

基于电网分区的多目标分布式并行无功优化研究

程新功, 厉吉文, 曹立霞, 刘雪连

(山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

MULTI-OBJECTIVE DISTRIBUTED PARALLEL REACTIVE POWER OPTIMIZATION BASED ON SUBAREA DIVISION OF THE POWER SYSTEMS

CHENG Xin-gong, LI Ji-wen, CAO Li-xia, LIU Xue-lian

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

ABSTRACT: To solve the bottle-neck problem caused by the centralized parallel reactive power optimization, the multi-objective decomposition-coordination model based on subarea division is proposed, and the auxiliary problem principle is used in parallel processing. The multi-objective reactive power optimization of the whole system can be decomposed into several multi-objective parallel optimizations of subsystems. The subarea division based optimization accords with the needs of power market development. The simulation shows this algorithm is fast and has a good convergence property.

KEY WORDS: Power system; Subarea division; Multi-objective; Decomposition-coordination model; Auxiliary problem principle; Distributed parallel reactive power optimization

摘要: 针对集中式并行无功优化的瓶颈问题, 建立了基于电网分区的多目标分解协调模型, 并采用辅助问题原理(APP)进行分布式并行计算, 将全网的多目标无功优化问题分解为多个子网的多目标并行优化问题; 基于地域的系统分解与协调符合电网市场化发展的方向。仿真结果表明, 本算法具有较强的收敛性和快速性。

关键词: 电力系统; 电网分区; 多目标; 分解协调模型; 辅助问题原理; 分布式并行无功优化

1 引言

随着电力系统规模的不断扩大和对在线分析与控制要求的不断提高, 采用串行算法分析计算较大型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难问题。而并行算法可以充分发挥机群的优势, 以较低的成本和较快的速度完成以往需要大型计算机来完成的工作。目前并行算法已在潮流计算^[1]、暂态稳定分析^[2]、静态安全评估^[3]等方面得到了应用。但在电力系统无功优化方面, 仍达不到实用化的

要求。因为从控制角度考虑, 现有的并行算法是首先将分布采集的数据集中传给中央主机, 由主机分配任务给多台从机并行计算, 再将计算结果集中分发给执行系统, 这种算法被称为集中式并行算法。集中式并行算法存在着数据上传和命令下发的瓶颈问题, 减慢了整体计算速度和实时控制速度。

基于电网分区和辅助问题(Auxiliary Problem Principle, APP)的分解-协调并行优化算法, 最早应用于日发电计划优化^[4]和分布式最优潮流计算^[5~10]中。该算法适合于广泛地理分布的数据采集和传输系统中, 不需要集中的数据上传和命令下发。本文将进一步扩展应用于求解多目标分布式无功优化问题, 从减小计算规模的角度出发, 对整个电网进行分区, 将全网的多目标无功优化问题分解为多个子网的多目标无功优化问题, 对多个子网进行分布式并行计算, 加快了收敛速度, 提高了无功优化控制的实时性。为此, 本文做了如下工作:

(1) 采用分解协调法进行电网分区, 生成了地域分布式的多目标分解协调模型。

(2) 将电力系统的多目标无功优化问题转化成多个分区的多目标并行优化问题。

(3) 采用 APP 实现分布式多目标无功优化并行计算。

2 通用多目标无功优化数学模型

为论述方便, 本文以网损最小和电压质量最好的无功优化问题为例进行讨论, 其通用的模型为

$$\begin{cases} \min F(x) = [f_1(x), f_2(x)]^T \\ \text{s.t. } x \in X^f \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{式中} \quad f_1(\mathbf{x}) = \sum_{i \in N_G} P_{Gi} - \sum_{i \in N_D} P_{Di} \quad (2)$$

$$f_2(\mathbf{x}) = \sum_{i \in N_D} \left(\frac{V_i - V_i^{\text{spec}}}{\Delta V_i^{\text{max}}} \right)^2 \quad (3)$$

$$\text{可行域} \quad \mathbf{X}^f = \left\{ \mathbf{x} \in \mathbf{R}^n \left| \begin{array}{l} \mathbf{h}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0} \\ \mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \end{array} \right. \right\}$$

