

基于多智能体系统的多区域互联分布式潮流算法

黄开艺¹, 艾 芊¹, 张宇帆¹, 周嘉侃²

(1. 上海交通大学 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240;
2. 上海交通大学 海洋工程国家重点实验室, 上海 200240)

摘要:针对多区域间潮流计算存在数据难以共享及数据隐私问题,提出一种基于多智能体系统(MAS)的多区域互联分布式潮流算法。首先,介绍基于MAS的多区域分布式潮流计算框架,并给出一种考虑数据保护的各级多智能体协调互动方式。然后基于主网、区域管理(包括外层管理智能体和内层管理智能体)两级多智能体结构,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算法,以实现多区域间通信少量非重要信息,各区域内指数快速收敛的目标。最后,分别以6节点、30节点、118节点系统为测试系统,并与集中式算法进行比较分析,验证所提算法的有效性和可拓展性。

关键词:分布式算法;潮流计算;多智能体系统;改进投影搜索法;隐私保护

中图分类号: TM 711

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202005020

0 引言

随着区域间电网的互联不断加强,电网呈现向复杂耦合方向发展的趋势。由于多区域互联有利于资源在全网中的配置,因此实现多区域的协调合作,提升系统的可靠性成为国内外电网的发展趋势^[1-2]。潮流计算作为电力系统中最基本的运算之一,是故障计算、稳定分析、优化方案及调整运行方式等方面的有力支撑,因此有必要对整个多区域互联系统进行潮流计算,以提高系统的安全稳定运行水平^[3]。

然而,受制于一些现实因素,如各电力公司间存在信息壁垒,现有的潮流算法难以应用于多区域互联或大规模电力系统。同时,受限多区域互联系统间通信基础设施的缺失,全局信息的收集存在通信瓶颈,数据无法完全公开共享,这使得传统集中式算法在计算互联电力系统的潮流问题方面更加困难。并且集中式潮流计算有数据计算规模庞大、计算耗时长、数据传输存在隐私问题等缺陷,而多区域互联系统的高效可靠运行依赖于调度控制的分布自治与协同管理^[4-5],因此研究分布式潮流计算具有重要意义。

现有的分布式潮流计算方法主要考虑系统分解与区域协调。文献[6]采取矩阵分裂法,将互联系统分为独立的子系统,进而利用 Sherman-Morrison-Woodbery 公式进行求逆运算,对子系统进行协调求解。文献[7]基于网格计算,提出输配电分裂解耦方法,输电网采取 PQ 分解法,配电网运用改进支路电流法。文献[8]构建双层分布式潮流计算系统,提出

分布式潮流异步协调算法:在上层系统潮流计算中将下层子区域简化为线性模型,而在下层子区域潮流计算中将上层系统处理为等值电源。文献[9]提出不同于 Ward 等值模型的子网边界节点等值注入功率的异步迭代分布式潮流算法,既避免了网络化简的工作,又减轻了协调者参与计算的计算量,保证了各区域的独立性。上述文献提出的分布式潮流算法,都需要各区域间具备通信条件,即以通信基础设施为基础。一方面,电力系统中的每个区域需将其边界总线电压和 / 或线路功率流信息上传到协调中心,这将妨碍用户隐私保护诉求;另一方面,任何通信线路发生故障可能影响多区域互联系统的运行,因而系统可靠性无明显提升,因此这些方法可称之为“半分布式”^[10]。针对具有高隐私需求的互联电力系统,有必要提出一种完全分布式的算法,每个区域仅需与相邻区域互通有限的信息,在保护区域隐私的同时,能够有效应对网络参数或电气数据获取不完整的情况,提升系统可靠性。

随着能源互联网^[11-12]的发展,电力系统形态结构发生了变化:以微网和多微网为代表的小型可控能源系统,成为了电力系统中具有可复制性和可拓展性的“有机细胞”^[13-14]。由于系统的互联性、灵活性和复杂程度逐步增强,潮流计算作为电力系统安全分析、故障计算和稳定计算等的基础^[3],需要具备“化繁为简”以及快速求解的能力。在此发展趋势下,多智能体系统 MAS (Multi Agent System) 以其具有分层分区、快速处理复杂问题^[15]的特点,在多区域互联问题中具有极强的应用前景。MAS 是由多个智能体 (Agent) 组成的系统,各智能体间各司其职、相互协同,因此 MAS 具有自主性和交互性的优点^[16]。在处理大规模复杂互联系统问题方面^[17],各 Agent 具有相互独立、自主判断、各自计算的能力,通过有

收稿日期:2019-08-25;修回日期:2020-03-22

基金项目:国家自然科学基金联合基金资助项目(U1866206)

Project supported by the National Natural Science Joint Foundation of China(U1866206)

限的信息交流保护数据隐私。

基于以上潮流计算存在的问题及 MAS 结构的优越性,本文在已有研究的基础上提出了一种基于 MAS 的全分布式潮流算法,该算法以主网、区域管理二级多智能体框架为基础,区域管理包含外层管理与内层管理,通过内外层迭代及改进迭代投影搜索法,实现指数快速^[18-19]求解线性潮流校正方程以及区域潮流分布。在全分布式潮流计算中,每个区域仅需依靠区域内层管理与相邻区域同级代理来交换潮流校正方程的偏差变量,实现了区域间数据隐私保护。

1 基于 MAS 的多区域分布式潮流计算框架

Agent 是对系统变化做出响应的自治单元,各 Agent 间通过信息沟通协作完成一定功能。MAS 是由 2 个及以上的 Agent 通过通信与合作建立的具有多层次、多元化的分布式自治计算系统^[20]。作为协调的智能系统,MAS 管理控制所有 Agent,为复杂系统的通信问题以及各区域内隐私问题的解决提供了思路^[21]。

为保护各区域内的潮流隐私信息,本文构建了基于 MAS 的多区域分布式潮流计算架构,如图 1 所示,总体架构可分为 2 层。

(1)主网 Agent:通过总体规划多区域互联的划分方式,根据下级 Agent 申报的潮流数据,制定相应的调度计划。主网与下层 Agent 的交互只存在于最初提供分区信息(或者分区情况变动时)以及最终获得求解结果的阶段。

