

基于对角加边模型的多区域无功优化分解算法

赵维兴, 刘明波, 缪楠林

(华南理工大学电力学院, 广东省广州市 510640)

摘要: 基于对角加边矩阵结构, 提出了一种新的多区域电力系统离散无功优化分解算法。该方法先将电力系统按照一定的规则进行分区, 通过引入虚拟节点构成各区域之间的边界网络, 并采用内嵌离散惩罚的非线性原对偶内点法求解。最终所形成的线性修正方程组的系数矩阵具有对角加边结构。由此提出 2 种分解方法实现各区域修正方程的独立求解, 寻找全系统及其各区域的近最优离散解。以 IEEE 118 节点试验系统和 2 个实际系统(538 节点和 1 133 节点系统)作为算例, 通过对集中优化方法和 2 种分解方法进行比较分析验证了所提出方法的有效性。

关键词: 无功优化; 多区域电力系统; 非线性原对偶内点法; 对角加边矩阵; 区域分解; 离散控制
中图分类号: TM744; TM732

0 引言

随着电力需求日益增加, 电力系统规模不断扩大, 集中优化计算方法在计算速度和内存需求方面均难以满足大电网在线计算和实时控制的要求。高效的分解算法和并行算法^[1-15]的研究已成为该领域的一个发展方向。多区域电力系统最优潮流或无功优化并行算法^[6-14]一般采用分解协调的思想对电网最优运行状态进行无限逼近, 得到近似最优解。具有代表性的 2 类方法是: 基于辅助问题原理的无功优化并行算法^[7-13]和基于近似牛顿方向的并行算法^[14]。前者已有较为成熟的理论框架, 相比同类算法具有分区交换数据量小、迭代次数少等优点, 但其收敛精度和速度仍会受到各种因素的影响, 如边界节点的数量、辅助问题参数的大小等。后者对弱耦合系统的计算具有较强的优势, 但对于强耦合系统, 其在计算过程中仍需从全局对各个区域进行修正协调, 严格讲还没有完全实现区域之间的分解。这些算法通常将系统按实际地理位置分解, 使各区域独立并行求解, 最终能最大程度地模拟和逼近系统的实际最优状态, 同时得到各区域及整个系统的最优解。但大多数算法对可投切电容器出力和可调变压器变比等离散控制变量都作为连续变量来处理, 与实际运行情况存在一定的偏离。

基于对角加边矩阵(block bordered diagonal matrix)模型^[15-18], 本文提出一种新的多区域系统无功优化分解算法。该方法先将系统按照一定的规则

进行分区, 通过引入虚拟节点构成各区域之间的边界网络, 采用内嵌离散惩罚的非线性原对偶内点法求解。最终所形成的线性修正方程组的系数矩阵具有对角加边的结构。由此提出 2 种分解方法实现各区域修正方程的独立求解, 寻找全系统及各区域的近似最优离散可行解。

1 多区域系统离散无功优化模型

首先采用节点分裂法^[16]对电力系统进行分区。以两区域系统为例, 对系统进行分解及边界节点的定义, 如图 1 所示。

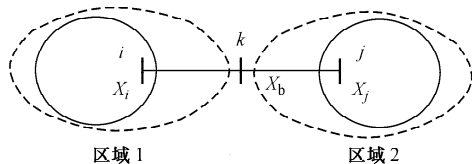


图 1 区域分解示意图

Fig. 1 Schematic diagram of area decomposition

如图 1 所示, 虚线表示区域 1 和区域 2 的边界, 在联络线 $i-j$ 中间插入虚拟节点 k , 并把节点 k 定义为区域 1 与区域 2 之间的边界节点, 则线路 $i-k$ 属于区域 1, 线路 $k-j$ 属于区域 2。

如果将系统划分为 N 个区域, 则多区域系统的无功优化模型可以写成如下形式:

$$\min \sum_{a=1}^N f_a(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N, \mathbf{x}_b) \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \mathbf{g}_a(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N, \mathbf{x}_b) = \mathbf{0} \quad (2)$$

$$\mathbf{g}_b(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N, \mathbf{x}_b) = \mathbf{0} \quad (3)$$

$$\mathbf{x}_{a\min} \leq \mathbf{x}_a \leq \mathbf{x}_{a\max} \quad (4)$$

$$\mathbf{x}_{b\min} \leq \mathbf{x}_b \leq \mathbf{x}_{b\max} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{x}_a$ 为区域 a 的变量列向量, 包括发电无功出力、电容器无功出力、可调变压器变比、节点电压幅值、节点电压相角(对于含平衡节点的区域, 还包括平衡发电机有功出力), 其变量数目为 l_a ; $a=1, 2, \dots, N$; $\mathbf{x}_b$ 为边界节点的变量列向量, 包括节点电压幅值和相角, 其变量数目为 N_c 。