其中 V_i 为节点 i 的电压幅值; V_i^{spec} 表示节点 i 上的指定电压幅值; ΔV_i^{max} 表示在节点上允许的最大电压偏差; P_{Gi} 表示母线 i 上的有功发电量; P_{Di} 表示母线 i 上的有功用电量; N_G 表示发电机节点数; N_D 表示负荷节点数; $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ 为潮流方程等式约束; $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ 为不等式约束。

本文从计算的角度出发, 将上述方程的约束写成隐式形式为

$$\min_{\mathbf{x} \in \mathbf{X}^f} F(\mathbf{x}) \quad (4)$$

3 基于电网分区的多目标分解协调模型

3.1 分解协调法

分解协调法^[5]的思想是通过“复制”边界节点将一个系统直接分解成多个子系统, 各个子系统相对独立, 仅靠交换边界节点数据来进行协调。

对典型的分解协调方法——2 分区模型描述如下:

电网 S 的 2 个子系统 X_1 、 X_2 通过边界节点 X_b 互连, 相连的支路称为联络线支路, 如图 1(a) 所示。“复制”边界节点 X_b 进行网络分离, 如图 1(b) 所示。

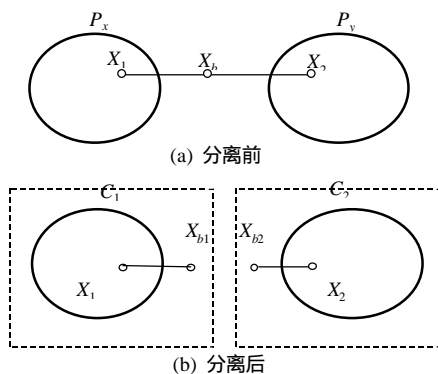


图1 互联电力系统的分离

Fig. 1 The decomposition of interconnected systems

用 $X_{bi}(i=1,2)$ 表示各子系统的“复制”边界节点, $C_i(i=1,2)$ 表示分离后的每一个分区, 用 E 表示所有分区的集合, 即 $E=\{C_i(i=1,2)\}$, 则以下关系成立:

(1) S 中的每一支路都是 E 中某个 C_i 的内部支路。

(2) E 与 S 应在电气上等值, 因此规定 X_{b1} 和 X_{b2} 在电气上为同一点, 具有相同的电气量, 即 $\mathbf{x}_1 \mathbf{x}_{b1} = (\mathbf{P}_{xb1} \quad \mathbf{Q}_{xb1} \quad \mathbf{V}_{xb1} \quad \mathbf{q}_{xb1})^T$ 与 $\mathbf{x}_2 \mathbf{x}_{b2} = (-\mathbf{P}_{xb2} \quad -\mathbf{Q}_{xb2} \quad \mathbf{V}_{xb2} \quad \mathbf{q}_{xb2})^T$ 相等。其中 \mathbf{P}_{xbi} 、 $\mathbf{Q}_{xbi}(i=1,2)$ 为边界节点的注入功率, \mathbf{V}_{xbi} 、 $\mathbf{q}_{xbi}(i=1,2)$ 为边界节点的电压幅值和相角。

$$\mathbf{x}_1 = \text{diag}(\mathbf{I}, \mathbf{I}, \mathbf{I}, \mathbf{I}), \quad \mathbf{x}_2 = \text{diag}(-\mathbf{I}, -\mathbf{I}, \mathbf{I}, \mathbf{I})$$

将每一个边界节点看作一个虚拟的发电机节点, \mathbf{x}_{bi} 为第 i 分区虚拟发电机节点的参数变量。虚拟发电机弥补了因对电网的直接分解而造成的潮流不平衡, 并使得 C_i 形成了一个相对独立的子系统。

3.2 多目标无功优化分解协调模型

根据分解协调法, 分析式(1)~(3), 利用各子目标函数 $f_1(\mathbf{x})$ 、 $f_2(\mathbf{x})$ 均为节点参数表达式的特点, 将其改写成如下形式:

$$f_1(\mathbf{x}) = f_{11}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_{b1}) + f_{12}(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_{b2}) \quad (5)$$

$$f_2(\mathbf{x}) = f_{21}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_{b1}) + f_{22}(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_{b2}) \quad (6)$$