(2)区域管理 Agent:分区后负责各区域内部的潮流求解,并进行结果合理性的分析评估,此过程不涉及区域间隐私数据的通信交流。区域管理 Agent 包括外层管理 Agent 与内层管理 Agent。

a. 外层管理 Agent:仅依据状态已知值和内层管

理 Agent 提供的偏差量数据整合信息,计算调整量,并评定结果是否合理。

b. 内层管理 Agent:根据调整值更新雅可比矩阵,任意(或者依照人工经验)选取内层迭代初始值进行迭代求解,并将结果返回外层管理 Agent。同时,内层管理 Agent 可与其他相连区域的内层管理 Agent 进行信息交流,即交换所求变量的迭代偏差量(每次迭代与上一次迭代的结果差值)。

需要注意的是,本文所提 MAS 结构的信息交互仅存在于与其他区域相连的内层管理 Agent 模块中,而且交互信息仅限于非重要信息(如各区域的迭代偏差量),而不是隐私信息(如各区域潮流值)。

2 分布式潮流计算结构及策略

2.1 基于牛拉法潮流计算的问题建模

牛拉法是通过将偏差公式 $F(\mathbf{x})$ 利用泰勒展开,略去高次项,通过反复求解并形成修正方程以达到求解目的的迭代算法。

$$F(\mathbf{x}) = \mathbf{h}^{\text{SP}} - \mathbf{h}(\mathbf{x}) = 0 \quad (1)$$

其中, $\mathbf{h}^{\text{SP}}$ 为节点注入功率; $\mathbf{x}$ 为要确定的节点电压变量(包括相角与幅值); $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ 为各节点电压等于 $\mathbf{x}$ 时的节点注入功率,其是关于节点电压变量的函数。使用牛拉法计算潮流时,首先设置初始点 $\mathbf{x}^{(0)}$,并在第 $k+1$ 次迭代过程中使用以下校正方程更新 $\mathbf{x}^{(k)}$ 直到满足 $\max |F(\mathbf{x}^{(k)})| < \varepsilon$ ($k=0, 1, \dots$),其中 ε 为收敛标准,具体如下:

$$\begin{cases} F(\mathbf{x}^{(k)}) = -J(\mathbf{x}^{(k)})\Delta\mathbf{x}^{(k)} \\ \mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} + \Delta\mathbf{x}^{(k)} \end{cases} \quad (2)$$

$$J(\mathbf{x}^{(k)}) = \left. \frac{\partial F}{\partial \mathbf{x}^T} \right|_{\mathbf{x}^{(k)}}$$

其中, $J(\mathbf{x}^{(k)})$ 为偏差公式在 $\mathbf{x}^{(k)}$ 点的雅可比矩阵。

潮流计算中修正方程式可表示为式(3)。

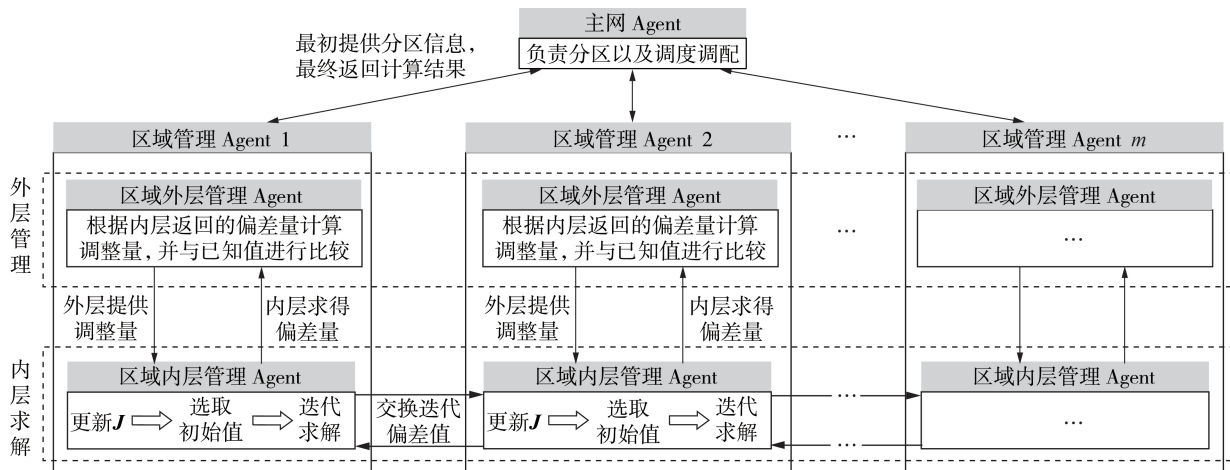


图 1 基于 MAS 的多区域分布式潮流计算结构

Fig.1 Multi-area distributed power flow calculation structure based on MAS

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P^{\text{SP}} - P^{\text{cal}} \\ Q^{\text{SP}} - Q^{\text{cal}} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} H & N \\ K & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U/U \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, ΔP 和 ΔQ 分别为有功和无功的偏差量; P^{SP} 和 P^{cal} 分别为有功的注入量和计算值; Q^{SP} 和 Q^{cal} 分别为无功的注入量和计算值; H 、 N 、 K 、 L 为雅可比矩阵对应分块, 具体表达式详见文献[17]; $\Delta \theta$ 和 ΔU 分别为电压相角和幅值的偏差量; U 为电压幅值。在集中潮流计算中, 所有区域的 $J(x^{(k)})$ 及其逆矩阵由控制中心计算; 而在分布式潮流计算中, 电力系统分为数个区域, 每个区域只需根据交换的有限信息, 计算对应于其自身潮流方程的 $J(x^{(k)})$ 。因此, 多区域电力系统分布式潮流计算的关键是以分布方式求解校正方程(如式(4)所示), 并记 $b = -F(x^{(k)})$ 。

$$J \Delta x = b \quad (4)$$

2.2 主网 Agent 分布式策略

在分布式算法中, 主网 Agent 仅承担区域划分的职责与接收下级 Agent 最终返回的调度要求, 为制定调度计划提供支持, 不涉及信息处理、计算功能。

假设将某互联系统划分为 m 个区域, 按照划分的区域, 可表示为:

$$J = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ \vdots \\ J_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & \cdots & J_{1m} \\ J_{21} & J_{22} & \cdots & J_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ J_{m1} & J_{m2} & \cdots & J_{mm} \end{bmatrix}, \Delta x = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_m \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix} \quad (5)$$

