

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211128

考虑限幅约束的多区域互联电网全分布式潮流算法

巨云涛, 张紫枫, 刘文武, 陈希

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 多区域互联电网中有大量限幅非光滑约束, 增加了潮流模型的非凸性。针对传统基于启发式规则处理限幅的分布式潮流算法在计算过程中容易出现收敛性问题, 提出了一种能鲁棒性处理非光滑约束的互联电网全分布式潮流计算方法。首先根据分层分区调度模式对电网进行分区, 并将模型中非光滑约束进行光滑处理, 然后基于具有二阶收敛速度的双层交替方向非精确牛顿法, 将潮流问题转化为求解最优步长增量的问题。基于零空间法(Null-Space)对状态变量的系数矩阵进行降维处理, 采用共轭梯度(Conjugate Gradient, CG)算法更新每个分区的对偶乘子, 乘子更新过程中利用二阶信息提高了算法的收敛性。多区域间进行分布式计算时无需协调层参与, 仅需通信少量边界信息, 因此通信负担轻。最后, 以30节点和182节点系统为测试算例, 验证了所提方法在设置恶劣初值和处理非光滑约束时具有较高的精确性和较好的收敛性。

关键词: 互联电网分区潮流; 分布式计算; 非光滑限幅约束; 隐私保护

A fully distributed power flow algorithm for multi-region interconnected power grids considering limiting constraints

JU Yuntao, ZHANG Zifeng, LIU Wenwu, CHEN Xi

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: There are a large number of limiting non-smooth constraints in multi-region interconnected power grids. These constraints increase the non-convexity of the power flow model. Given that the traditional distributed power flow algorithm, based on a heuristic rule processing limit, is prone to convergence problems in the calculation process, a fully distributed power flow calculation method for an interconnected power grid that can robustly handle non-smooth constraints is proposed. First, the grid is partitioned according to the hierarchical and partitioned dispatch mode, and the non-smooth constraints in the model are smoothly processed. Then, based on the bi-level alternate direction inexact Newton method with a second-order convergence rate, the power flow problem is transformed into a problem of solving the optimal step increment. Based on the null space method, the coefficient matrix of the state variable is reduced in dimension, and the conjugate gradient algorithm is used to update the dual multiplier of each partition, and the second-order information is used in the multiplier update process to improve the convergence of the algorithm. The coordination layer does not need to be involved in distributed computing between multiple regions, and only a small amount of boundary information needs to be communicated, so the communication burden is light. Finally, the 30-bus system and 182-bus system are used as test examples to verify that the proposed method has higher accuracy and better convergence when setting bad initial values and dealing with non-smooth constraints.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52177125 and No. 51707196).

Key words: interconnected power grids partition power flow; distributed computing; non-smooth limiting constraints; privacy protection

0 引言

潮流计算是电力系统的稳态计算、故障分析^[1]、

方案设计及调度管理等方面的重要支撑。在潮流计算中, 发电机等无功设备具有维持系统电压稳定的能力, 当其无功越限时便难以维持设定电压, 因此需要对限幅环节进行处理^[2]。

电力系统中各管理分区间存在信息壁垒, 用集中式潮流算法需涉及所有者的数据隐私, 且难以对

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52177125, 51707196)

整个系统的海量数据进行收集和处理。同时, 全局潮流算法不但对系统通信设施要求较高, 而且系统通信负担较重, 一旦出现通信故障, 整个计算便会失效^[3]。而分布式计算只需要通过本地信息的收集和相邻区域间的有限通信就能够实现集中式的计算效果, 且能够很好地应对可再生能源的随机性以及负荷出力的不确定性^[4], 因此分布式潮流计算适用于隶属于不同公司管理的互联输电网、输配协同、微网群等稳态分析场景^[5]。

目前常用的分布式潮流算法主要基于牛顿法, 包括基于同步迭代的主从分裂法^[6]、基于等值参数的异步迭代法^[7-8]、基于矩阵迭代法的 Jacobian-Free 牛顿法^[9]等。文献[10]基于矩阵分裂技术, 将互联电网分解为相互独立的子区域, 然后利用 Sherman-Morrison-Woodbury 公式对矩阵进行求逆运算, 进而对各区域进行协调求解。文献[11]利用节点撕裂的方法将网络分解, 构建了双层分布式潮流计算系统, 上层系统把下层子区域简化为线性模型, 下层子区域把上层系统处理为等值电源。文献[12]提出一种基于子网边界节点等值注入功率的算法, 通过构造边界节点电压加权修正的外层迭代, 不断修改子网外边界节点等值注入功率。文献[13-14]提出了一种主从分裂潮流算法, 通过引入边界虚拟功率, 将子系统的等值网络和循环功率考虑到主系统中来求解全局潮流。文献[15]提出了一种基于改进交替方向乘子法的分布式潮流算法, 首先将非凸潮流模型凸化为二阶锥模型, 然后将大规模潮流问题分解为多区域潮流子问题。

上述文献提出的方法在分布式计算时需要协调层的参与, 妨碍了各调度中心独立性诉求, 因此只能被称为“半分布式”的潮流计算方法^[16]。文献[17]提出了一种无需协调层的全分布式潮流算法, 每个分区仅与邻居交换求解潮流修正方程所得的偏差变量。文献[18]提出了一种基于多智能体的全分布式潮流算法, 利用改进迭代投影搜索法构建分布式潮流内外层双重迭代。

文献[19]最先提出了非精确交替牛顿方向分布式算法, 文献[20]基于该算法对混合交直流电网进行了相关研究, 但在迭代过程中利用了全局信息, 并没有起到保护信息隐私的作用。

总结已有工作, 现有的分布式潮流模型和算法中没有考虑非光滑无功限幅约束^[21-22], 对于 PV 或平衡节点出现的无功越限情况, 如果通过启发式 PV-PQ 或 V0-Q0 节点类型转换逻辑来处理, 容易出现收敛性问题^[23-24]。

为了解决上述问题, 本文致力于研究能够鲁棒

性处理非光滑限幅特性的全分布式潮流算法。其主要贡献在于:

(1) 针对发电机节点无功越限引入的非光滑特性, 引入互补约束对其进行描述, 再通过 Fischer-Burmeister (FB) 函数对互补约束进行光滑化处理, 光滑化后的潮流计算模型数值条件较差, 需要利用二阶梯度信息提升收敛性。基于双层增广拉格朗日交替方向非精确牛顿法 (Augmented Lagrangian Alternating Direction Inexact Newton, ALADIN), 将分布式潮流问题转化为求解分布式最优步长增量的问题。

(2) 为了提升算法的效率和减少各区域协调步骤中的通信量, 第二层求解过程中采用零空间法 (Null-Space) 对状态变量的系数矩阵进行降维处理。使用考虑二阶信息的耦合约束对偶乘子更新方法, 分布式计算过程无需协调层的参与, 各分区仅需交换边界信息进行协调, 进而得到全局潮流解。

(3) 传统基于牛顿法的分布式潮流算法对初值敏感, 不合适的初值条件会导致潮流发散, 而本文所提算法对初值不敏感, 在恶劣初值条件下仍具有较好的收敛性。

1 多区域互联电网潮流模型

电网潮流模型包括线路模型、变压器模型、非光滑互补约束模型、分布式协调模型, 这里详细介绍后两种模型。

1.1 非光滑互补约束

在电力系统中, 对于 PV 节点或平衡节点, 当其无功出力达到限值后, 将失去对该节点电压的控制能力, PV 节点被转换为 PQ 节点, 平衡节点由 V0 节点转换为 Q0 节点, 因此分布式潮流计算中需要对节点类型转换这类非光滑问题进行处理。