式中 $f_{11}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_{b1})$ 、 $f_{12}(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_{b2})$ 分别为目标函数 $f_1(\mathbf{x})$ 分解后得到的各分区的目标函数; $f_{21}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_{b1})$ 、 $f_{22}(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_{b2})$ 分别为目标函数 $f_2(\mathbf{x})$ 分解后得到的各分区的目标函数。且分别表达如下:

$$f_{11}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_{b1}) = \sum_{i \in N_{G1}} P_{Gi} - \sum_{i \in N_{D1}} P_{Di} \quad (7)$$

$$f_{12}(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_{b2}) = \sum_{i \in N_{G2}} P_{Gi} - \sum_{i \in N_{D2}} P_{Di} \quad (8)$$

$$f_{21}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_{b1}) = \sum_{i \in N_{D1}} \left(\frac{V_i - V_i^{\text{spec}}}{\Delta V_i^{\text{max}}} \right)^2 \quad (9)$$

$$f_{22}(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_{b2}) = \sum_{i \in N_{D2}} \left(\frac{V_i - V_i^{\text{spec}}}{\Delta V_i^{\text{max}}} \right)^2 \quad (10)$$

式中 N_{G1} 、 N_{G2} 分别为 C_1 、 C_2 分区内的发电机节点数; N_{D1} 、 N_{D2} 分别为 C_1 、 C_2 分区内的负荷节点数。

因此有

$$\begin{aligned} \min_{\substack{\mathbf{q}_1(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_{b1}) \in C_1 \\ \mathbf{q}_2(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_{b2}) \in C_2}} F(\mathbf{x}) &= [f_{11}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_{b1}) + f_{12}(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_{b2}), \\ &\quad f_{21}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_{b1}) + f_{22}(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_{b2})]^T = \\ &\quad \min_{\substack{\mathbf{q}_1(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_{b1}) \in C_1 \\ \mathbf{q}_2(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_{b2}) \in C_2}} ([f_{11}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_{b1}), f_{21}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_{b1})]^T + \\ &\quad [f_{12}(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_{b2}), f_{22}(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_{b2})]^T) \end{aligned} \quad (11)$$

若令 $\mathbf{F}_1(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_{b1}) = [f_{11}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_{b1}), f_{21}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_{b1})]^T$, $\mathbf{F}_2(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_{b2}) = [f_{12}(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_{b2}), f_{22}(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_{b2})]^T$ 分别为分区 C_1 、 C_2 中的目标函数, 则可得到多目标无功优化分解协调模型。

带隐式约束的目标函数为

$$\min_{\substack{\mathbf{Q}_1(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_{b1}) \in C_1 \\ \mathbf{Q}_2(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_{b2}) \in C_2}} F(\mathbf{x}) = F_1(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_{b1}) + F_2(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_{b2}) \quad (12)$$

边界约束为

$$\mathbf{q}(\mathbf{x}) = \mathbf{x}_1 \mathbf{x}_{b1} - \mathbf{x}_2 \mathbf{x}_{b2} = \mathbf{0} \quad (13)$$

式中 $\mathbf{Q}_1(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_{b1}) \in C_1$, $\mathbf{Q}_2(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_{b2}) \in C_2$ 分别为分区 C_1, C_2 内的等式及不等式约束, $\mathbf{x} = (\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_{b1}, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_{b2})^T$ 。

由此可见, 应用分解协调法, 全网的多目标优化函数可简写为各个分区的多目标优化函数之和。

上述分解协调模型仍然是十分复杂的, 因为它不仅包含了多目标信息, 还包含了分区的信息, 重要的是由于产生了新的约束式(13), 使得优化计算无法直接在 2 个分区内各自独立地完成。

针对这个问题, 可采用 APP 来实现对多目标分解协调模型的并行计算。

4 基于辅助问题原理的并行无功优化

4.1 辅助问题原理(APP)

APP 算法^[11]将一个复杂的大问题分解为一系列辅助问题加以解决。采用 APP 求解函数 $L(\mathbf{x}, \mathbf{I})$ 的鞍点问题的基本算法如下:

为使算法具有通用性, 将 $L(\mathbf{x}, \mathbf{I})$ 看作由 $L_1(\mathbf{x}, \mathbf{I})$ 和 $J_2(\mathbf{x})$ 两部分组成。即:

$$L(\mathbf{x}, \mathbf{I}) = L_1(\mathbf{x}, \mathbf{I}) + J_2(\mathbf{x})$$

式中 $L_1(\mathbf{x}, \mathbf{I})$ 可微, $J_2(\mathbf{x})$ 不一定可微。

若能构造出一辅助问题 $G(\mathbf{x}, \mathbf{I}) + \mathbf{e}J_2(\mathbf{x})$, 当 $G'(\mathbf{x}^*, \mathbf{I}^*) = \mathbf{e}L'_1(\mathbf{x}^*, \mathbf{I}^*)$ 时, 原问题可以转化为求解 $G(\mathbf{x}, \mathbf{I}) + \mathbf{e}J_2(\mathbf{x})$ 的鞍点问题, 其中 $G(\mathbf{x}, \mathbf{I})$ 被称为辅助函数。

APP 算法具有对某一问题的并行解决机制, 因为在 \mathbf{x} 以及 $J_2(\mathbf{x})$ 可以被分解的前提下, 只要构造出适当的 $G(\mathbf{x}, \mathbf{I})$, 就可以加以并行地解决。关于具体的 APP 算法请参阅文[11], 这里不再赘述。

4.2 基于 APP 的并行无功优化方法

根据分解协调模型, 本文所述的两目标函数具有完全相同的可行域和边界约束, 因此, 先分别推导目标 $f_1(\mathbf{x})$ 、 $f_2(\mathbf{x})$ 在两分区中的 APP 并行优化过程, 然后将两目标综合, 得到多目标的并行优化算法。本文采用通用增广拉格朗日法和 APP 相结合的方式优化计算。

目标 $f_1(\mathbf{x})$ 的并行优化为

$$\min_{\mathbf{x} \in X^f} f_1(\mathbf{x}), \quad \mathbf{q}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad (14)$$

若令 $\mathbf{j} = [\mathbf{0} \quad \mathbf{x}_1 \quad \mathbf{0} \quad -\mathbf{x}_2]$, 则 $\mathbf{q}(\mathbf{x})$ 可被简写成 $\mathbf{q}(\mathbf{x}) = \mathbf{j}\mathbf{x}$ 的形式。构造增广拉格朗日函数

$$L(\mathbf{x}, \mathbf{I}) = f_1(\mathbf{x}) + \langle \mathbf{I}, \mathbf{q}(\mathbf{x}) \rangle + (c/2) \langle \mathbf{q}(\mathbf{x}), \mathbf{q}(\mathbf{x}) \rangle \quad (15)$$

式中 \mathbf{I} 为拉格朗日乘子矩阵; c 为罚因子。则求式(14)最优解的问题转化为求解式(15)的鞍点问题。

令 $f_1(\mathbf{x}) = J_1(\mathbf{x}) + J_2(\mathbf{x})$, 其中 $J_1(\mathbf{x})$ 可微, $J_2(\mathbf{x})$ 不一定可微, 则 $L(\mathbf{x}, \mathbf{I})$ 可写为

$$L(\mathbf{x}, \mathbf{I}) = L_1(\mathbf{x}, \mathbf{I}) + J_2(\mathbf{x}) \quad (16)$$

式中

$$L_1(\mathbf{x}, \mathbf{I}) = J_1(\mathbf{x}) + \langle \mathbf{I}, \mathbf{q}(\mathbf{x}) \rangle + \frac{c}{2} \langle \mathbf{q}(\mathbf{x}), \mathbf{q}(\mathbf{x}) \rangle \quad (17)$$

在第 k 次迭代中, 构造辅助函数

$$G^{(\mathbf{x}^k, \mathbf{I}^k)}(\mathbf{x}, \mathbf{I}) = \mathbf{Y}(\mathbf{x}, \mathbf{I}) + \langle \mathbf{e}L'_1(\mathbf{x}^k, \mathbf{I}^k) - \mathbf{Y}'(\mathbf{x}^k, \mathbf{I}^k), \begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{I} \end{pmatrix} \rangle \quad (18)$$

式中 $\mathbf{e} > 0$; $\mathbf{Y}(\mathbf{x}, \mathbf{I})$ 为核函数, 构造为

$$\mathbf{Y}(\mathbf{x}, \mathbf{I}) = \mathbf{e}b/2 \langle \mathbf{x}, \mathbf{x} \rangle - 1/2 \langle \mathbf{I}, \mathbf{I} \rangle \quad (19)$$