将所有区域的编号集合用 $\mathcal{N}$ 表示, 并且 $\mathcal{N} = \{i | i \in \{1, 2, \dots, m\}\}$ 。与区域 i 相连的区域用集合 $\mathcal{N}_i$ 表示。 $\mathcal{N}_i$ 解释如下: 对于一个包含 m 个区域的网络 $G(V, E)$, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 表示 G 中 m 个区域, $E \subseteq V \times V$ 表示区域与区域之间的关联情况, 其中 $V \times V = \{(v_i, v_j) | i, j \in \{1, 2, \dots, m\}\}$ 。若区域 p 与区域 q 相连, 则 $(v_p, v_q) \in E$ 。此处定义 p 为自身(p)的邻域, 即 $(v_p, v_p) \in E$ 。由此, 区域 i 的邻域可表示为 $\mathcal{N}_i = \{j | (v_i, v_j) \in E\}$ 。

m 个区域中 J_i 、 b_i 和 $\mathcal{N}_i$ 分别交由对应的区域管理 Agent 负责分布式计算。

2.3 区域管理 Agent 分布式策略

区域管理 Agent 在分布式潮流计算中承担主要职责, 即信息处理、分区计算、检验结果, 其包含外层管理 Agent 和内层管理 Agent。将预处理后的信息发送至外层管理 Agent, 之后外层与内层相互协作求解, 其中内层是算法的核心部分。

由于 J_i 是稀疏的(即含有较多零元素), 通过消去零块可将矩阵变得紧凑, 因此进行以下步骤。为了便于计算, 首先对 J_i 进行预处理, 将 J_i 中的零矩阵消去, 得到 $\bar{J}_i$, 其过程如下:

$$\bar{J}_i = J_i R_i^T \in \mathbb{R}^{n_i \times m_i} \quad (6)$$

$$R_i = \text{Col} \{E_k, k \in \mathcal{N}_i\} \in \mathbb{R}^{m_i \times n} \quad (7)$$

$$E_k = \begin{bmatrix} 0 & I_{n_k \times n_k} & 0 \\ n_k \times \sum_{i=1}^{k-1} n_i & & n_k \times \sum_{i=k+1}^m n_i \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{n_k \times n} \quad (8)$$

其中, n_i 为区域 i 内的潮流方程数, 且满足 $n = \sum_{i \in \mathcal{N}} n_i$ 和 $m_i = \sum_{k \in \mathcal{N}_i} n_k$ ($\mathcal{N}_i$ 的含义与 $\mathcal{N}_i$ 类似, 即表示与区域 k 相连的区域集合); $I_{n_k \times n_k}$ 为维数是 $n_k \times n_k$ 的单位矩阵; $\text{Col} \{\cdot\}$ 表示将集合 $\{\cdot\}$ 内的向量或矩阵依次按照顺序合并成同一列。同理, 对 Δx_i 进行预处理, 将区域 i 的变量 Δx_i 简化为 $\Delta \bar{x}_i$, 如式(9)所示。

$$\bar{J}_i \Delta \bar{x}_i = b_i \quad (9)$$

用 $\Delta \bar{x}_i^*$ 表示式(9)所得的精确解, Δx^* 表示式(4)所得的精确解。根据线性代数理论可知, 消去零块的分块方程与原方程解等价。已知方程:

$$\begin{cases} \bar{J}_i \Delta \bar{x}_i = b_i \\ J \Delta x = b \end{cases} \quad (10)$$

联立式(6)和式(10)可解得区域内求解结果、区域实际解以及整体解之间的关系如下:

$$\Delta \bar{x}_i^* = R_i^T \Delta x_i^* = \text{Col} \{\Delta \bar{x}_k^*, k \in \mathcal{N}_i\} \quad (11)$$

$$\Delta x^* = \text{Col} \{\Delta x_k^*, k \in \mathcal{N}\} \quad (12)$$

于是, 求解 $\Delta \bar{x}_i^*$ 成为区域 i 内的任务。下面将从外层与内层两部分, 利用非重要信息, 通过内层管理迭代使得 $\Delta \bar{x}_i \rightarrow \Delta \bar{x}_i^*$, 进而通过外层管理求得区域解 $\bar{x}_i \rightarrow \bar{x}_i^*$, 其中 $\bar{x}_i^*$ 为区域 i 的节点电压变量精确解, 后同。

2.3.1 区域外层管理 Agent 计算策略

区域外层管理 Agent 负责外层迭代: 收集从区域内层管理 Agent 传递的调整量 $\Delta \bar{x}_i$, 最终使得变量 $\bar{x}_i \rightarrow \bar{x}_i^*$ 。此部分只进行更新变量与判断结果, 不涉及与其他区域的信息交互。

2.3.2 区域内层管理 Agent 计算策略

内层管理计算是算法的核心部分, 保护了区域内的隐私: 在保证计算收敛的同时, 仅与其他区域交换非重要信息, 即迭代偏差量信息。本文中边界条件的满足(功率平衡、联络线约束等)是通过内层迭代实现的, 交换偏差量信息和内层迭代收敛至某一允许范围内保证了边界条件。

利用区域外层管理 Agent 反馈的外层迭代标量, 计算更新 $\bar{J}_i$ 和 b_i 。

将迭代次数记为 t , 利用改进迭代投影搜索法^[22]搜寻区域 i 及其邻域所有信息集合在解集空间上的投影, 逐步收敛到准确解。投影搜索法的迭代过程遵循:

$$\begin{aligned} \Delta \bar{x}_i(t+1) &= \Delta \bar{x}_i(t) - M_i(\Delta \bar{x}_i(t) - v_i(t)) - \\ &\quad \bar{J}_i^T (\bar{J}_i \bar{J}_i^T)^{-1} (\bar{J}_i \Delta \bar{x}_i - b_i) \end{aligned} \quad (13)$$