2 多区域分解算法

采用内嵌离散惩罚的非线性原对偶内点法^[19]可方便地求解式(1)~式(5)描述的优化问题。首先引入松弛变量将不等式约束(式(4)和式(5))变为等式约束, 利用拉格朗日乘子将所有等式约束增广到原目标函数中, 通过引入对数壁垒函数确保松弛变量的非负性, 对离散变量构造罚函数并直接增广到目标函数中, 从而构成如下增广拉格朗日函数:

$$\begin{aligned}
 L = & \sum_{a=1}^N f_a(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N, \mathbf{x}_b) - \\
 & \sum_{a=1}^N \mathbf{y}_{ga}^T \mathbf{g}_a(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N, \mathbf{x}_b) - \\
 & \mathbf{y}_{gb}^T \mathbf{g}_b(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N, \mathbf{x}_b) - \\
 & \sum_{a=1}^N \mathbf{y}_{ha}^T (\mathbf{x}_a + \mathbf{s}_{ha} - \mathbf{x}_{amax}) - \\
 & \sum_{a=1}^N \mathbf{y}_{la}^T (\mathbf{x}_a - \mathbf{s}_{la} - \mathbf{x}_{amin}) - \\
 & \mathbf{y}_{mb}^T (\mathbf{x}_b + \mathbf{s}_{mb} - \mathbf{x}_{bmax}) - \\
 & \mathbf{y}_{nb}^T (\mathbf{x}_b - \mathbf{s}_{nb} - \mathbf{x}_{bmin}) - \mu \sum_{a=1}^N \sum_{i=1}^{l_a} \ln s_{ha,i} - \\
 & \mu \sum_{a=1}^N \sum_{i=1}^{l_a} \ln s_{la,i} - \mu \sum_{i=1}^{N_c} \ln s_{mb,i} - \mu \sum_{i=1}^{N_c} \ln s_{nb,i} + \\
 & \frac{1}{2} \sum_{a=1}^N \sum_j v_j (x_{ad,j} - x_{ad,jc})^2
 \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $x_{ad,j}$ 为第 a 个区域的离散变量; $x_{ad,jc}$ 为该离散变量的邻域中心; v_j 为罚因子。

根据 Karash-Kuhn-Tucker 最优性条件, 对式(6)求偏导, 得到非线性方程组, 再用牛顿法求解可得到修正方程^[18]。按区域对所有节点依次编号或按区域依次形成修正方程, 经过排列可得如下简化形式的修正方程组:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_{(1,1)} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{(1,B)} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_{(2,2)} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{(2,B)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{A}_{(N,N)} & \mathbf{A}_{(N,B)} \\ \mathbf{A}_{(B,1)} & \mathbf{A}_{(B,2)} & \cdots & \mathbf{A}_{(B,N)} & \mathbf{A}_{(B,B)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{X}_{(1)} \\ \Delta \mathbf{X}_{(2)} \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{X}_{(N)} \\ \Delta \mathbf{X}_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_{(1)} \\ \mathbf{b}_{(2)} \\ \vdots \\ \mathbf{b}_{(N)} \\ \mathbf{b}_B \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:

$$\begin{aligned}
 \Delta \mathbf{X}_{(i)} &= \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_i \\ \Delta \mathbf{y}_{gi} \end{bmatrix}; \quad \Delta \mathbf{X}_B = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_b \\ \Delta \mathbf{y}_{gb} \end{bmatrix} \\
 \mathbf{A}_{(i,i)} &= \begin{bmatrix} \mathbf{H}_i & \mathbf{J}_i \\ \mathbf{J}_i^T & \mathbf{0} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{A}_{(B,B)} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_B & \mathbf{J}_B \\ \mathbf{J}_B^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} \\
 \mathbf{A}_{(i,B)} &= \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{Bi} & \mathbf{J}_{Bi} \\ \mathbf{J}_{Bi}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$\mathbf{A}_{(B,i)} = \mathbf{A}_{(i,B)}$; $\Delta \mathbf{X}_{(i)}$ 和 $\Delta \mathbf{X}_B$ 分别为各子区域及边界网络的变量修正量, 包括模型(式(1)~式(5))中 $\mathbf{x}_a$ 及潮流约束对应拉格朗日乘子的修正量; $\mathbf{H}$ 和 $\mathbf{J}$ 分别为相应的海森矩阵和雅可比矩阵。

