原因在于当并行求解小型系统时，各个处理器的通讯时间与单个处理器的处理时间接近。所以对于较大的系统，并行算法使用多个处理器进行协同优化有良好的前景，并且分布式并行处理也符合多个区域电网联网的现状。由于在 RTS-96 系统中，同 1 条母线处有多个发电机并联，故采用经济分配意义下的等值发电机理论，把同 1 条母线

处的发电机出力汇总到母线处，如表 4 所示。

5 结论和展望

本文建立了基于互联电网的分区 OPF 分解协调模型，采用部分对偶理论对优化问题进行了等价分解，提出了分布式并行 DC-OPF 算法，所提的算法有以下几个优点：

(1) 所提的分解模型不需要区域外的数学模型；不需要增加虚拟母线或虚拟发电机。

(2) 少量数据的交换和传输在本区域和毗邻区域之间完成，突破了数据传输的瓶颈。

(3) 采用完全的分布式并行处理，提高了系统的可靠性和快速性；为在线进行大区联网系统的安全分析和输电阻塞创造了条件。

(4) 提高了在线最优潮流计算的效率，并可获得在计算中的取得的有用的信息。

(5) 采用该方法，所有区域市场独立调度员可以与其他区域的调度员相互协同优化。

数值实验表明，该算法适合大区电网互联后在线分布式动态 OPF 计算。该算法具有较好的鲁棒性和收敛性，显示了大规模电力系统优化的良好前景，符合电网市场化发展的方向。

参考文献

- [1] 李国庆, 王成山, 余贻鑫. 大型互联电力系统区域间功率交换能力研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(4): 20-25.
Li Guoqing, Wang Chengshan, Yu Yixin. A survey on transmission transfer capability of interconnected electric power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4): 20-25(in Chinese).
- [2] Ross Baldick, Balho H. Kim, A Fast Distributed Implementation of Optimal Power Flow[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1999, 14(3): 858-864.
- [3] 张海波, 张伯明, 孙宏斌. 基于异步迭代的多区域互联系统动态潮流分解协调计算[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(24): 1-6.
Zhang Haibo, Zhang Boming, Sun Hongbin. A decomposition and coordination dynamic power flow calculation for multi-area interconnected system based on asynchronous iteration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(24): 1-6(in Chinese).
- [4] Kim B H, Baldick R. Coarse-grained distributed optimal power flow[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1997, 12(2): 932-939.
- [5] Baldick R, Kim B H, Chase C. A fast distributed implementation of optimal power flow[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1999, 14(3): 858-864.
- [6] Conejo A J, Aguado J A. Multi-area coordinated decentralized DC optimal power flow[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1998, 13(4): 1272-1278.
- [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 Xingong, Li Jiwen, et al. Multi-objective distributed parallel reactive power optimization based on subarea division of the power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 109-113(in Chinese).
- [8] Wang X, Song YH, Lu Q. Lagrangian decomposition approach to active power congestion management across interconnected regions[J]. IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, 2001, 148(5): 497-503.
- [9] Biskas P N, Bakirtzis A G. Decentralised congestion management of interconnected power systems[J]. IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(4): 432-438.
- [10] Nogales F J, Prieto F J, Conejo A J. Multi-area ac optimal power flow: a new decomposition approach in: proceedings of the 13th power system computer conference [C]. Trondheim, Norway. 1999, 1201-1206.
- [11] A G Bakirtzis, P N Biskas. A decentralized solution to the DC-OPF of interconnected power systems[J]. IEEE Trans. on Power System, 2003, 18(3): 1007-1013.
- [12] 王兴, 宋永华, 卢强. 多区域输电阻塞管理的拉格朗日松弛分解算法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(13): 8-13.
Wang X, Song Y H, Lu Q. Lagrangian relaxation based multi-region transmission on congestion management[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(13): 8-13(in Chinese).
- [13] 默哈莫德·夏班, 刘浩明, 李卫星等. 静态安全约束下基于 Benders 分解算法可用传输容量计算[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 7-11.
Mohamed Shaaban, Liu Haoming, et al. ATC calculation with static security constraints using benders decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 7-11(in Chinese).
- [14] Shmuel S Oren, Andrew M Ross. Economic congestion relief across multiple regions requires tradable physical flow-gate rights[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2002, 17(2): 159-165.
- [15] P N Biskas, A G Bakirtzis. A decentralized implementation of DC optimal power flow on a network of computers[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2004, 26(13): 8-13.
- [16] C Grigg, P Wong, P Albrecht, et al. The IEEE reliability test system-1996[J]. IEEE Trans. on Power System., 1999, 14(3): 1010-1020.
- [17] IMSL C Math Library. Available on-line at [\(2005-2-1\)\[2005-3-5\]](http://www.vni.com.cn).
- [18] PVM-Parallel Virtual Machine software. Available on-line at [\(1997-11-8\)\[2005-1-3\]](http://www.Epm.ornl.gov/pvm/pvm_home.html).

收稿日期: 2006-01-13。

作者简介:

刘科研(1978—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统分布式优化与计算, liukeyan@asee.buaa.edu.cn;

盛万兴(1965—), 男, 教授级高工, 从事电力系统自动化、电力信息技术研究与管理工作;

李运华(1963—), 教授, 博士生导师, 主要研究方向机电控制与自动化, 运动体电子液压控制, 机电网络控制与综合管理等。

(责任编辑 喻银凤)