其中, $\mathbf{M}_i$ 为 $\text{Ker}(\bar{\mathbf{J}}_i)$ 的正交投影矩阵, $\text{Ker}(\bar{\mathbf{J}}_i)$ 表示 $\bar{\mathbf{J}}_i$ 的核; $\mathbf{v}_i$ 为区域 i 从邻域得到的所有信息的集合矩阵, 具体如式(14)和式(15)所示。

$$\bar{\mathbf{J}}_i(\mathbf{M}_i \mathbf{x}) = 0 \quad (14)$$

$$\mathbf{v}_i(t) = \text{Col} \left\{ \sum_{j \in \mathcal{N}_i \cap \mathcal{N}_k} w_{ijk} \mathbf{E}_k \mathbf{R}_j^T \Delta \bar{\mathbf{x}}_j(t) \ (k \in \mathcal{N}_i) \right\} \quad (15)$$

其中, w_{ijk} 为从邻域 j 的第 k 部分 (即 j 的第 k 个邻域) 接收的信息的权重。应该注意的是, 当且仅当 k 同时作为 i 和 j 的邻域时, 即 $k \in \mathcal{N}_i \cap \mathcal{N}_j$ 时 $w_{ijk} > 0$, 且权重需满足和为 1, 否则 $w_{ijk} = 0$ 。

式(13)允许每次进行内层迭代的初始值 $\Delta \bar{\mathbf{x}}_i(0) \in \mathbf{R}^{m_i}$ 可任意取值, 且算法最终收敛。

至此已对互联电力系统潮流计算问题进行建模: 每个区域 i 都有自己的变量 $\Delta \bar{\mathbf{x}}_i$, 各区域通过分布式算法交换待求迭代变化量, 运用最少的信息更新变量, 使得 $\Delta \bar{\mathbf{x}}_i$ 最终收敛到 $\Delta \bar{\mathbf{x}}_i^*$, 之后通过外层迭代使得 $\bar{\mathbf{x}}_i$ 收敛到 $\bar{\mathbf{x}}_i^*$ 。另外, 此算法通过 $\mathcal{N}_i$ 及 $\mathbf{J}_i$ 表示各区域之间的互联方式及互联区域相互作用结果, 因此对各区域间互联方式无要求, 故存在环的情况时也可以用此算法求解。

2.4 分布式算法初始值任意性、收敛性与抗干扰性分析

2.4.1 初始值任意性分析

正交投影矩阵 $\mathbf{M}_i$ 可表示为 $\mathbf{M}_i = \mathbf{I} - \bar{\mathbf{J}}_i^T (\bar{\mathbf{J}}_i \bar{\mathbf{J}}_i^T)^{-1} \bar{\mathbf{J}}_i$ 。由 $\bar{\mathbf{J}}_i \mathbf{M}_i = 0$, 将式(13)等式两边同乘以 $\bar{\mathbf{J}}_i$ 可得:

$$\bar{\mathbf{J}}_i \Delta \bar{\mathbf{x}}_i(t+1) = \bar{\mathbf{J}}_i \Delta \bar{\mathbf{x}}_i(t) - (\bar{\mathbf{J}}_i \Delta \bar{\mathbf{x}}_i - \mathbf{b}_i) = \mathbf{b}_i \quad t=0, 1, \dots \quad (16)$$

在内层迭代过程中, 无论 $\Delta \bar{\mathbf{x}}_i(0) \in \mathbf{R}^{m_i}$ 取值如何, 都能保证 $\Delta \bar{\mathbf{x}}_i(t)$ 是 $\bar{\mathbf{J}}_i \Delta \bar{\mathbf{x}}_i = \mathbf{b}_i$ 的解。因此, 初始值的任意性得以验证。

2.4.2 收敛性分析

定义误差如下:

$$\mathbf{e}_i(t) = \Delta \bar{\mathbf{x}}_i(t) - \Delta \bar{\mathbf{x}}_i^* = \Delta \bar{\mathbf{x}}_i(t) - \mathbf{R}_i \Delta \mathbf{x}^* \quad (17)$$

其中, $\mathbf{e}_i$ 为局部偏差变量与其精确解之间的误差。

根据式(9)及 $\bar{\mathbf{J}}_i \mathbf{R}_i \Delta \mathbf{x}^* = \mathbf{b}_i$, 可得:

$$\bar{\mathbf{J}}_i \mathbf{e}_i(t) = 0 \quad (18)$$

即 $\mathbf{e}_i(t) \in \text{Ker}(\bar{\mathbf{J}}_i)$ 。

由 $\mathbf{M}_i$ 性质及式(13), 误差可写作:

$$\mathbf{e}_i(t+1) = \mathbf{M}_i (\mathbf{v}_i(t) - \mathbf{R}_i \Delta \mathbf{x}^*) \quad (19)$$

$$\mathbf{v}_i(t) - \mathbf{R}_i \Delta \mathbf{x}^* = \text{Col} \left\{ \sum_{j \in \mathcal{N}_i \cap \mathcal{N}_k} w_{ijk} \mathbf{E}_k \mathbf{R}_j^T \mathbf{e}_j(t) \ (k \in \mathcal{N}_i) \right\} \triangleq \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \mathbf{W}_{ij} \mathbf{R}_j^T \mathbf{e}_j(t) \quad (20)$$

将 $\mathbf{W}_{ij} \mathbf{R}_j^T$ 记为 $\mathbf{S}_{ij}$, 则误差可被简洁地表示为:

$$\mathbf{e}_i(t+1) = \mathbf{M}_i \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \mathbf{S}_{ij} \mathbf{e}_j(t) \quad (21)$$

将 m 个区域集成, 可得:

$$\mathbf{e}(t+1) = \mathbf{M} \mathbf{S} \mathbf{e}(t) \quad (22)$$

$$\mathbf{e}(t) = \text{Col} \{ \mathbf{e}_1(t), \mathbf{e}_2(t), \dots, \mathbf{e}_m(t) \}$$

$$\mathbf{M} = \text{diag} \{ \mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2, \dots, \mathbf{M}_m \}$$