式(7)的详细推导及不等式约束对应的松弛变量和拉格朗日乘子的求解见文献[19]。

2.1 分解算法 1

对大规模系统而言, 式(7)为稀疏的高维线性方程组, 对其快速求解是整个优化计算的核心。式(7)的系数矩阵具有箭型结构, 或称为对角加边矩阵结构。类似的形式在牛顿法潮流^[15-16]和动态最优潮流^[17-18]计算中应用较广泛。

将式(7)展开, 得

$$\mathbf{A}_{(i,i)} \Delta \mathbf{X}_{(i)} + \mathbf{A}_{(i,B)} \Delta \mathbf{X}_B = \mathbf{b}_{(i)} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^N \mathbf{A}_{(B,i)} \Delta \mathbf{X}_{(i)} + \mathbf{A}_{(B,B)} \Delta \mathbf{X}_B = \mathbf{b}_B \quad (9)$$

由式(8)和式(9)消去 $\Delta \mathbf{X}_{(i)}$, 得

$$\begin{aligned}
 & \left(\mathbf{A}_{(B,B)} - \sum_{i=1}^N \mathbf{A}_{(B,i)} \mathbf{A}_{(i,i)}^{-1} \mathbf{A}_{(i,B)} \right) \Delta \mathbf{X}_B = \\
 & \mathbf{b}_B - \sum_{i=1}^N \mathbf{A}_{(B,i)} \mathbf{A}_{(i,i)}^{-1} \mathbf{b}_{(i)}
 \end{aligned} \quad (10)$$

令

$$\mathbf{K} = \mathbf{A}_{(B,B)} - \sum_{i=1}^N \mathbf{A}_{(B,i)} \mathbf{A}_{(i,i)}^{-1} \mathbf{A}_{(i,B)} \quad (11)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{b}_B - \sum_{i=1}^N \mathbf{A}_{(B,i)} \mathbf{A}_{(i,i)}^{-1} \mathbf{b}_{(i)} \quad (12)$$

则式(10)可写成:

$$\mathbf{K} \Delta \mathbf{X}_B = \mathbf{B} \quad (13)$$

先根据式(13)求解出与边界节点相关的修正量 $\Delta \mathbf{X}_B$, 然后将其代入式(8), 得

$$\mathbf{A}_{(i,i)} \Delta \mathbf{X}_{(i)} = \mathbf{b}_{(i)} - \mathbf{A}_{(i,B)} \Delta \mathbf{X}_B \quad (14)$$

根据式(14), 各区域分别独立进行求解, 即得各区域的修正值 $\Delta \mathbf{X}_{(i)}$ 。

至此, 实现了各子区域独立求解, 并在不牺牲非线性内点法收敛性的前提下, 快速地得到系统全局和子区域的精确解。每次迭代, 首先利用式(13)计算边界网络, 获得边界节点修正量 $\Delta \mathbf{X}_B$, 再分布到各子区域, 各子区域即可同时独立求解。

计算步骤如下:

1)对系统进行区域分解,在各区域联络线间插入虚拟的边界节点,并进行节点优化编号。

2)根据内嵌离散惩罚的非线性原对偶内点法得到各个区域及边界网络修正方程(如式(7))。

3)利用稀疏技术及因子表分解法计算得到 $\mathbf{A}_{(i,i)}^{-1}$ 、 $\mathbf{A}_{(i,B)}$ 和 $\mathbf{A}_{(i,i)}^{-1} \mathbf{b}_{(i)}$,并根据式(11)和式(12)分别求出 $\mathbf{K}$ 和 $\mathbf{B}$ 。

4)利用三角分解法解式(13),求出 $\Delta \mathbf{X}_B$ 。

5)将 $\Delta \mathbf{X}_B$ 分布到各个区域,根据式(14),各区域独立求解可得 $\Delta \mathbf{X}_{(i)}$ 。

2.2 分解算法 2

由式(9)得:

$$\Delta \mathbf{X}_B = \mathbf{A}_{(B,B)}^{-1} \left(\mathbf{b}_B - \sum_{j=1}^N \mathbf{A}_{(B,j)} \Delta \mathbf{X}_{(j)} \right) \quad (15)$$