若无功功率达到上限, 电压幅值将低于控制目标值。反之, 若无功功率达到其下限, 电压幅值将高于控制目标值。在此, 引入无功功率约束条件。

$$\begin{cases} Q_{Gi} = Q_{Gi}^{\min}, & \text{if } Q_{Gi} < Q_{Gi}^{\min} \\ U_i = U_{i\text{-set}}, & \text{if } Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} \\ Q_{Gi} = Q_{Gi}^{\max}, & \text{if } Q_{Gi} > Q_{Gi}^{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中: Q_{Gi}^{\max} 、 Q_{Gi}^{\min} 分别表示发电机节点 i 的无功功率最大值和最小值; $U_{i\text{-set}}$ 是电压控制目标值。

引入互补约束来描述无功功率与电压幅值的关系, 即

$$\begin{cases} U_i = U_{i\text{-set}} + U_i^+ - U_i^-, U_i^+ \geq 0, U_i^- \geq 0 \\ (Q_{Gi} - Q_{Gi}^{\min}) \perp U_i^+ = 0, \forall i \in \{\text{PV}, \text{slack}\} \\ (Q_{Gi}^{\max} - Q_{Gi}) \perp U_i^- = 0, \forall i \in \{\text{PV}, \text{slack}\} \end{cases} \quad (2)$$

式中： i 表示发电机所连接的母线编号，其中 $\forall i \in \{\text{DG}, \text{slack}\}$ ； U_i^+ 、 U_i^- 是引入的松弛变量，且 $U_i^+ \geq 0$ ， $U_i^- \geq 0$ ；“ \perp ”表示互补关系，互补的两个变量乘积为零。其定义如式(3)所示。

$$a \perp b \Leftrightarrow a \cdot b = 0 \quad (3)$$

为了解决互补约束的非光滑问题，引入 Fischer-Burmeister(FB)函数^[25]。

$$\begin{cases} \varphi(u, v) = u + v - \sqrt{u^2 + v^2 + \mu} \\ u \geq 0, v \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中， $\mu = 10^{-8}$ 为较小的常数值。FB 函数属于非线性互补问题(Nonlinear Constraint Problem, NCP)^[26] 其中的一类表示形式，具有以下特性：

$$\phi_{\text{FB}}(u, v) = 0 \Leftrightarrow u \geq 0, v \geq 0, u \cdot v = 0 \quad (5)$$

将 FB 函数应用到潮流计算中的互补约束(2)，可以避免启发式约束切换规则造成的潮流收敛失败，具体方程描述为

$$\begin{cases} \varphi(Q_{Gi} - Q_{Gi}^{\min}, U_i^+) = 0 \\ \varphi(Q_{Gi}^{\max} - Q_{Gi}, U_i^-) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

1.2 分布式协调模型

多区域互联电网的分解协调有三种区域划分方式：边界撕裂(引入虚拟母线)、边界复制、边界成区。其中边界复制、边界成区的划分方式，需要各分区共享实际的边界信息，会涉及隐私数据，而边界撕裂的分区方式只需共享“虚拟母线”数据，更有利于区间隐私保护，因此本文采用边界撕裂的划分方式。

假定互联电网 \square 被划分为 N 个区域，则 $\square = \sum_{a=1}^N \square_a$ 。对于任意一个区域 a ，如图 1 所示，其与相邻区域通过联络线 l_{mn} (可以有多个联络线，本文以 1 条作为示意耦合连接，在联络线 l_{mn} 中间引入一对“虚拟母线(k, l)”对相邻区域进行区间解耦，解耦后区域 a 的包含原有本地母线和新引入的“虚拟母线”，即 x_a 由原有本地变量 $x_{a,\text{int}}$ 和虚拟变量 $x_{a,\text{adj}}$ 组成，可进行独立的潮流计算，区域 b 同理。

由于“虚拟母线(k, l)”将连接两个区域的传输线 l_{mn} 分割成等长的两段，则分割后线段的导纳比原传输线导纳大一倍，即 $g_{mk} = g_{nl} = 2g_{mn}$ ， $b_{mk} = b_{nl} = 2b_{mn}$ 。

分布式潮流计算过程中，若电网 a 和 b 潮流均收敛，且边界耦合母线 k 和 l 的电压相等，注入功率匹配，则可以认为子区域的潮流解和全局潮流解一致，计算完成，边界母线的具体关系如式(7)所示。

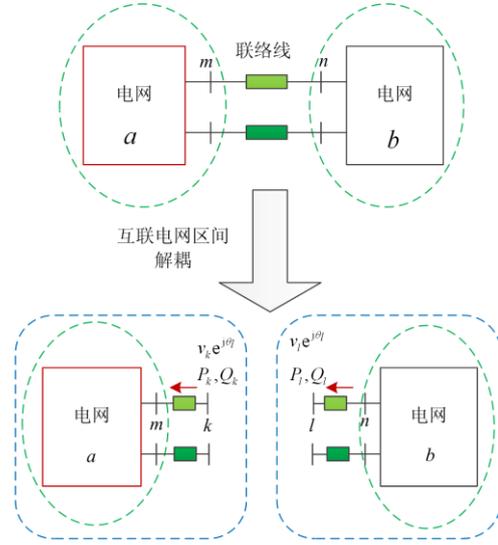


图 1 2 区域互联电网区间解耦

Fig. 1 Interval decoupling of two-region interconnected grids

$$\begin{cases} \theta_{a,k} = \theta_{b,l}, v_{a,k} = v_{b,l} \\ P_{a,k} = P_{b,l}, Q_{a,k} = Q_{b,l} \end{cases} \quad (7)$$

式中： $\theta_{a,k}$ 、 $\theta_{b,l}$ 分别为相邻区域耦合母线 k 和 l 的电压相角； $v_{a,k}$ 、 $v_{b,l}$ 分别为相邻区域耦合母线 k 和 l 的电压幅值； $P_{a,k}$ 、 $P_{b,l}$ 分别为耦合母线 k 和 l 流出的有功功率； $Q_{a,k}$ 、 $Q_{b,l}$ 分别为耦合母线 k 和 l 流出的无功功率。

式(7)通过耦合矩阵可以表示为

$$[A_a \ A_b][x_a \ x_b]^T = 0 \Leftrightarrow \sum_{i=a,b} A_i x_i = 0 \quad (8)$$

式中： A_a 和 A_b 分别为相邻区域 a 和 b 的耦合矩阵； x_a 包含区域 a 原有本地变量 $x_{a,\text{int}}$ 和虚拟变量 $x_{a,\text{adj}}$ ， $x_{a,\text{adj}} = [\theta_{a,k}, v_{a,k}, P_{a,k}, Q_{a,k}]^T$ ； x_b 包含区域 b 原有本地变量 $x_{b,\text{int}}$ 和虚拟变量 $x_{b,\text{adj}}$ ， $x_{b,\text{adj}} = [\theta_{b,l}, v_{b,l}, P_{b,l}, Q_{b,l}]^T$ 。

其中，耦合矩阵 A_a 和 A_b 表示如式(9)所示。

$$A_a = \begin{cases} 1 & x_a \in x_{a,\text{adj}} \\ 0 & x_a \in x_{a,\text{int}} \end{cases}, A_b = \begin{cases} -1 & x_b \in x_{b,\text{adj}} \\ 0 & x_b \in x_{b,\text{int}} \end{cases} \quad (9)$$

每个区域在进行独立潮流计算时，满足全局收敛性和局部收敛性保证。

$$\begin{cases} \left\| \sum_{a \in \mathbf{R}} (A_a x_a^k - s_a) \right\| \leq \varepsilon \\ \frac{1}{\mu^k} \leq O(\|x_a^k - x_a^*\|) \end{cases} \quad (10)$$