根据文献[23], w_{ijk} 的取值如式(23)所示时, 满足 $\mathbf{M} \mathbf{S} < \mathbf{I}$, $\mathbf{e}(t) \rightarrow 0$ 。

$$w_{ijk} = \begin{cases} 1 - \frac{d_{ik} - 1}{d_{ii}} & j = k \\ \frac{1}{d_{ii}} & j \in \mathcal{N}_i \cap \mathcal{N}_k, j \neq k \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (23)$$

由于 $\mathbf{M} \mathbf{S} < \mathbf{I}$, 式(22)中的 $\mathbf{e}(t+1)$ 将指数地快速收敛到 0, 使得 $\Delta \bar{\mathbf{x}}_i \rightarrow \Delta \bar{\mathbf{x}}_i^*$ 的过程呈指数方式快速收敛, 因而分布式算法的收敛性得以验证。

2.4.3 抗干扰性分析

本文提出的分布式算法具有一定抗干扰性, 可允许一定情况下的信息中断, 且计算结果仍保持正确: 若区域管理间 Agent 信息交换中断不引起互联区域形成新的孤岛 (此处定义孤岛为与其他区域完全无信息交换), 则此分布式算法依旧适用; 若区域管理间 Agent 信息交换中断引起互联区域形成孤岛, 则此孤岛无信息更新, 无法应用此分布式算法。

以一个人为构造的三区域环状互联简单网络为例, 分区方式如图 2 所示。用非线性函数 $f_1 \sim f_6$ 模拟非线性潮流系统, 详见附录 A 中式(A1)~(A6), 以此说明此算法的抗干扰性。将三区域间交换信息顺畅的情况与区域 1、3 间信息交换中断情况进行对比。处理信息中断的方式如下: 区域 1 中来自区域 3 的偏差量缺失, 以区域 1 与区域 2 偏差量的平均值弥补该缺失信息, 即计算 $\mathbf{v}_1$ 时用 $(\Delta \bar{\mathbf{x}}_1 + \Delta \bar{\mathbf{x}}_2)/2$ 代替 $\Delta \bar{\mathbf{x}}_3$, 同理处理区域 3 中来自区域 1 的偏差量缺失。由于 $\Delta \bar{\mathbf{x}}_1$ 和 $\Delta \bar{\mathbf{x}}_2$ 经过多次内层迭代满足 2.4.2 节中所述的收敛性, 且区域 1 和 2、区域 2 和 3 信息交换未中断,

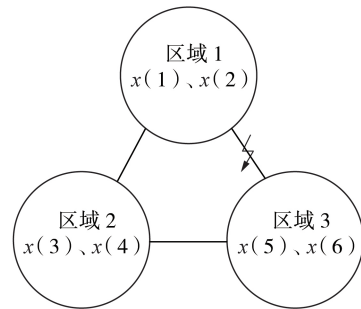


图2 三区域环状互联系统发生信息中断示意图

Fig.2 Schematic diagram of information interruption in three-region ring interconnected system

因此区域3对区域1的影响可用区域3间接对区域1的影响(通过区域2)表示,这里也体现了算法在互联区域内的传递性。信息未中断和信息中断的计算结果大致相同,见附录A中表A1,体现了该算法一定条件下的抗干扰性。

3 基于MAS的分布式潮流计算求解算法

下面为多区域间分布式潮流算法结构中各级Agent工作流程。

(1)主网Agent确定多区域互联的划分方式(确定 J_i 、 b_i 和 $\mathcal{N}_i$),并将此信息发送至相应区域管理Agent。

(2)区域管理Agent根据式(6)~(8)预处理接收到的信息,得到 $\bar{J}_i$ 。

(3)设置外层迭代次数 $k=0$,设置初始值为 $\mathbf{x}_i^{(0)}$,则每个区域的变量初始值为 $\bar{\mathbf{x}}_i^{(0)} = \text{Col} \{ \mathbf{x}_k^{(0)} (k \in \mathcal{N}_i) \}$;

(4)区域内层管理Agent:依据式(24)计算更新每个区域的潮流方程和雅可比矩阵,即 $b_i^{(k)}$ 和 $J_i(\bar{\mathbf{x}}_i^{(k)})$ 。

$$\begin{cases} b_i^{(k)} = -F_i(\bar{\mathbf{x}}_i^{(k)}) \\ J_i(\bar{\mathbf{x}}_i^{(k)}) = \frac{\partial b_i^{(k)}}{\partial \bar{\mathbf{x}}_i^{(k)}} \end{cases} \quad (24)$$

(5)记内层迭代次数 $t=0$,偏差变量初始值 $\Delta \bar{\mathbf{x}}_i(0)$ 的设置可任意选取或依照人工经验选取。

(6)通过同级Agent交换各区域内部的偏差变量,依据式(13)计算更新下一时刻的 $\Delta \bar{\mathbf{x}}_i$,计算误差 $e_{\Delta \bar{\mathbf{x}}_i}(t) = \max | \Delta \bar{\mathbf{x}}_i(t+1) - \Delta \bar{\mathbf{x}}_i(t) |$ 。判断是否满足收敛判据 $e_{\Delta \bar{\mathbf{x}}_i}(t) < \varepsilon_2$ (ε_2 为给定的内层收敛标准),若满足则转入步骤(7),否则令 $t=t+1$,重复步骤(6)。

(7)接收到从内层传递的偏差变量后,区域外层管理Agent更新每个区域的电压变量 $\bar{\mathbf{x}}_i^{(k+1)} = \bar{\mathbf{x}}_i^{(k)} + \Delta \bar{\mathbf{x}}_i(t+1)$,计算误差 $e_{F_i} = \max | F_i(\bar{\mathbf{x}}_i^{(k+1)}) |$,如果 $e_{F_i} < \varepsilon_1$ (ε_1 为给定的内层收敛标准),则转至步骤(8),否则令 $k=k+1$,返回步骤(4)。

(8)当同时满足区域外层管理Agent和区域内层管理Agent的判断标准后,将潮流计算结果反馈至主网Agent。

区域外层管理Agent和区域内层管理Agent之间的交互是双层反复迭代的协作过程。外层迭代中区域外层管理Agent由设定的电压初始值以及内层管理Agent传递的偏差值信息随迭代而逐渐收敛,同时电压信号的收敛会促进内层迭代中偏差值的收敛。