式中 $b > 0$ 。

将 $L_1(\mathbf{x}, \mathbf{I})$ 、 $\mathbf{Y}(\mathbf{x}, \mathbf{I})$ 带入式(18), 整理得

$$G^{(\mathbf{x}^k, \mathbf{I}^k)}(\mathbf{x}, \mathbf{I}) = \mathbf{e} \frac{b}{2} \langle \mathbf{x}, \mathbf{x} \rangle - \frac{1}{2} \langle \mathbf{I}, \mathbf{I} \rangle + \langle \mathbf{e} \frac{\partial J_1}{\partial \mathbf{x}}(\mathbf{x}^k), \mathbf{x} \rangle + \langle \mathbf{e} \mathbf{c} \mathbf{f}^T \mathbf{q}(\mathbf{x}^k) - \mathbf{e} b \mathbf{x}^k, \mathbf{x} \rangle + \langle \mathbf{e} \langle \mathbf{I}^k, \mathbf{q}(\mathbf{x}) \rangle + \langle \mathbf{e} \mathbf{q}(\mathbf{x}^k) + \mathbf{I}^k, \mathbf{I} \rangle \quad (20)$$

则根据 APP, 在第 k 次迭代中, 求解 $L(\mathbf{x}, \mathbf{I})$ 的鞍点问题相当于交替求解以下极小值和极大值问题:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^{k+1} = \arg \min_{\mathbf{x} \in X^f} \{ & \mathbf{e} \frac{b}{2} \langle \mathbf{x}, \mathbf{x} \rangle - \langle \mathbf{e} b \mathbf{x}^k, \mathbf{x} \rangle + \\ & \langle \mathbf{e} \frac{\partial J_1}{\partial \mathbf{x}}(\mathbf{x}^k), \mathbf{x} \rangle + \mathbf{e} \langle \mathbf{I}^k + \mathbf{c} \mathbf{q}(\mathbf{x}^k), \mathbf{q}(\mathbf{x}) \rangle + \\ & \mathbf{e} J_2(\mathbf{x}) \} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\mathbf{I}^{k+1} = \arg \max_{\mathbf{I}} \{ -\frac{1}{2} \langle \mathbf{I}, \mathbf{I} \rangle + \langle \mathbf{e} \mathbf{q}(\mathbf{x}^{k+1}) + \mathbf{I}^k, \mathbf{I} \rangle \} \quad (22)$$

令 \mathbf{e} 在求极小值和极大值问题过程中分别取 $\mathbf{e} = \mathbf{e}_1 = 1$ 和 $\mathbf{e} = \mathbf{e}_2$ 。考虑到 $J_2(\mathbf{x})$ 比 $J_1(\mathbf{x})$ 在定义上更具有—般性, 令 $J_1(\mathbf{x}) = 0$, 则由式(5)可知

$$f_1(\mathbf{x}) = J_2(\mathbf{x}) = f_{11}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_{b1}) + f_{12}(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_{b2})。$$

整理式(21)、(22)得

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^{k+1} = \arg \min_{\mathbf{x} \in X^f} \{ & \frac{1+b}{2} \mathbf{x}_1^T \mathbf{x}_1 + \frac{1+b}{2} \mathbf{x}_2^T \mathbf{x}_2 + \\ & \frac{1+b}{2} \mathbf{x}_{b1}^T \mathbf{x}_{b1} + \frac{1+b}{2} \mathbf{x}_{b2}^T \mathbf{x}_{b2} - \\ & (1+b) \mathbf{x}_1^{kT} \mathbf{x}_1 - (1+b) \mathbf{x}_2^{kT} \mathbf{x}_2 - \\ & (1+b) \mathbf{x}_{b1}^{kT} \mathbf{x}_{b1} - (1+b) \mathbf{x}_{b2}^{kT} \mathbf{x}_{b2} + \\ & \langle \mathbf{I}^k + \mathbf{c}(\mathbf{x}_1 \mathbf{x}_{b1}^k - \mathbf{x}_2 \mathbf{x}_{b2}^k), (\mathbf{x}_1 \mathbf{x}_{b1} - \mathbf{x}_2 \mathbf{x}_{b2}) \rangle + \\ & f_{11}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_{b1}) + f_{12}(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_{b2}) \} \end{aligned} \quad (23)$$

$$\mathbf{I}^{k+1} = \mathbf{I}^k + \mathbf{e}_2 \mathbf{q}(\mathbf{x}^{k+1}) \quad (24)$$