式中： k 为迭代次数； ε 为收敛精度； x_a^* 为状态变量精确值。

本文分布式潮流计算主要由两个环节构成, 一是解耦后的子区域进行独立潮流计算; 二是子区域每次迭代后与相邻区域交换边界耦合信息, 并使用式(7)中边界母线电压和功率的信息进行是否收敛的判断。

2 基于双层 ALADIN 的全分布式潮流算法

含限幅约束的潮流计算问题即为求解式(11)所示的界约束非线性方程组。

$$f(x) = \sum_{a=1}^N f_a(x_a) = \begin{cases} \text{潮流方程组} \\ \text{互补约束方程组: 式(6)} \\ \text{耦合约束方程组: 式(8)} \\ \text{不等式约束: } U_a^+ \geq 0, U_a^- \geq 0 \end{cases} \quad (11)$$

此处, 区域 a 中母线 $\chi (\chi = 1, 2, \dots, n)$ 状态变量为 $x_a^\chi = [\theta_a^\chi, v_a^\chi, P_a^\chi, Q_a^\chi]^T \in \mathbf{R}^4$; f_a 包括区域 a 的潮流方程组、互补约束方程组(6)和耦合约束方程组(8), 其中互补约束方程组中的电压松弛变量 U_a^+ 、 U_a^- 满足: $U_a^+ \geq 0, U_a^- \geq 0$ 。

N 个分区在边界节点处的耦合关系可通过式(8)耦合约束体现: $\sum_{a=1}^N \mathbf{A}_a x_a = 0$, 其中 \mathbf{A}_a 为各区域耦合矩阵。

本文调用双层增广拉格朗日交替方向非精确牛顿法(Augmented Lagrangian Alternating Direction Inexact Newton, ALADIN)对互联电网的各个区域潮流进行双层求解, 具体求解步骤如下所述。

2.1 第一层: 异步并行求解各分区潮流解

将求解式(11)所示的界约束非线性方程组问题转换为 N 个可独立计算的非线性规划问题。首先引入对偶乘子 κ_a^k 将每个分区耦合约束(8)构造为新函数 $F_a(x_a^k)$, 然后利用文献[27]中的内点法(Interior Point, IPOPT)求解式(12)得到每个分区 $a=1, \dots, N$ 的潮流解 x_a^{k+1} 。

$$\begin{cases} F_a(x_a^k) = (\kappa_a^{k-1})^T \mathbf{A}_a (x_a^k - z_a^k) + \frac{\rho^k}{2} (x_a^k - z_a^k)^T (x_a^k - z_a^k) \\ g_a(x_a^k) = 0, h_a(x_a^k) \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $g_a(x_a^k) = 0$ 中包含潮流方程组、互补约束方程组式(2)一式(6), $h_a(x_a)$ 为含电压松弛变量 U_a^+ 、 U_a^- 的式子; κ_a^k 的初值 $\kappa_a^0 = 0.01$, 每次迭代由算法第二层更新传入第一层; z_a^k 为一致性参数, 初值 $z_a^k = x_a^k$ 为平启动值, 下一次迭代数值由算法第二层求得的潮流解代入更新 $z_a^k = (x_a^k)^k$, 一致性参数保证

分区信息的独立性, 不需要分区之间耦合信息的传递; ρ 为惩罚因子。

根据线搜索下一个点 $x^{k+1} = x^k - \partial d^k$ 原则, 这里默认步长因子 $\partial = 1$, 通过计算第 k 、 $k+1$ 步变量数值差得到其下降搜索方向。

$$d_a^k = x_a^{k+1} - x_a^k \quad (13)$$

2.2 第二层: 求解子区域的全局最优步长增量

2.2.1 构造各分区步长增量模型

将每个分区原问题(12)进行二阶泰勒展开, 潮流问题被转化为非凸的序列二次规划(Sequential Quadratic Programming, SQP)模型, 求解每个分区的全局最优步长增量 d_a , 表示为

$$\begin{aligned} \Phi(d_a, s_a) &= \frac{1}{2} d_a^T \mathbf{H}_a^k d_a + \kappa_a^{sT} s_a + \frac{\mu}{2} \|s_a\|_2^2 \\ \text{s.t.: } (\mathbf{J}_a^c)^k d_a &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\text{where: } s_a = \sum_{a=1}^{(a,b)} \mathbf{A}_a (x_a^k + d_a)$$

式中, κ_a^k 为每个分区的约束对偶乘子, 为了减小二次求导的计算量, 基于 D-BFGS 方法得到每个分区的近似海森矩阵 \mathbf{H}_a^k 。

近似海森矩阵 \mathbf{H}_a^k 和雅可比矩阵 \mathbf{J}_a^c 可表示为

$$\mathbf{H}_a^k(x_a^{k+1}) \approx \nabla_{x_a^s}^2 (F_a(x_a^s) + k_a^1 * g_a(x_a^s) + k_a^2 * h_a(x_a^s)) \quad (15)$$

$$(\mathbf{J}_a^c)^k(x_a^{k+1}) = \left[\nabla_{x_a} (g(x_a^{k+1})); \nabla_{x_a} (h_r(x_a^{k+1})) \right]^T \quad (16)$$

$$\forall \nabla_{x_a} h_r(x_a^{k+1}) = 0$$

式中: k_a^1 、 k_a^2 分别为非线性方程组 $g_a(x_a^s)$ 和不等式约束 $h_a(x_a^s)$ 乘子系数; 下标 r 表示第 r 个电压松弛变量约束在可行解 x_a^{k+1} 处起作用的约束条件, 所有可行解 x_a^{k+1} 的潮流等式约束都是起作用的, 去掉不起作用的电压松弛变量约束不改变可行解。

通过减小潮流等式约束中系数矩阵的维度来降低通信负担, 在每一次迭代过程中, 每个分区约束条件 $(\mathbf{J}_a^c)^k$ 是一个行满秩矩阵, 基于零空间方法(Null Space)^[28] 能够得到其基向量 z_a^k , 满足 $(\mathbf{J}_a^c)^k z_a^k = 0$, 式(14)不等式约束 $(\mathbf{J}_a^c)^k z_a^k d_a = 0$, 同时目标函数中的变量 d_a 被 $(\mathbf{Z}_a^k)^T \Delta v_a$ 所取代, 带有约束的问题(14)被转化为无约束的问题进行求解, 表示为

$$\begin{aligned} \Psi(\Delta v, s_a) &= \Delta v_a^T \overline{\mathbf{H}}_a^k \Delta v_a + (\kappa_a^s)^T s_a + \\ &(\kappa_a^s)^T s_a + \mu \|s_a\|_2^2 \end{aligned} \quad (17)$$

$$\text{where: } s_a = \sum_{a=1}^{(a,b)} \mathbf{A}_a (v_a + \Delta v_a)$$

式中: $\bar{\mathbf{H}}_a^k = (\mathbf{Z}_a^k)^T \mathbf{H}_a^k \mathbf{Z}_a^k$; $\bar{\mathbf{A}}_a^k = \mathbf{A}_a^k \mathbf{Z}_a^k$ 。