把式(15)代入式(8)并整理得:

$$\mathbf{A}_{(i,i)} \Delta \mathbf{X}_{(i)} - \mathbf{A}_{(i,B)} \mathbf{A}_{(B,B)}^{-1} \sum_{j=1}^N \mathbf{A}_{(B,j)} \Delta \mathbf{X}_{(j)} = \mathbf{b}_{(i)} - \mathbf{A}_{(i,B)} \mathbf{A}_{(B,B)}^{-1} \mathbf{b}_B \quad (16)$$

将 $\Delta \mathbf{X}_{(j)} (j \neq i)$ 移到式(16)的右边得到:

$$\begin{aligned} (\mathbf{A}_{(i,i)} - \mathbf{A}_{(i,B)} \mathbf{A}_{(B,B)}^{-1} \mathbf{A}_{(B,i)}) \Delta \mathbf{X}_{(i)} &= \mathbf{b}_{(i)} - \\ &\mathbf{A}_{(i,B)} \mathbf{A}_{(B,B)}^{-1} \mathbf{b}_B + \mathbf{A}_{(i,B)} \mathbf{A}_{(B,B)}^{-1} \sum_{j=1, j \neq i}^N \mathbf{A}_{(B,j)} \Delta \mathbf{X}_{(j)} \end{aligned} \quad (17)$$

即

$$\tilde{\mathbf{A}}_{(i,i)} \Delta \mathbf{X}_{(i)} = \tilde{\mathbf{b}}_i \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (18)$$

至此,实现了各子区域修正方程的分解,各子区域循环求解并实时更新 $\Delta \mathbf{X}_{(i)}$,可得各自修正方向。再由式(15)可求得 $\Delta \mathbf{X}_B$ 。

与分解算法 1 相比,该方法以小规模边界网络的修正矩阵求逆取代了繁重的高维矩阵 $\mathbf{A}_{(i,i)}$ 的求逆运算,大大减少了计算量。因式(16)中,对本次循环未更新的 $\Delta \mathbf{X}_{(j)} (j \neq i)$ 取上次迭代值,其收敛性受到一定影响,但仍具有线性收敛速度。

分解算法 2 的计算步骤如下:

1)与算法 1 相同。

2)根据内嵌离散惩罚的非线性原对偶内点法得到各个子区域及边界区域的修正方程(如式(7)),并利用式(17)得到矩阵 $\tilde{\mathbf{A}}_{(i,i)}$ 和 $\tilde{\mathbf{b}}_{(i)}$ 。

3)利用稀疏技术及三角分解法循环求解各子区域的方程(18),并实时更新各区域修正量 $\Delta \mathbf{X}_{(i)}$,最终得到各子区域的修正方向 $\Delta \mathbf{X}_{(i)}$ 。

4)通过式(15)求出 $\Delta \mathbf{X}_B$ 。

由于该分解算法涉及到其他区域 $\Delta \mathbf{X}_{(j)} (j \neq i)$ 常数化处理的过程,因此需要先采用分解算法 1 做 1 次或数次循环后,再采用算法 2 求解。

离散化变量的具体处理细节及其求解运算中的变化过程见文献[19]。

3 算例分析

选用 IEEE 118 节点系统和 2 个实际系统(538 节点系统和 1 133 节点系统)来检验算法的有效性。算法在 Visual C++ 环境下实现,计算机配置为: Pentium(R) 4 (2.80 GHz),512 MB 内存。每个系统均取 1 个平衡节点。

3.1 118 节点系统

将 118 节点系统分别分为 3 个子区域,见图 2。A1,A2,A3 子系统节点数分别为 35,35,48。虚拟边界网络 A4 的节点数为 7。

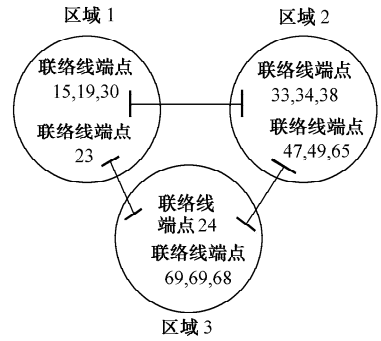


图 2 118 节点系统三分区示意图
Fig. 2 Schematic diagram of three areas in 118-bus system

3.2 538 和 1 133 节点系统

第 1 个实际系统包括 538 个节点、593 条线路、48 台发电机、98 台电容器组(包括参与优化电抗器组)和 409 台变压器支路(其中 64 台参与优化计算)。按地域管理上划分为 A1~A4 以及虚拟边界网络 A5 共 5 个区域,A1~A5 节点数分别为 364, 71, 64, 39, 11。