由电力系统分解协调模型, $\mathbf{x} \in X^f$ 构成的空间可以被分解成 $(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_{b1}) \in \mathbf{Q}_1$ 和 $(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_{b2}) \in \mathbf{Q}_2$; $f_1(\mathbf{x})$ 可以被分解成 $f_{11}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_{b1})$ 和 $f_{12}(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_{b2})$; 因此, 分解式(23), 可以得到目标 $f_1(\mathbf{x})$ 的并行算法。

首先令 $\mathbf{b} = 1 + \mathbf{b}$, 然后按以下步骤进行:

(1) 设置初值, 令 $k = 0$

(2) 对第 i 个分区, 采用(25)进行计算

$$\begin{aligned} (\mathbf{x}_i^{k+1}, \mathbf{x}_{bi}^{k+1}) = \arg \min_{\mathbf{q}_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{bi}) \in C_i} \{ & f_{li}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{bi}) + \\ & \frac{\mathbf{b}}{2} \mathbf{x}_i^T \mathbf{x}_i + \frac{\mathbf{b}}{2} \mathbf{x}_{bi}^T \mathbf{x}_{bi} - \mathbf{b} \mathbf{x}_i^T \mathbf{x}_{bi} - \mathbf{b} \mathbf{x}_{bi}^T \mathbf{x}_{bi} + \\ & [\mathbf{I}^k + c(\mathbf{x}_1 \mathbf{x}_{b1}^k - \mathbf{x}_2 \mathbf{x}_{b2}^k)]^T \mathbf{q} \mathbf{x}_i \mathbf{x}_{bi} \} = \\ & \arg \min_{\mathbf{q}_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{bi}) \in C_i} \{ f_{li}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{bi}) + f_{\text{APP}_i}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{bi}, \mathbf{I}^k) \} \quad (25) \end{aligned}$$

$$\text{式中 } i=1, 2, \quad q = \begin{cases} 1, & i=1 \\ -1, & i=2 \end{cases};$$

(3) 所有分区运算完成后, 两相邻分区之间交换 \mathbf{x}_{b1}^{k+1} 、 \mathbf{x}_{b2}^{k+1} , 并采用式(26)更新 \mathbf{I}^{k+1} ;

$$\mathbf{I}^{k+1} = \mathbf{I}^k + \mathbf{e}_2(\mathbf{x}_1 \mathbf{x}_{b1}^{k+1} - \mathbf{x}_2 \mathbf{x}_{b2}^{k+1}) \quad (26)$$

(4) 当 $\|\mathbf{x}_{b1}^{k+1} - \mathbf{x}_{b2}^{k+1}\|$ 小于某一阈值时, 停止迭代, 否则转至(2)。

对目标函数 $f_2(\mathbf{x})$ 来说, 也有相同的推导过程和算法, 只是存在不同的 \mathbf{e}_2 、 \mathbf{I} 、 \mathbf{b} 、 c 而已。因此在某一分区 i 中, 多目标的 APP 可以写成

$$\begin{aligned} (\mathbf{x}_i^{k+1}, \mathbf{x}_{bi}^{k+1}) = \arg \min_{\mathbf{q}_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{bi}) \in C_i} \left\{ \begin{aligned} & f_{li}(\mathbf{x}_i) + f_{\text{APP}_{li}}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{bi}, \mathbf{I}_1^k) \\ & f_{2i}(\mathbf{x}_i) + f_{\text{APP}_{2i}}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{bi}, \mathbf{I}_2^k) \end{aligned} \right\} = \\ \arg \min_{\mathbf{q}_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{bi}) \in C_i} \left\{ \begin{aligned} & J_{1i}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{bi}, \mathbf{I}_1^k) \\ & J_{2i}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{bi}, \mathbf{I}_2^k) \end{aligned} \right\} \quad (27) \end{aligned}$$

分区间的数据交换为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_1^{k+1} \\ \mathbf{I}_2^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_1^k \\ \mathbf{I}_2^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{21}(\mathbf{x}_1 \mathbf{x}_{b1}^{k+1} - \mathbf{x}_2 \mathbf{x}_{b2}^{k+1}) \\ \mathbf{e}_{22}(\mathbf{x}_1 \mathbf{x}_{b1}^{k+1} - \mathbf{x}_2 \mathbf{x}_{b2}^{k+1}) \end{bmatrix} \quad (28)$$