根据 KKT 条件, 令 $\nabla_{\Delta v_a} \Psi(\Delta v_a, s_a) = 0$, $\nabla_{s_a} \Psi(\Delta v_a, s_a) = 0$, 得到方程式(18)、式(19)。

$$(\bar{\mathbf{H}}_a^k) \Delta v_a^k + \left(\sum_{a=1}^{(a,b)} \bar{\mathbf{A}}_a^k \right)^T (\boldsymbol{\kappa}^s)^k = 0 \quad (18)$$

$$\left(\sum_{a=1}^{(a,b)} \bar{\mathbf{A}}_a^k \right)^T \Delta v_a^k (\boldsymbol{\kappa}^s)^k - \frac{1}{\mu} \mathbf{I} (\boldsymbol{\kappa}^s)^k = \left(- \sum_{a=1}^{(a,b)} \bar{\mathbf{A}}_a^k v_a^k - \frac{1}{\mu} \boldsymbol{\kappa}^{k-1} \right) \quad (19)$$

式(18)、式(19)的 KKT 矩阵表达式为

$$\begin{pmatrix} \bar{\mathbf{H}}_a^k & \left(\sum_{a=1}^{(a,b)} \bar{\mathbf{A}}_a^k \right)^T \\ \sum_{a=1}^{(a,b)} \bar{\mathbf{A}}_a^k & -\frac{1}{\mu} \mathbf{I} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta v_a^k \\ (\boldsymbol{\kappa}^s)_a^k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ - \left(\sum_{a=1}^{(a,b)} \bar{\mathbf{A}}_a^k \right) v_a^k - \frac{1}{\mu} \boldsymbol{\kappa}^{k-1} \end{pmatrix} \quad (20)$$

$\bar{\mathbf{H}}^k$ 是正定矩阵时, 每个分区可以得到第二层的最优步长增量。因此, 对 $\bar{\mathbf{H}}^k$ 进行特征值分解, 得到特征值和右特征矢量 \mathbf{V} 、 \mathbf{D} , 满足 $\bar{\mathbf{H}}_a^k \cdot \mathbf{V} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{D}$, 当 \mathbf{D} 对角线元素全部大于 10^{-4} 满足正定条件, 如果不满足, 利用 $\bar{\mathbf{H}}_a^k = \mathbf{V} \cdot (\text{diag}(\mathbf{D}) + 10^{-4}) \cdot \mathbf{V}$ 更新 $\bar{\mathbf{H}}_a^k$, 则可得到子区域的全局最优步长增量。

式(20)通过 KKT 条件消去方程法可得

$$\Delta v_a^k = ((\boldsymbol{\kappa}^s)_a^{k+1})^{-1} \left(\left(\sum_{a=1}^{(a,b)} \bar{\mathbf{A}}_a^k \right)^T (\boldsymbol{\kappa}^s)_a^k \right) \quad (21)$$

$$\left(\mu^{-1} \mathbf{I} + \left(\sum_{a=1}^{(a,b)} \bar{\mathbf{A}}_a^k \right)^T (\bar{\mathbf{H}}_a^k)^{-1} \left(\sum_{a=1}^{(a,b)} \bar{\mathbf{A}}_a^k \right)^T \right) (\boldsymbol{\kappa}_a^s)^k = \left(\sum_{a=1}^{(a,b)} \bar{\mathbf{A}}_a^k \right) v_a^k + \mu^{-1} \mathbf{I} \boldsymbol{\kappa}_a^k \quad (22)$$

对式(21)、式(22)采用高斯迭代的思想, 先求解式(22)中的对偶乘子系数 $\boldsymbol{\kappa}_a^s$, 再更新式(21)中的搜索方向 Δv_a 。可以看出主要的分解问题在于式(22), 基于相邻分区的信息传递求解每个分区对偶乘子系数 $\boldsymbol{\kappa}_a^s$, 简化式(22)可以得到

$$\left(\mu^{-1} \mathbf{I} + \sum_{a=1}^{(a,b)} \mathbf{S}_a^k \right) (\boldsymbol{\kappa}_a^s)^k = \mu^{-1} \boldsymbol{\kappa}^k + \sum_{a=1}^{(a,b)} \mathbf{S}_a^k \quad (23)$$

式中: $\mathbf{S}_a^k = \bar{\mathbf{A}}_a^k (\bar{\mathbf{H}}_a^k)^{-1} (\bar{\mathbf{A}}_a^k)^T$; $s_a^k = \bar{\mathbf{A}}_a^k (v_a^k)$ 。

每个分区耦合约束中, 任意两个相邻子问题 a 、 b 存在 \mathbf{A}_a 中的第 i, j 行元素非 0, 将 $\mathbf{A}_{i c_i} (\mathbf{A}_{i c_i} \in \{1, 2, \dots, c_i\})$ 定义为 \mathbf{A}_i 中第 c_i 行非 0 元素的集合, 即

耦合变量所对应的矩阵信息。因此, 通过提取每个分区 $\tilde{\mathbf{S}}_a^k$ 、 \tilde{s}_a^k 中与耦合变量有关的矩阵信息, 可以得到矩阵 $\hat{\mathbf{S}}_a^k = (\mathbf{I}_a^{c_a * n_{c_a}})^T \tilde{\mathbf{S}}_a^k (\mathbf{I}_a^{c_a * n_{c_a}})$ 和向量 $\hat{s}_a^k = \mathbf{I}_a^{c_a * n_{c_a}} * \tilde{s}_a^k$, 其中,

$$\mathbf{I}_a^{c_a * n_{c_a}} = \begin{cases} 1, \mathbf{A}_a(j_a) \neq 0 \\ 0, \mathbf{A}_a(j_a) = 0 \end{cases} \quad (24)$$

$$\hat{\mathbf{S}}_a^k = \mu^{-1} (\mathbf{I}_a^{c_a * n_{c_a}})^T \Lambda_a (\mathbf{I}_a^{c_a * n_{c_a}}) \quad (25)$$

$$\hat{s}_a^k = \mu^{-1} \lambda_a^{k+1} (\mathbf{I}_a^{c_a * n_{c_a}})^T \Lambda_a (\mathbf{I}_a^{c_a * n_{c_a}})$$

式中: $\Lambda_a = \frac{1}{(\mathbf{I}_a^{c_a * n_{c_a}})^T \left(\sum_{a=1}^N (\mathbf{I}_a^{c_a * n_{c_a}})^T (\mathbf{I}_a^{c_a * n_{c_a}}) \right) (\mathbf{I}_a^{c_a * n_{c_a}})}$;

$\mathbf{A}_a(j_a)$ 表示每个分区耦合矩阵中第 $j_a (j_a \in \mathbf{A}_{acc})$ 行元素。

以上每个分区的对偶乘子模型(23)重新表示为

$$(\hat{\mathbf{S}}_a^k) \boldsymbol{\kappa}_a^s = (\hat{s}_a^k) \quad (26)$$

式中: $\hat{\mathbf{S}}_a^k = \mu^{-1} \mathbf{I} + \sum_{a=1}^{(a,b)} \mathbf{S}_a^k$; $\hat{s}_a^k = \mu^{-1} \mathbf{I} \boldsymbol{\kappa}_a^k + \sum_{a=1}^{(a,b)} s_a^k$ 。

求解 $\mathbf{A}x = b$ 等价于求解: $\min \|\mathbf{A}x - b\|_2^2$, 将其展开后可以得到: $\min \frac{1}{2} x^T \mathbf{A}^T \mathbf{A} x - b^T \mathbf{A} x + b^T b$ 也就是等价于求解 $\min \frac{1}{2} x^T \mathbf{A}^T \mathbf{A} x - b^T \mathbf{A} x$ 。故式(26)处理为求解每个分区对偶乘子 $\boldsymbol{\kappa}_i^s$ QP 模型。

$$\min_{\boldsymbol{\kappa}_a^s} \frac{1}{2} \boldsymbol{\kappa}_a^s \sum_{a=1}^N \hat{\mathbf{S}}_a^k \boldsymbol{\kappa}_a^s - \sum_{a=1}^N \hat{s}_a^k \boldsymbol{\kappa}_a^s \quad (27)$$