第 2 个实际系统包括 1 133 个节点、1 341 条线路、117 台发电机、212 台电容器组(包括参与优化的电抗器组)和 872 台变压器支路(其中 86 台参与优化计算)。按地域管理上划分为 A1~A4 以及虚拟的边界网络 A5 共 5 个区域,A1~A5 节点数分别为 642, 155, 205, 131, 17。

3.3 结果分析

表 1 列出了采用 3 种算法的计算结果。为便于表达,称内嵌离散惩罚的非线性原对偶内点算法为集中优化算法。目前大多数算法采用先将离散化变量作为连续变量参与优化,求得优化解后进行简单的靠拢式取整,对其余的连续变量则用常规的潮流计算或优化计算确定。这样不仅会产生数学上的近

似,而且可能导致某些约束条件违限,导致所获得优化解不可行。本文采用对离散变量构造正曲率二次罚函数并将其嵌入到非线性原对偶内点法^[18],来动态处理变压器分接头、无功补偿出力等离散类变量,

从而提高计算精度,得到更接近电网实际可行的最优解。由最终结果可知:所有算法均满足收敛条件,并给出近似离散最优解。

表 1 3 种分解算法的结果比较
Table 1 Comparison of optimal results from three algorithms

系统名称	集中优化计算		分解算法 1					分解算法 2		
	计算时间/s	迭代次数	网损	计算时间/s			求逆次数	迭代次数	网损	计算时间/s
				T_1	T_2	T				
118 节点系统	13.3	16	1.167	2.3	1.7	4.0	11	22	1.167	2.9
538 节点系统	1 263.8	42	1.496	797.1	352.8	1 149.9	24	50	1.496	507.6
1 133 节点系统	17 481.5	43	5.421	6 849.8	1 742.6	8 592.4	33	60	5.421	3 148.2

注: T_1 和 T_2 分别代表计算过程中所有求逆耗时和所有求解修正方程耗时; T 代表 T_1 与 T_2 的总和;求逆次数代表计算过程中需更新逆矩阵的大循环次数;集中算法的网损、迭代次数与分解算法 1 完全相同,不再列出。

从图 3 和表 1 可以看出,分解算法 1 与集中优化计算结果完全相同,最大潮流偏差轨迹完全重合。不管对 IEEE 118 节点系统还是 2 个实际系统,分解算法 1 既实现了算法分解,有效降低了求解方程维数,提高了计算速度,整个计算过程又保持了非线性内点法的收敛速度。

对较大,取决于各虚拟节点状态变量对相邻分区无功变量变化的灵敏度,但从计算时间来看,大规模电网的计算速度能取得较高效益。因此,对电网做适当区域划分后,分解算法 2 更适合大规模电网的计算。

对于 538 节点系统,最大子区域修正方程维数($A_{(i,i)}$ 的最大维数为 1 599)占总修正方程维数(式(7)维数为 2 406)的 66%,与集中优化算法相比,算法 1 的计算效率并未得到较大程度的提高。而对于 1 133 节点系统,其最大子区域的方程维数(2 826)占总修正方程维数(5 052)的 56%,与集中优化算法相比,算法 1 的计算效率得到大幅度提高。对比表 1 中集中优化算法和算法 2 的计算时间可以看出:避免高维矩阵求逆运算后,最大子区域规模对分解算法计算速度的影响有所削弱,分解算法的计算效益明显占优,随着系统规模的扩大,优势会更加明显。但由式(15)可以看出:当分区数目增加时,边界网络规模随之增大,矩阵 $A_{(B,B)}$ 维数随之增大,增大到一定程度后,边界网络方程的求解占用较多时间,即分解算法的协调级的计算负担加重,分解算法的优势也会降低。综上所述:区域分解的数目和子区域规模对计算效率均有直接影响,可以认为分解算法的计算效率为子区域数目和最大子区域方程维数的函数。因此,如何确定子区域数目及子区域规模使计算效率最高本身也是值得仔细研究的问题。