4 算例分析

为了验证算法的有效性,本文对6节点、30节点、118节点的系统进行分布式潮流计算与集中式潮流计算,并对结果进行对比。其中30节点算例采取2种划分区域方式,118节点算例采用2种区域划

分数目进行计算。在配置为Core-i5处理器、内存为4 GB的个人计算机上,采用软件MATLAB R2015b编程。

4.1 三区域6节点系统

本文首先采用三区域6节点的系统进行集中式算法与本文所提算法的对比。此系统包括接入节点1—3的3台发电机,其结构如附录B中图B1所示。区域1、2相连,区域2、3相连,区域1、3之间无信息交换。具体参数(包括线路参数、发电机参数、负荷参数等)详见MATPOWER case6ww。设定潮流计算收敛条件为:内层迭代收敛标准为 10^{-7} ,外层迭代收敛标准为 10^{-8} 。

使用2种算法的潮流计算结果见附录B中表B1。可见本文所提分布式算法与集中式算法的潮流结果相似,并且电压幅值相差数量级在 10^{-5} 内,电压相位在 10^{-3} 内。以各节点功率偏差的平方根值

$$\sqrt{\sum [(P^{\text{SP}} - P^{\text{cal}})^2 + (Q^{\text{SP}} - Q^{\text{cal}})^2]}$$

为判断标准(有功和无功部分分别乘以去量纲系数1,形成无量纲量,后同),将集中式算法与本文所提分布式算法进行对比,用误差表示收敛过程,其结果如附录B中表B2所示。分析可得,本文所提算法不依赖于信息的共享与公开,依旧能够很好地寻求最佳收敛路径,所得结果与集中式算法收敛过程近似。针对6节点系统,集中式算法的计算时间为0.023 s,分布式算法为6.19 s。相比于各个区域内信息公开的集中式算法,本文所提的分布式算法强调各区域内的独立运行,注重信息的安全与隐私,所交换信息仅限于与相邻区域间潮流校对方程的偏差变量,因此需要更多的内层迭代次数以完成计算,计算时间更长。

4.2 三区域30节点系统

为了进一步验证本文所提算法求解多区域潮流计算的正确性,以三区域30节点系统^[24]为例,改变系统的分区方式,分析采用分布式算法潮流计算的准确性与迭代误差。2种区域划分方式见附录B中图B2。

集中式算法与采用2种划分方式的分布式算法计算得到的电压幅值见附录B中图B3。可见采用2种算法的计算结果基本重合,并且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。将集中式算法与本文所提分布式算法进行对比,收敛过程见附录B中图B4。观察图B4可知,分布式算法有着良好的收敛性。故本文所提算法适用于区域间的不同划分方式,具有划分方式的普适性,并且在计算方式上更为灵活。

4.3 三区域与四区域118节点系统

为进一步验证本文所提算法的普适性,选择IEEE 118节点系统,将其划分为三区域和四区域这

2种情况,见附录B中图B5。

集中式算法与分布式算法(不同区域划分)下的电压幅值对比如附录B中图B6所示。从图B6中可以看出,集中式算法与采用不同118节点系统划分区域个数的分布式算法所得结果一致。以118节点系统划分三区域为例,改变内层迭代收敛标准,观察本文所提算法的外层迭代收敛过程与集中式算法收敛过程。

附录B中图B7给出了分布式内层迭代收敛标准为0.0001、0.001、0.01、0.1与集中式算法的收敛过程对比。由图B7可知,经内层迭代运算后,潮流计算收敛速度明显加快。不同的内层迭代收敛标准对应的收敛过程有所不同。在此算例中,内层迭代收敛标准为0.01时,收敛速度是最快的,并且在迭代50次时误差达到0.0029,而集中式算法满足同样的误差却经144次迭代后才达到。因此验证了本文所提算法可改善集中式算法存在可能不收敛的缺陷,并且加快了收敛速度。

4.4 3种系统结果对比

将4.1—4.3节中3个系统算例运用的2种算法性能从结果误差、迭代次数、计算时长三方面进行比较,其中分布式算法选取不同的内层迭代收敛标准,结果见表1、2及附录B中表B3—B6。

表1 集中式算法在3种系统中的误差
Table 1 Errors of centralized algorithm in three systems

系统	误差
6节点	2.9×10^{-10}
30节点	1.4×10^{-13}
118节点	9.9×10^{-9}

表2 分布式算法(不同内层迭代收敛标准)在3种系统中的误差

Table 2 Errors of distributed algorithm(with different internal iterative convergence standards) in three systems

内层迭代收敛标准	误差				
	6节点系统	30节点系统		118节点系统	
		划分方式1	划分方式2	三区域	四区域
0.0001	1.2×10^{-10}	2.0×10^{-14}	1.8×10^{-14}	8.9×10^{-9}	6.9×10^{-9}
0.001	4.9×10^{-11}	2.0×10^{-14}	7.1×10^{-9}	9.7×10^{-9}	6.9×10^{-9}
0.01	3.8×10^{-11}	2.7×10^{-14}	7.4×10^{-10}	8.0×10^{-9}	7.4×10^{-9}
0.1	3.6×10^{-11}	6.4×10^{-9}	4.9×10^{-10}	7.8×10^{-9}	9.8×10^{-9}

比较表1和表2的集中式与分布式误差可以得出:在外层收敛标准为 10^{-8} 时,2种算法均能收敛,并且采用分布式算法得到的潮流计算结果与集中式算法得到的结果基本一致。比较附录B中表B3和附录B中表B4的迭代次数可以得出:在6节点与30节点系统中,分布式算法与集中式算法所需的迭代次数基本相同,而在118节点系统中,分布式算法迭代次数减少了61.8%~77.5%,这说明在拥有众多节点

的复杂互联大系统中,分布式算法的优势体现得较为明显。118节点的四区域系统比同等条件下的三区域系统所需迭代次数更少,这是由于四区域系统采用并行求解方式能够降低计算负担,从而提升计算效率。比较附录B中表B5和附录B中表B6的集中式与分布式算法的计算时长可以看出:选择合适的内层迭代收敛标准可以有效地减少计算时长,甚至少于集中式算法的计算时长,如内层迭代收敛标准为0.01和0.1时在本文所采用的算例中都具有比集中式算法更短的计算时长,更适合工程应用。