利用已知点处的梯度构造一组共轭方向, 并沿这组方向进行搜索, 基于共轭梯度 (Conjugate Gradient, CG) 算法^[29]求解每个分区的对偶乘子 $\boldsymbol{\kappa}_a^s$ 。

2.2.2 更新每个分区 SQP 模型步长增量和变量解

根据式(21)计算分区 a 的最优步长增量, 可以表示为

$$d_a^{k+1} = \mathbf{Z}_a * \Delta v = \mathbf{Z}_a \bar{\mathbf{H}}_a^{-1} (-\bar{\mathbf{A}}_a^T (\boldsymbol{\kappa}_a^s)^{k+1}) \quad (28)$$

修正式(13)中的迭代步长增量, 则得到第 $k+1$ 次的变量解。

$$(x_a^s)^{k+1} = x_a^{k+1} + \alpha_1 (d_a^{k+1}), 0 < \alpha_1 \leq 1 \quad (29)$$

2.2.3 更新第一层中的一致性参数和对偶乘子信息

更新第一层中第 $k+1$ 次迭代的一致性参数 z_a^{k+1} 及其对偶乘子参数值 $(\boldsymbol{\kappa}^s)^{k+1}$ 。

$$z_a^{k+1} = (x_a^s)^{k+1} \quad (30)$$

$$(\boldsymbol{\kappa}^s)^{k+1} = (\mathbf{I}_a^{c_a * n_{c_a}})^T * \Lambda_a * (\boldsymbol{\kappa}_a^s)^{k+1} \quad (31)$$

$$(\boldsymbol{\kappa}^s)^{k+1} = (\boldsymbol{\kappa}^s)^{k+1} \quad (32)$$

返回算法的第一层继续进行第 $k+1$ 次迭代, 直

至算法满足收敛精度及其最大迭代次数。

2.2.4 惩罚因子 ρ 修正原则

为了改善双层 ALADIN 算法的收敛性, 通常考虑在每次迭代中更新惩罚系数, 使得算法的收敛性能更少地依赖于惩罚系数的初值, 本文按照以下原则修正惩罚因子。

$$\rho^{k+1} = 1.1\rho^k \quad (33)$$

设置惩罚因子的最大值 $\rho^{\max} = 10\ 000$, 避免因 ρ 的取值过大而造成算法的假收敛。

3 算例分析

为了验证算法的有效性, 本文对 30 节点和 182 节点系统进行分布式潮流计算, 系统中含有无功限幅约束和环网, 增加了潮流模型的非凸性, 这对分布式算法的鲁棒性要求很高。本文所提算法能够满足任意形式的分区方式, 具有划分方式的普适性。

算例分析实验基于 Matlab R2018b 平台和 Casadi^[31] 工具箱, 模拟测试在一台笔记本电脑上, 英特尔 i7-8550 (1.99 GHz) 和 16 GB 内存。

3.1 30 节点系统

30 节点系统的拓扑结构如图 2 所示, 为了验证本文所提算法能够满足任意形式的分区方式, 具有划分方式的普适性。将 30 节点系统分别划分为两区域、三区域和四区域, 不同划分方式下的分区示意图如图 3 所示。

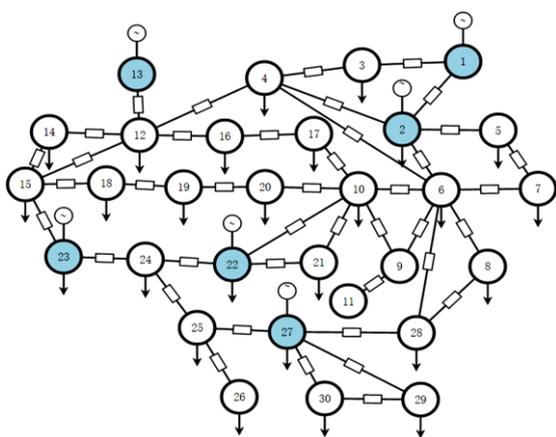
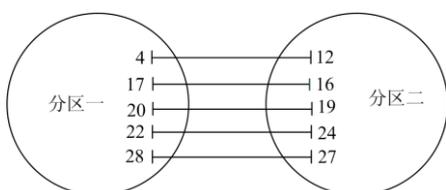
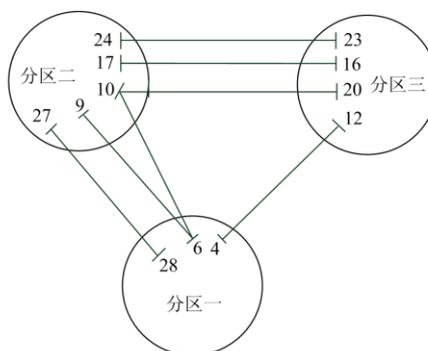


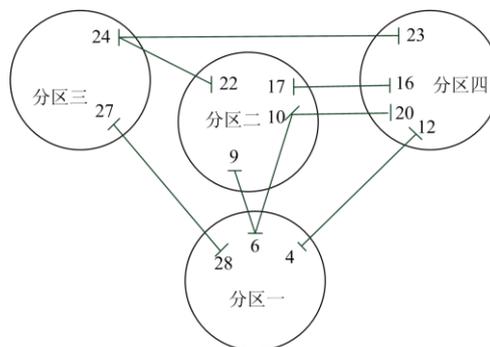
图 2 30 节点系统拓扑结构
Fig. 2 30-bus system topology



(a) 两分区示意图



(b) 三分区示意图



(c) 四分区示意图

图 3 30 节点系统不同划分方式下分区示意图

Fig. 3 Partition situation of 30-bus system under different partitioning methods

3.1.1 收敛情况分析

30 节点系统进行分布式潮流计算时, 每个分区分别进行独立的潮流计算, 期间仅交换耦合边界信息。不同的区域划分方式下, 分布式计算的收敛效果如图 4 所示。大约经过 22 次外部迭代, 三种分区方式的边界判据方程的对偶残差都减小到 10^{-10} , 表明本文算法具有划分方式的普适性, 不同的分区方法不会影响计算精度和收敛性。

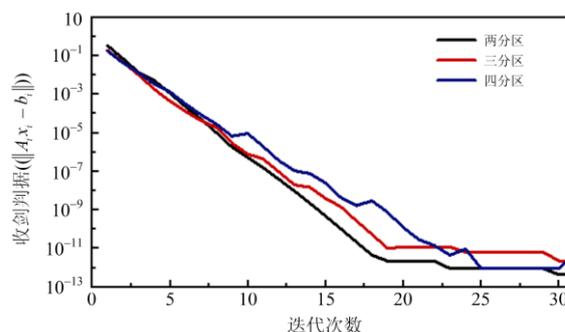


图 4 三种的区域划分方式下的收敛情况

Fig. 4 Convergence under the three regional division methods

3.1.2 计算结果准确性分析

如图 5 所示, 在不同的分区方式下, 本文分布

式算法与集中式牛顿法的计算结果基本一致，平均误差为 10^{-9} ，表明区域的不同划分方式未对本文所提的分布式算法造成影响，结果依然保持着较高的精度。

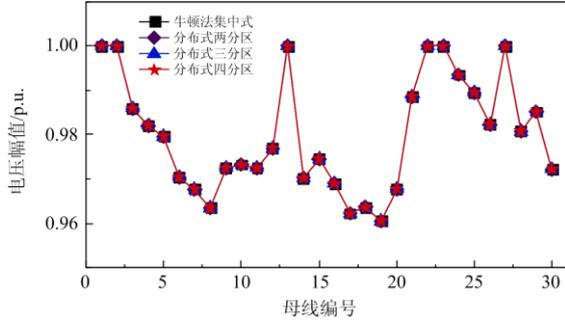


图 5 计算结果准确性分析

Fig. 5 Accuracy analysis of calculation results

3.2 182 节点系统

182 节点系统由改进的 IEEE118 和两个 IEEE33 系统组成，具体数据可参考文献[23]。如图 6 所示，将其划分为 4 个区域，电网分区一与电网分区二通过联络线 23-24、43-44、38-65 和 42-49 耦合连接，电网分区一与电网分区三、电网分区四分别通过联络线 54-151、59-119 耦合连接。各区域内母线编号如表 1 所示，无功限幅发电机参数如表 2 所示。