4 结论

1)不管是弱耦合还是强耦合系统,均可通过求解较低维数的边界网络修正方程后,实现各区域独立计算,其计算速度比集中优化方法的要快,但计算效益取决于分区的数目和子区域规模。

2)分解算法 1 的收敛性与集中优化算法的收敛

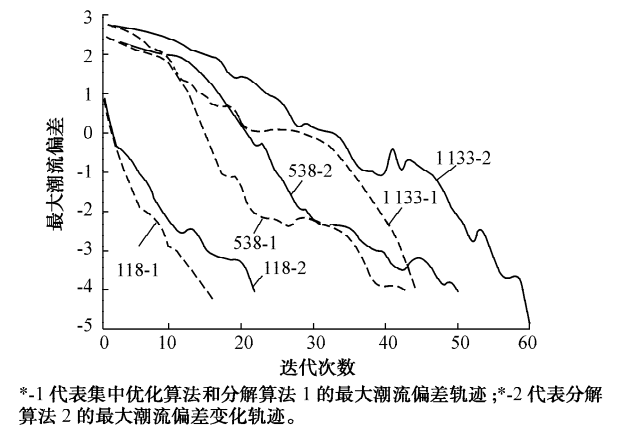


图 3 最大潮流偏差变化轨迹

Fig. 3 Trajectories of maximum power-flow mismatch

在分解算法 1 的计算过程中,当补偿间隙小于 5×10^{-4} 时,视各子系统的逆矩阵 $A_{(i,i)}^{-1}$ 为常数矩阵,不再实时更新,算法以同样速度收敛至最优解,省去部分求逆时间。但逆矩阵的求解仍然占用了较多计算时间,各子区域线性方程组求解占用时间相对较少。为了进一步提高效率,算法 2 在有效降低求解方程维数的同时,还采用由低维边界网络修正矩阵求逆代替高维矩阵求逆运算的改进方案。由于从式(16)到式(17)的过程涉及到不同区域某些联络线端节点牛顿方向的异步处理,致使潮流偏差出现了一定程度的振荡,在一定程度上牺牲了收敛性,但取得了较好的计算速度效益。由表 1 中 2 种分解算法的迭代次数可看出,大规模电网的收敛性所受影响相

性相同,但其计算效率要高一些。

3)分解算法 2 在计算过程中以低维矩阵求逆代替高维矩阵求逆运算,节省了大量计算时间。虽然牺牲了算法的收敛性,但计算效益大幅度提高。

4)对电力系统中无功补偿装置出力 and 变压器变比实现离散化,使计算结果进一步逼近实际运行状态。

参考文献

- [1] 陈颖,沈沉,梅生伟,等. 基于改进 Jacobian Free Newton-GMRES(m) 的电力系统分布式潮流计算. 电力系统自动化, 2006,30(9):5-8.
CHEN Ying, SHEN Chen, MEI Shengwei, et al. Distributed power flow calculation based on an improved Jacobian Free Newton-GMRES(m) method. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(9): 5-8.
- [2] 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. 电力系统自动化,2003,27(24):1-5.
ZHANG Haibo, ZHANG Boming, SUN Hongbin. A decomposition and coordination dynamic power flow calculation for multi-area interconnected system based on asynchronous iteration. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(24): 1-5.
- [3] 蔡大用,陈玉荣. 用重叠分块牛顿法计算潮流问题. 电力系统自动化,2001,25(23):1-3.
CAI Dayong, CHEN Yurong. Solving load flow equations with overlapped block Newton method. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(23): 1-3.
- [4] 吉兴全,王成山. 电力系统并行计算方法比较研究. 电网技术, 2003,27(4):22-26.
JI Xingquan, WANG Chengshan. A comparative study on parallel processing applied in power system. Power System Technology, 2003, 27(4): 22-26.
- [5] 薛巍,舒继武,王心丰,等. 电力系统潮流并行算法的研究进展. 清华大学学报:自然科学版,2002,42(9):1192-1195.
XUE Wei, SHU Jiwu, WANG Xinfeng, et al. Advance of parallel algorithms for power flow simulation. Journal of Tsinghua University: Science & Technology, 2002, 42(9): 1192-1195.
- [6] WANG X, SONG Y H, LU Q. Lagrangian decomposition approach to active power congestion management across interconnected regions. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 2001, 148(5): 497-503.
- [7] CONEJO A J, AGUADO J A. Multi-area coordinated decentralized DC optimal power flow. IEEE Trans on Power Systems,1998, 13(4): 1272-1278.
- [8] BALDICK R, KIM B H, CHASE C, et al. A fast distributed implementation of optimal power flow. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3): 858-864.
- [9] HUR D, PARK J K, KIM B H. Evaluation of convergence rate in the auxiliary problem principle for distributed optimal power flow. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(5): 525-532.
- [10] KIM B H, BALDICK R. A comparison of distributed optimal

power flow algorithms. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2): 599-604.