可通过建立分解协调模型和采用 APP 算法将全网的多目标优化问题转化为并行求解各个分区的多目标优化问题。在第 k 次迭代中, 第 i 分区的优化目标函数为 $J_{1i}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{bi}, \mathbf{I}_1^k)$ 和 $J_{2i}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{bi}, \mathbf{I}_2^k)$ 。

对于每一分区的多目标优化问题, 可以采用现有的计算方法将其转化成普通的单目标优化问题加以解决。本文采用交互式模糊满足法^[12] (Interactive Fuzzy Satisfying Method) 来实现优化计算。

4.3 多目标无功优化步骤

由上所述, 我们可以得到完整的全网多目标无功优化的计算步骤如下:

(1) 电网分区, 采用式(12)和(13)构成的分解协调模型将电网分解为数个分区。考虑到一个电网中只能有一个平衡节点, 在将电网分区以后, 各个分区的电压参考点的选择可以参见文[8]。

(2) 并行计算

1) 根据式(27)将电网的多目标优化问题转化为各个分区内的多目标并行优化问题。

2) 采用交互式模糊满足法将分区内的多目标优化问题转化为单目标优化问题, 并求解出 $(\mathbf{x}_i^{k+1}, \mathbf{x}_{bi}^{k+1})$ 。

(3) 数据交换, 各相邻分区根据式(28)交换边界节点数据, 更新 \mathbf{I}^{k+1} 。

(4) 当 $\|\mathbf{x}_{b1}^{k+1} - \mathbf{x}_{b2}^{k+1}\|$ 小于某一阈值时停止迭代, 否则转至(2)。

由以上的算法步骤可以看出, 本算法的数据交换只发生在相邻分区之间, 实现了各分区子模型之间的分布式数据交换和分布式优化。算法的速度在一定程度上依赖于所交换的数据流量。因为相邻分区之间所要交换的数据只有 \mathbf{x}_{bi}^{k+1} , 且通常情况下 \mathbf{x}_b 的规模远远小于各子网内 \mathbf{x}_i 的规模, 从而使各区之间的通信时间缩短。

5 算例

本文采用 matlab 编程, 以多微机+PVM 模拟分布式运行环境, 用 Erland Svahn 等编写的 PM 工具箱作为上层通讯软件。选取 4 个实验系统, 各系统的基本情况见表 1。

实验中选取各参数均为 $c_1 = c_2 = 0.8$, $\mathbf{b}_1 = \mathbf{b}_2 = 1.45$, $\mathbf{e}_{21} = \mathbf{e}_{22} = 0.8$, 收敛精度为 0.01pu。两系统基本情况如表 1 所示。 $\|\mathbf{x}_{b1}^{k+1} - \mathbf{x}_{b2}^{k+1}\|$ 的收敛曲线如图 2 所示。由图 2 可知, 由于拉格朗日 2 次项的作用, 算法收敛速度很快。实验 1、2 均在第 6 次迭代时达到了 0.05pu 以内, 实验 3 在第 18 次迭代时达到 0.05pu, 实验 4 在第 25 次迭代时达到 0.05pu。对比可见, 总的迭代次数与实验系统的节点数关系不大, 而主要与分区数有关。另外实验 3 在第 5~11 次迭代中出现较大波动, 是由于在第 5~7 次迭代中出现了分区目标函数不收敛的情况所致, 但这种情况在后续的迭代中因 \mathbf{I}^k 的更新而被很快修正, 说明该算

法具有较强的收敛能力。

表 1 试验系统分区情况
Tab. 1 The subarea division information of 4 test cases

实验编号	系统名称-分区数	内部节点数	边界节点数
1	IEEE30-2	11,16	3
2	IEEE118-2	34,80	4
3	IEEE118-3	34,46,32	6
4	IEEE118-4	34,9,36,32	7