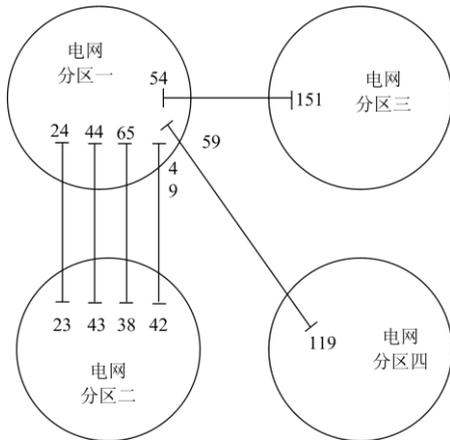


图 6 182 节点四分区分区示意图

Fig. 6 182-bus 4-partition diagram

表 1 区域母线划分情况

Table 1 Division of regional busbars

分区情况	母线所属区域
电网分区一	24,44-59,60-79,80-89,90-99,100-112,116,118
电网分区二	1-9,10-19,20-23,25-29,30-39,40-43,113-115,117
电网分区三	151-159,160-169,170-179,180,181,182
电网分区四	119,120-129,130-139,140-149,150

表 2 无功出力越限的发电机参数(标么制)

Table 2 Parameters of generator with reactive

power over-limit (per unit)

发电机节点	无功上限	无功下限	无功锁定限值
19	0.24	-0.08	下限
34	0.24	-0.08	下限
49	2.1	-0.85	上限
55	0.23	-0.08	上限
56	0.15	-0.08	上限
59	2	-0.6	上限
61	3	-1	上限
62	0.2	-0.2	上限
65	2	-0.67	上限
92	0.09	-0.03	下限
103	0.4	-0.15	上限

3.2.1 算法收敛性和精确性分析

182 节点系统进行分布式计算时，四个分区之间相互独立进行，无需相互等待，且不需要考虑执行顺序，仅交换分区之间的边界信息，如图 7 所示，大约经过 15 次外部迭代后对偶残差减小到 10^{-10} ，表明了本文算法由于利用了二阶梯度信息，极大地加快了收敛速度，且收敛精度高。

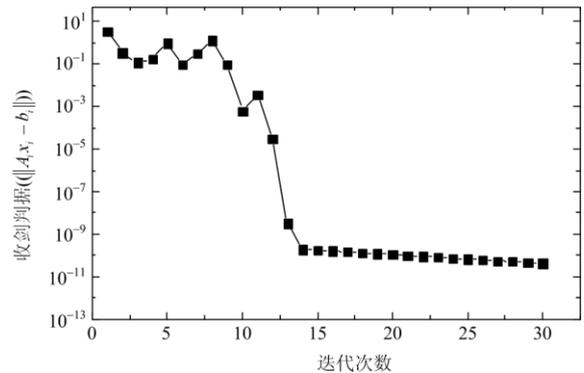


图 7 182 节点系统迭代次数与收敛判据分析

Fig. 7 Analysis of iteration times and convergence criterion of 182-bus system

为了验证本文所提算法求解较大系统时的准确性，图 8 比较了本文分布式算法与集中式投影信赖域算法(Projected Levenberg-Marquardt, PLM)^[23]、集中式牛顿法的潮流计算结果。结果表明，本文分布式算法可以达到与集中式 PLM 算法、集中式牛顿法相同的计算精度，因此本文所提算法具有较高的准确性。

3.2.2 非光滑无功限幅特性

在处理非光滑无功限幅约束时，本文所提算法与传统的启发式牛顿法相比，能更鲁棒地处理潮流

迭代过程中出现多个 PV 节点无功出力同时越限的情况。如表 3 所示, 本文算法在处理非光滑互补约束时, 无需对压控节点进行启发式逻辑判断, 就能有效考虑 PV 节点无功电压特性, 得到正确的潮流结果, 克服了牛顿法需对节点类型进行多次识别的繁琐问题。因此在保持同等计算精度的情况下, 本文所提算法迭代次数少于牛顿法集中式求解。两种算法都是以平启动的方式运行。

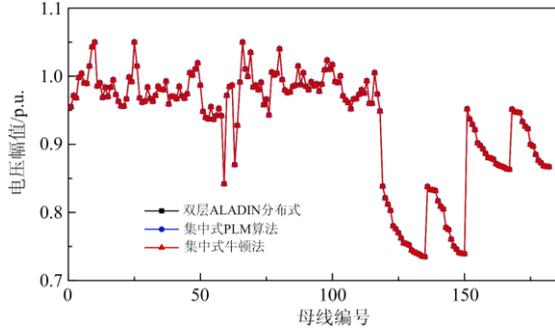


图 8 母线电压幅值计算结果

Fig. 8 Amplitude calculation of bus voltage

表 3 双层 ALADIN 与启发式牛顿法处理非光滑约束
Table 3 Comparison of bi-level ALADIN and Newton's method for non-smooth constraint

迭代次数	电压幅值失配量		
	双层 ALADIN 算法	启发式牛顿法	启发式 PV-PQ 逻辑识别
1	0.045 774	0.056 924	a
2	0.015 592	0.031 872	
3	0.021 278	0.029 583	
4	0.034 695	0.029 563	
5	0.006 973	0.029 563	
6	0.005 215	0.084 945	b
7	0.005 293	0.022 709	
8	0.001 707	0.005 065	
9	1.30×10^{-5}	0.003 055	
10	5.79×10^{-6}	0.003 022	
11	1.64×10^{-6}	0.003 021	
12	2.46×10^{-8}	0.153 512	c
13	—	0.077 718	
14	—	0.021 940	
15	—	0.003 153	
16	—	9.45×10^{-5}	
17	—	1.10×10^{-7}	
18	—	2.47×10^{-8}	

牛顿法集中式处理非光滑限幅约束时需要进行启发式节点类型转换, 不断锁定 PV 节点无功出力的上下限, 将其转换成 PQ 节点, 继续进行潮流迭

代, 直至收敛, 具体 PV-PQ 逻辑转换如表 4 所示。而双层 ALADIN 算法无需进行启发式节点类型转换即可收敛, 故迭代次数更少。

表 4 牛顿法 PV-PQ 逻辑转换

Table 4 Newton method PV-PQ logic conversion

识别位置	启发式逻辑转换节点编号	迭代次数
a	53 个 PV 节点, 1 个平衡节点	5
b	无功锁定上限: 49,56,65,103	6
	无功锁定下限: 19,34,92	
c	无功锁定上限: 55,56,61,62	7

无功越限时, PV 节点进行 Q_{Gi} 和 U_i^+ 约束交换的解点是一个连续但不可微点, 如图 9 所示, 传统的启发式牛顿法在两者发生互补交换时为非光滑直角, 缺乏足够的方向性。然而, 本文算法通过 FB 函数光滑化处理后, 在迭代过程中可以平稳地改变方向, 因此迭代次数更少, 收敛精度更高。