5 结论

本文提出了一种基于MAS的全分布式潮流算法,该算法在区域外层管理Agent(外层迭代)中使用牛拉算法,并在区域内层管理Agent(内层迭代)中使用改进迭代投影搜索法构建以指数快速收敛为特征的分布式算法求解潮流校对方程。通过3种不同系统的算例测试验证了其应用于分布式求解实际互联系统潮流问题的有效性与高效性,得到以下结论。

(1)本文所提的基于MAS的分布式算法相比于集中式算法,在保持同等计算精度的基础上,迭代次数明显减少,具有快速收敛的良好特性。

(2)区域内管理中心代理在选择合适的收敛判据参数后,由于分布式算法可并行计算,在计算效率方面具有优势。

(3)采用MAS内外层迭代算法可保护不同区域的独立与隐私。区域管理Agent通过外层管理Agent和内层管理Agent子模块自主判断,各自计算每个区域内部的潮流结果,仅需通过内层管理Agent与相连区域交换有限非重要的信息,即功率校正方程的偏差值,交换信息不涉及各区域功率、电压、电流等隐私具体信息。

(4)经算例测试验证,所提算法具有极强的应用灵活性与普适性,适用于不同系统、不同分区方式与数目,并且在复杂互联系统中优势更为明显。同时,此算法有利于系统的互联、扩张与大系统的分区自治。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 王晨曦,朱建全,夏云睿,等.多区域电力系统实时分散鲁棒调度的求解方法[J].电网技术,2019,43(12):4478-4485.
WANG Chenxi, ZHU Jianquan, XIA Yunrui, et al. A real-time distributed robust dispatch approach of multi-area power system[J]. Power System Technology, 2019, 43(12): 4478-4485.
- [2] 谈超,戴则梅,滕贤亮,等.基于修正区域控制偏差的多区域协同控制技术(一)驱动、现状与发展建议[J].电力系统自动化,2017,41(1):88-94,116.
TAN Chao, DAI Zemei, TENG Xianliang, et al. Technologies for coordinated control among multiple control areas based on

- ACE correction part one driving force, state of the art and development proposals[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(1): 88-94, 116.
- [3] 廖小兵, 刘开培, 乐健, 等. 电力系统区间潮流计算方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(2): 447-458, 642.
- LIAO Xiaobing, LIU Kaipei, LE Jian, et al. Review on interval power flow calculation methods in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(2): 447-458, 642.
- [4] 陆文甜, 刘明波, 林舜江, 等. 基于分布式内点法的多区域互联电力系统最优潮流分散式求解[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(24): 6828-6837, 6938.
- LU Wentian, LIU Mingbo, LIN Shunjiang, et al. Decentralized solution for optimal power flow of multi-area interconnected power systems based on distributed interior point method[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(24): 6828-6837, 6938.
- [5] 李国庆, 刘玢, 陈厚合. 大规模风电并网系统容量效益裕度计算模型研究[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(7): 1-6, 14.
- LI Guoqing, LIU Bin, CHEN Houhe. CBM calculation model for power system with large-scale wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7): 1-6, 14.
- [6] 汪芳宗, 杨力森, 高学军, 等. 基于松弛牛顿法的互联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.
- [7] 陈羽, 刘东, 廖怀庆, 等. 网格计算环境下输配电网联合潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 42-47.
- CHEN Yu, LIU Dong, LIAO Huaiqing, et al. Transmission and distribution networks united power flow under grid computing environment[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 42-47.
- [8] 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.
- [9] 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 Jingquan, 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.
- [10] 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.
- [11] 张国荣, 陈夏冉. 能源互联网未来发展综述[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 1-7.
- ZHANG Guorong, CHEN Xiaran. Future development of energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 1-7.
- [12] 王璟, 王利利, 林济铿, 等. 能源互联网结构形态及技术支撑体系研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(4): 1-10.
- WANG Jing, WANG Lili, LIN Jikeng, et al. Energy internet morphology and its technical support system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4): 1-10.
- [13] 菲美琴, 丁勇, 王杨洋, 等. 微网——未来能源互联网系统中的“有机细胞”[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(19): 1-11, 45.
- MAO Meiqin, DING Yong, WANG Yangyang, et al. Microgrid—an “organic cell” for future energy interconnection system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(19): 1-11, 45.
- [14] 黄开艺, 艾芊, 张宇帆, 等. 基于能源细胞-组织架构的区域能源网需求响应研究挑战与展望[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3149-3160.
- HUANG Kaiyi, AI Qian, ZHANG Yufan, et al. Challenges and prospects of regional energy network demand response based on energy cell-tissue architecture[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3149-3160.
- [15] 艾芊, 章健. 基于多代理系统的微电网竞价优化策略[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 46-51.
- AI Qian, ZHANG Jian. Optimization bidding strategies of microgrids based on multi-agent system[J]. Power System Technology, 2010, 34(2): 46-51.
- [16] 田方媛, 张岩, 徐兵, 等. 多代理系统框架下的主动配电系统故障诊断[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 19-26.
- TIAN Fangyuan, ZHANG Yan, XU Bing, et al. Fault diagnosis based on multi agent system for active distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 19-26.
- [17] 刘焯. 基于多代理系统的配电网潮流计算研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- LIU Ye. Research on power flow calculation of distribution network based on MAS[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [18] TIAN Z, MA J, SUN Q, et al. A fully distributed power flow algorithm with exponentially fast convergence[C]//2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Beijing, China: IEEE, 2018: 1-5.
- [19] MOU S, LIN Z, WANG L, et al. A distributed algorithm for efficiently solving linear equations and its applications (special issue JCW)[J]. Systems & Control Letters, 2016, 91: 21-27.
- [20] 余志文, 艾芊. 基于多智能体一致性的微电网自适应下垂控制策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(12): 150-156.
- YU Zhiwen, AI Qian. Adaptive droop control strategy for microgrid based on consensus of multi-agent system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12): 150-156.
- [21] 窦春霞, 罗维, 岳东, 等. 基于多智能体的微电网群内电力市场交易策略[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1735-1744.
- DOU Chunxia, LUO Wei, YUE Dong, et al. Multi-agent system based electricity market trading strategy within microgrid groups[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1735-1744.
- [22] WANG X, MOU S, SUN D. Improvement of a distributed algorithm for solving linear equations[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(4): 3113-3117.
- [23] MOU S, MORSE A S, LIN Z, et al. A distributed algorithm for efficiently solving linear equations[C]//2015 54th IEEE Conference on Decision and Control (CDC). Osaka, Japan: IEEE, 2015: 6791-6796.
- [24] CHRISTIE R. Power systems test case archive[DB/OL]. [2019-06-24]. http://labs.ece.uw.edu/pstca/pf30/pg_tca30bus.htm.