- [11] 程新功,厉吉文,曹立霞,等. 电力系统最优潮流的分布式并行算法. 电力系统自动化,2003,27(24):23-27.
CHENG Xingong, LI Jiwen, CAO Lixia, et al. Distributed and parallel optimal power flow solution of electric power system. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(24): 23-27.
- [12] 张明军,曹立霞,厉吉文,等. 考虑多分区无功电压优化的多 Agent 系统. 电力系统自动化,2004,28(17):70-74.
ZHANG Mingjun, CAO Lixia, LI Jiwen, et al. Multi-agent system for voltage/VAR optimization considering multi-regional power systems. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(17): 70-74.
- [13] 程新功,厉吉文,曹立霞,等. 基于电力系统分布的多目标分布式并行无功优化研究. 中国电机工程学报,2003,23(10):109-113.
CHENG Xingong, LI Jiwen, CAO Lixia, et al. Multi-objective distributed parallel reactive power optimization based on subarea division of the power system. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 109-113.
- [14] NOGALES F J, PRIETO F J. A decomposition methodology applied to the multi-area optimal power flow problem. Annals of Operations Research, 2003, 120(1-4): 99-116.
- [15] 苏新民,毛承雄,陆继明. 对角块加边模型的并行潮流计算. 电网技术,2002,26(1):22-25.
SU Xinmin, MAO Chengxiong, LU Jiming. Parallel load flow calculation of block bordered model. Power System Technology, 2002, 26(1): 22-25.
- [16] 张伯明,陈寿孙. 高等电力网络分析. 北京:清华大学出版社, 1996.
- [17] XIE K, SONG Y H. Dynamic optimal power flow by interior point methods. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 2001, 148(1): 76-84.
- [18] QIU Wei, FLUECK A J, TU Feng. A new parallel algorithm for security constrained optimal power flow with a nonlinear interior point method//Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting: Vol 1, Jun 12-16, 2005, San Francisco, CA, USA: 447-453.
- [19] 程莹,刘明波. 含离散控制变量的大规模电力系统无功优化. 中国电机工程学报,2002,22(5):54-60.
CHENG Ying, LIU Mingbo. Reactive-power optimization of large-scale power systems with discrete control variables. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 54-60.

赵维兴(1979—),男,通信作者,博士研究生,主要研究方向:电力系统最优潮流与无功优化调度。E-mail: zwx182@163.com

刘明波(1964—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统优化、运行与控制。E-mail: epmbliu@scut.edu.cn

缪楠林(1984—),男,硕士研究生,主要研究方向:电力系统动态最优潮流并行计算。E-mail: miaonanlin@163.com

(下转第 40 页 continued on page 40)

A Decomposition Algorithm for Multi-area Reactive-power Optimization Based on the Block Bordered Diagonal Model

ZHAO Weixing, LIU Mingbo, MIAO Nanlin

(South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Based on the block bordered diagonal matrix structure, this paper presents a new discrete decomposition algorithm for the reactive-power optimization in a multi-area power system. The method decomposes a power system into several sub-areas according to certain rules, and establishes border networks between the sub-areas by introducing fictitious buses. The nonlinear primal-dual interior-point algorithm and discretization penalty method are used to solve the problem. As a result, the coefficient matrix of the linear correction equation has a block bordered diagonal structure. To search the quasi-optimal discrete solutions for the whole system and sub-areas, two decomposition methods are proposed to solve the linear correction equation of each sub-area independently. The results on IEEE 118-bus test system and two practical systems, 538 buses and 1133 buses respectively, validate the effectiveness of the proposed algorithm in comparison with the centralized optimization method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No. 50277013).

Key words: reactive-power optimization; multi-area power systems; nonlinear primal-dual interior-point method; block bordered diagonal matrix; area decomposition; discrete control