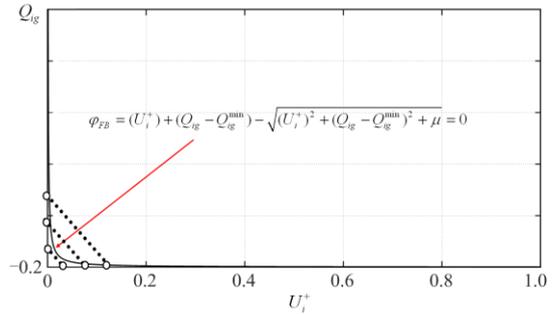


图 9 互补约束的非光滑直角

Fig. 9 Non-smooth right angles with complementary constraints

3.2.3 初始值敏感性分析

在潮流计算过程中, 不同的计算方法对初值的敏感程度不同, 不合适的初值条件会导致计算失败。如图 10 所示, 在相同的劣初值条件下, 用牛顿法进行求解时, 计算发散, 无法得到正确解; 而双层 ALADIN 算法方法在迭代 8 次后电压幅值失配量减

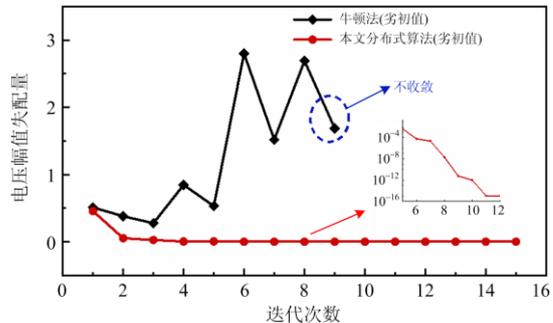


图 10 初值对算法收敛性影响

Fig. 10 Influence of the initial value on the convergence of the algorithm

小到 10^{-8} ，可以得到正确的潮流解。因此，本文所提算法对初值不敏感，在恶劣初值条件下仍具有较好的收敛性。

3.2.4 步长控制影响分析

式(29)的步长因子参数 a_1 ($0 < a_1 \leq 1$) 的设置情况会影响算法的收敛效率，图 11 分析了 $a_1 \in [0.2 \sim 1]$ 时，182 节点算例的收敛情况。当步长因子设置的过大 $a_1 \in [0.8 \sim 1]$ 时，算法虽然能够很快收敛，但是迭代过程中会出现数值震荡；当步长因子过小时，数值计算比较稳定，一直是趋向下降的方向，但迭代次数较多。在图中我们发现当 $a_1 \in [0.6 \sim 0.8]$ 时，算法效率高的同时保证迭代过程中数值相对稳定。

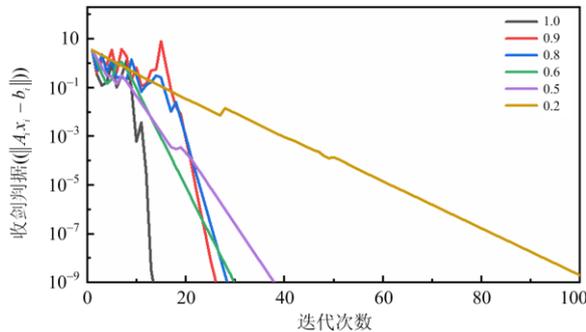


图 11 步长因子 a_1 对算法收敛性的影响

Fig. 11 Step size factor a_1 affects the convergence of the algorithm

3.2.5 通信量分析

分布式算法的数据通信量大小是决定算法性能好坏关键因素之一。以 182 节点系统为例进行通信量分析，在第一层计算时，各分区完全相互独立，相邻分区无信息交互。在第二层计算时无需全局通信，仅交换相邻区域的边界耦合信息，图 12 中介绍了相邻区域间海森矩阵的信息交换情况，其中 A 表示每个分区中海森矩阵的大小，B 中提取每个分区海森矩阵中耦合变量的行列信息，最后将相邻区域的耦合信息相加得到每个分区对偶乘子的 QP 分解模型。因此，本文所提算法在分布式计算时，各调度中心的通信数据量较小。

3.3 测试系统计算时长

为了更直观反映本文分布式算法的计算效率，对 30 节点和 182 节点的计算时长进行分析，设置收敛精度为 $\varepsilon = 1 \times 10^{-10}$ 。由表 5 可知，分布式算法的计算时长会随着电网规模的扩大而增加；同时，针对同一系统，分布式算法的计算时间也会随着分区数目的增加而变长，这是由于系统的边界信息交换量会随分区数目增加而变大。但是，为了解决区域间存在数据难以共享及数据隐私问题，本文全分布

式算法强调各区域内的独立运行，期间仅交换有限边界耦合信息，因此其计算时长是可以接受的。

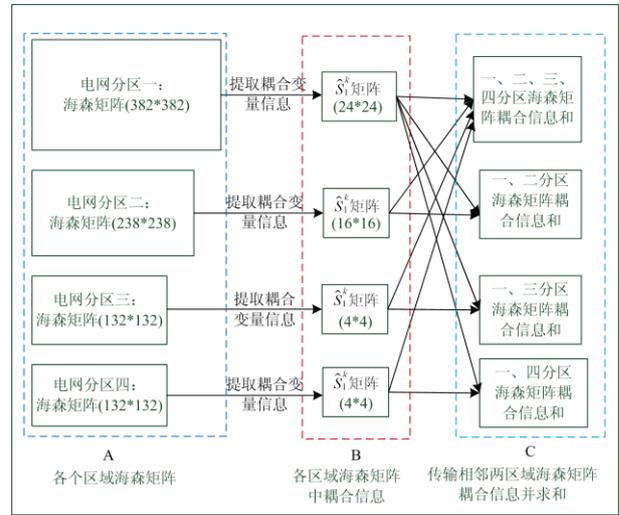


图 12 182 节点系统相邻分区通信量分析

Fig. 12 Analysis of the traffic volume of adjacent partitions in 182-bus system

表 5 本文全分布式算法的计算时长

Table 5 Computation time of fully distributed algorithm

系统	分区数目	计算时长/s
30 节点	2	1.344 3
	3	1.425 3
	4	1.683 6
182 节点	4	3.352 9

4 结论

本文提出了一种能够鲁棒性处理非光滑限幅约束的全分布式潮流计算方法。该方法基于具有二阶收敛性的双层 ALADIN 算法，通过较少的迭代次数达到很高的收敛精度。多区域互联电网的每个分区只需要与相邻分区交互极其有限的信息，且无需协调层参与，通信负担很轻。算例结果表明，该方法收敛精度高，比启发式规则处理非光滑约束更具鲁棒性，因此更适合实际的工程应用需求。本文目前没有考虑含大量分布式电源的三相不平衡配电网对分布式算法的收敛性影响，这是在未来的研究中需要进一步考虑和解决的问题。

参考文献

[1] 叶亮, 吕智林, 王蒙, 等. 基于最优潮流的含多微网的主动配电网双层优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(18): 27-37.
YE Liang, LÜ Zhilin, WANG Meng, et al. Bi-level programming optimal scheduling of ADN with a