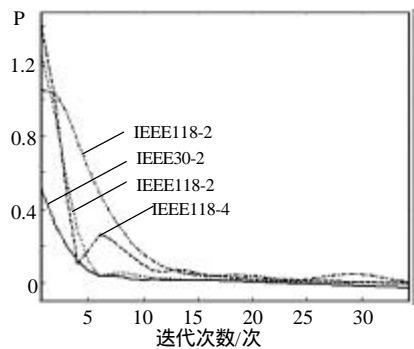


图 2 4 次实验的收敛曲线
Fig. 2 The convergence curves of 4 test cases

将实验 2、3、4 与 IEEE118 系统不分区优化结果进行比较,得到表 2。由表 2 可以看到,随着分区数量的增加,数据交换越来越频繁,导致迭代次数不断增多,但因为各个分区规模的减小,使总的计算时间仍不断减少。同时也可以看到,计算效率提高的幅度随着分区数量的增多不断降低,这主要是因为分区数量的增多导致某一个分区需要同时和更多个相邻分区交换数据,增加了数据交换的时间。这说明对某一系统总有一最佳分区方案,使得多目标并行无功优化速度最快。

表 2 分区数对优化计算的影响
Tab. 2 The effect of the number of subareas on the optimizations

分区数	总迭代次数	多机通讯时间%	总计算时间/s	提高效率/%
1	-	0	117.89	0
2	18	1.5	81.93	30.50
3	28	5.7	72.40	38.59
4	35	11.4	67.55	42.70

6 结论

本算法实现了将电力系统的多目标无功优化问题转化为各个分区的多目标并行优化问题,具有如下特点:

(1) 多目标无功优化本身具有极大的实用意义,而将分解协调法和辅助问题原理用于并行无功优化,又大大加快了优化计算的速度,使算法更加实用化。

(2) 可实现基于地域的系统分解与协调。实际的分区可与不同地区的电网结构紧密结合起来,符合电网市场化的发展方向。

(3) 各分区不需要区外详细的数学模型并可根据实际情况自主选择各自的优化算法。

(4) 数据的传输均在本区和临近区域内完成,突破了数据传输瓶颈,实现了完全分布式并行计算,提高了实时控制的快速性。

参考文献

[1] 薛巍, 舒继武, 王心丰, 等(Xue Wei, Shu Jiwu, Wang Xinfeng, et al). 电力系统潮流并行算法的研究进展(Advance of parallel algorithms for power flow simulation)[J]. 清华大学学报(自然科学版)(Journal of Tsinghua University, Sci&Tech). 2002,42(9): 1192-1199.

[2] 韩晓言, 韩祯祥(Huan Xiaoyan, Han Zhenxiang). 电力系统暂态稳定分析的内在并行算法研究(The research on inherent parallel algorithm for power system transient stability analysis)[J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE). 1997,17(3): 145-148.

[3] 刘天琪, 腾福生(Liu Tianqi, Teng Fusheng). 电网在线安全分析的并行处理方法(The parallel processing method for real-time security analysis of power system)[J]. 成都科技大学学报(Journal of Chengdu University of Science And Technology). 1996,89(1): 29-35.

[4] 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.

[5] Balho H Kim, Ross Baldick. Coarse-grained distributed optimal power flow. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12 (2): 932-939.

[6] Kim B H, Baldick R. A comparison of distributed optimal power flow algorithms[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000,15(2): 599-604.

[7] Hur D, Park J K B, Kim H. Evaluation of convergence rate in the auxiliary problem principle for distributed optimal power flow[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(5): 525-532.

[8] Javier Contreras, Arturo Losi, Mario Russo, et al. Simulation and evaluation of optimization problem solutions in distributed energy management systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(1): 57-62.

[9] Hur D, Park J. K, Kim B. H. On the convergence rate improvement of mathematical decomposition technique on distributed optimal power flow[J]. Int J of Electrical Power & Energy Systems, 2003,25(3): 31-39.

[10] Losi A, Russo M. On the application of the auxiliary problem principle[J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 2003,117(2): 377-396.

[11] Cohen G. Auxiliary problem principle and decomposition of optimization problems[J]. Journal of Optimization Theory and Application, 1980, 32 (3): 277-305.

[12] Chen Y L, Liu C C. Interactive fuzzy satisfying method for optimal multi-objective VAR planning in power systems[J]. IEE Proc-Gener Transm Distrib, 1994, 141 (6): 554-560.

收稿日期: 2003-03-25。

作者简介:

程新功(1973-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统并行无功优化计算;

厉吉文(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统优化控制与无功补偿;

(责任编辑 喻银凤)