- multi-microgrid based on optimal power flow[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(18): 27-37.
- [2] 赵晋泉, 江晓东, 张伯明. 潮流计算中 PV-PQ 节点转换逻辑的研究[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(1): 57-62.
ZHAO Jinqun, CHIANG Hsiaodong, ZHANG Boming. Study on PV-PQ bus type switching logic in power flow computation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(1): 57-62.
- [3] 程云祥, 李阳, 卢芳, 等. 多源信息辅助分区的主动配电网故障区段定位[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(17): 147-161.
CHENG Yunxiang, LI Yang, LU Fang, et al. Fault-section location for active distribution networks assisted by multi-source information[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(17): 147-161.
- [4] 周计晨, 吕胤杰, 杨诚之, 等. 考虑风电出力不确定性的分布鲁棒主备协同优化调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(20): 66-73.
ZHOU Jichen, LÜ Yinjie, YANG Chengzhi, et al. Distributionally robust co-optimization of energy and reserve dispatch considering uncertain wind power output[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 48(20): 66-73.
- [5] YANG Y, SONG A, LIU H, et al. Parallel computing of multi-contingency optimal power flow with transient stability constraints[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2018, 3(2): 204-213.
- [6] SUN H, GUO Q, ZHANG B, et al. Master-slave-splitting based distributed global power flow method for integrated transmission and distribution analysis[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, 6(3): 1484-1492.
- [7] 张海波, 张伯明, 孙宏斌. 分布式潮流计算异步迭代模式的补充和改进[J]. *电力系统自动化*, 2007, 31(2): 12-16.
ZHANG Haibo, ZHANG Boming, SUN Hongbin. Supplement and improvement of asynchronous iteration mode for distribute power flow between multi control centers[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 31(2): 12-16.
- [8] 巨云涛, 杨烁, 赵乐, 等. 含大规模热泵的配电网异步迭代分布式三相潮流计算[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(20): 46-51.
JU Yuntao, YANG Shuo, ZHAO Le, et al. Distributed three-phase load flow accommodated large scale heat pumps based on asynchronous iteration scheme[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(20): 46-51.
- [9] 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[J]. *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[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, 30(9): 5-8.
- [10] 汪芳宗, 杨力森, 高学军, 等. 基于松弛牛顿法的互联电网并行分布式潮流计算方法[J]. *继电器*, 2007, 35(16): 18-22.
WANG Fangzong, YANG Lisen, GAO Xuejun, et al. Parallel and distributed load flow solution of interconnected power system using relaxed Newton method[J]. *Relay*, 2007, 35(16): 18-22.
- [11] 黄平, 沈沉, 陈颖. 多层电力系统的异步迭代分布式潮流计算[J]. *电网技术*, 2008, 32(7): 19-24.
HUANG Ping, SHEN Chen, CHEN Ying. An asynchronous iterative distributed algorithm for unified power flow calculation of vertically integrated power systems[J]. *Power System Technology*, 2008, 32(7): 19-24.
- [12] 赵晋泉, 徐鹏, 高宗和, 等. 基于子网边界等值注入功率的异步迭代分布式潮流算法[J]. *电力系统自动化*, 2010, 34(18): 11-15.
ZHAO Jinqun, XU Peng, GAO Zonghe, et al. An asynchronous iterative distributed power flow algorithm based on the boundary bus injection power[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, 34(18): 11-15.
- [13] 孙宏斌, 郭焯, 张伯明. 含环状配电网的输配全局潮流分布式计算[J]. *电力系统自动化*, 2008, 32(13): 11-15.
SUN Hongbin, GUO Ye, ZHANG Boming. Distributed global power flow calculation for whole transmission and looped distribution networks[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2008, 32(13): 11-15.
- [14] LI Z, WANG J, GUO Q. Transmission contingency analysis based on integrated transmission and distribution power flow in smart grid[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 30(6): 1-12.
- [15] ZHENG W, WU W. Distributed multi-area load flow for multi-microgrid systems[J]. *IET Generation, Transmission, and Distribution*, 2019, 13(3): 327-336.
- [16] 陈刚, 杨毅, 杨晓梅, 等. 基于分布式牛顿法的微电网群分布式优化调度方法[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(21): 156-162.

- CHEN Gang, YANG Yi, YANG Xiaomei, et al. Distributed optimization scheduling method for microgrid cluster based on distributed Newton method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 156-162.
- [17] 高长征, 阎博, 王佳蕊, 等. 具有指数收敛速度的电力系统全分布式潮流算法[J]. 中国电力, 2019, 52(10): 85-91.
- GAO Changzheng, YAN Bo, WANG Jiarui, et al. A fully distributed power flow algorithm with exponentially fast convergence[J]. Electric Power, 2019, 52(10): 85-91.
- [18] 黄开艺, 艾芊, 张宇帆, 等. 基于多智能体系统的多区域互联分布式潮流算法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(7): 174-180.
- HUANG Kaiyi, AI Qian, ZHANG Yufan, et al. Multi-area interconnected distributed power flow algorithm based on multi agent system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7): 174-180.
- [19] HOUSKA B, FRASCH J, DIEHL M. An augmented Lagrangian based algorithm for distributed nonconvex optimization[J]. SIAM Journal on Optimization, 2016, 26(2): 1101-1127.
- [20] MEYER-HUEBNER N, SURIYAH M, LEIBFRIED T. Distributed optimal power flow in hybrid AC-DC grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 2937-2946.
- [21] 李保卫, 李佩杰, 韦化. 用于改进潮流计算中 PV-PQ 节点类型转换逻辑的非线性规划模型[J]. 电网技术, 2009, 33(3): 29-32.
- LI Baowei, LI Peijie, WEI Hua. A nonlinear programming model for improving type switching logic of PV-PQ nodes in power flow computation[J]. Power System Technology, 2009, 33(3): 29-32.
- [22] 郭壮志, 陈涛, 徐其兴, 等. 配电网故障区段定位的互补松弛约束新模型与算法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 129-137.
- GUO Zhuangzhi, CHEN Tao, XU Qixing, et al. Novel fault section location model for distribution network with complementary relaxation constraints and its algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 129-137.
- [23] JU Y, ZHANG Z, WU W, et al. A bi-level consensus ADMM-based fully distributed inverter-based volt/var control method for active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(1): 476-487.
- [24] JU Y, WANG J, ZHANG Z. An improved power flow method to cope with non-smooth constraints of integrated energy systems[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 7: 1-10.
- [25] DIAZ G, GONZALEZ-MORAN C. Fischer-Burmeister-Based method for calculating equilibrium points of droop-regulated microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 959-967.
- [26] CHEN B, CHEN X, KANZOW C. A penalized Fischer-Burmeister NCP-function[J]. Mathematical Programming, 2000, 88(1): 211-216.
- [27] WÄCHTER A, BIEGLER L T. On the implementation of an interior-point filter line-search algorithm for large-scale nonlinear programming[J]. Mathematical Programming, 2006, 106(1): 25-57.
- [28] HEWETT R, HEATH M, BUTALA M, et al. A robust null space method for linear equality constrained state estimation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(8): 3961-3971.
- [29] AHMED H I, AL-KAWAZ R Z, AL-BAYATI A Y. Spectral three-term constrained conjugate gradient algorithm for function minimizations[J]. Journal of Applied Mathematics, 2019, 2019: 1-6.
- [30] SPILLANE N. An Adaptive Multi-preconditioned conjugate gradient algorithm[J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 2016, 38(3): 1896-1918.
- [31] ANDERSSON J, GILLIS J, DIEHL M. CasADi: a software framework for nonlinear optimization and optimal control[J]. Mathematical Programming Computation, 2019, 11: 1-36.

收稿日期: 2021-08-18; 修回日期: 2021-12-16

作者简介:

巨云涛(1985—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为高比例可再生能源系统的分布自律-集中协同的稳定分析与优化调控技术、分布式协同能量管理系统; E-mail: juyuntao@cau.edu.cn

张紫枫(1995—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为高比例可再生能源系统的分布自律-集中协同的稳定分析与优化调控技术; E-mail: zzf_edu@126.com

刘文武(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高比例可再生能源系统的分布自律-集中协同的稳定分析与优化调控技术。E-mail: liuww0921@126.com

(编辑 张爱琴)