作者简介:



黄开艺

黄开艺(1996—),女,福建福州人,硕士研究生,主要研究方向为区域能源网负荷特性建模等(E-mail: huangky@sju.edu.cn);

艾芊(1969—),男,湖北武汉人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统元件建模、人工智能及其在电力系统中的应用等(E-mail: aiqian@sju.edu.cn)。

(编辑 李玮)

(下转第217页 continued on page 217)

Simulation analysis and optimization based on electric-thermal field for abnormal distortion hot spots of EPR medium voltage cable terminal

GUO Lei¹, LI Lini¹, XING Limeng¹, CAO Weidong¹, BAI Longlei¹, XIANG Enxin², ZHOU Lijun¹

(1. College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

2. Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China)

Abstract: Due to the structural characteristics of the 25 kV EPR (Ethylene-Propylene Rubber) medium voltage cable terminal, the distribution of electric-thermal field inside the cable terminal is uneven, and the cable terminal partially has abnormal distortion hot spots. The scratch defects in the installation process of cable terminal increase the severity of the problem, accelerate the aging of the insulating material around the scratch defects, and greatly reduce the insulation performance. In order to solve the above-mentioned problems, a nonlinear stress tube material with conductivity associated with electric field and temperature is proposed. The COMSOL simulation method is used to compare the internal electric-thermal field distribution of the cable terminal with control tubes using high dielectric material and nonlinear materials. The results show that the electric-thermal field distortion of the cable terminal can be effectively alleviated after optimization. In the case of scratch defect, the electric-thermal field distortion of the optimized cable terminal does not reach the breakdown threshold, indicating that its operation is relatively safe. The temperature distribution of cable terminal in field is tested by the thermal imager, and the results show that the abnormal heating of the cable terminal surface is relieved after optimization.

Key words: EPR medium voltage cable terminal; abnormal hot spot; electric-thermal field distribution; optimization; temperature detection

(上接第 180 页 continued from page 180)

Multi-area interconnected distributed power flow algorithm based on multi agent system

HUANG Kaiyi¹, AI Qian¹, ZHANG Yufan¹, ZHOU Jiakan²

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education,

Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: To address the issue that the private information cannot be fully shared in a multi-area power flow calculation problem, a multi-area interconnected distributed power flow algorithm based on MAS (Multi Agent System) is proposed. Firstly, the framework of multi-area distributed power flow calculation based on MAS is introduced, and a coordinated interaction way of each agent at all levels considering data protection is given. Secondly, a two-level multi agent structure of the main grid and regional-area management that includes both outer and inner management agent is developed. Meanwhile, an improved iteration projection search approach is employed to establish a double-iteration algorithm for distributed power flow calculation, which can enable a very limited amount of non-important information in multi-area communication and achieve exponential fast convergence in each area. Finally, test results of the 6-bus, 30-bus and 118-bus systems verify the effectiveness and flexibility of the proposed algorithm by comparing with the centralized algorithm.

Key words: distributed algorithm; power flow calculation; multi agent systems; improved projection search method; privacy protection

附 录

附录 A

$$f_1 = 5x^2(1) + 4x^3(2) - 2x(3) + 6x(4) + 5x^2(5) + 3x(6) \quad (A1)$$

$$f_2 = e^{x(1)} + 4x(2) + \sin(x(3)) + \cos(x(4)) + 7x(5) + 8x(6) \quad (A2)$$

$$f_3 = 9\sin(x(1)) + 8x^2(2) - e^{x(3)} + x(4) + x(5) + x^2(6) \quad (A3)$$

$$f_4 = \cos(x(1)) + 6\sin(x(2)) + 4x^2(4) + 3x^3(5) + x(6) \quad (A4)$$

$$f_5 = x(1)x(2) + x(2)x(3) + x(3)x(4) + x(4)x(5) + x(5)x(6) \quad (A5)$$

$$f_6 = x(1) + x(2) + x(3) + x(4) + x(5) + x(6) \quad (A6)$$

表 A1 分布式算法信息未中断与信息中断结果对比

Table A1 Comparisons of distributed algorithms between uninterrupted information and interrupted information

结果	信息未中断	区域 1-3 信息中断
$x(1)$	0.9949	0.9941
$x(2)$	2.0022	2.0022
$x(3)$	3.0050	3.0047
$x(4)$	3.9946	3.9933
$x(5)$	4.9996	5.0000
$x(6)$	6.0021	6.0022

附录 B

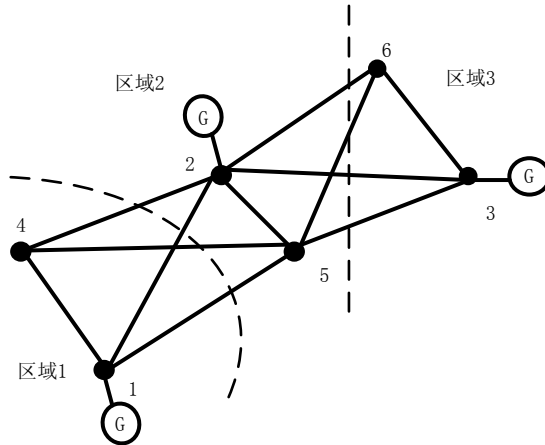


图 B1 三区 6 节点互联系统

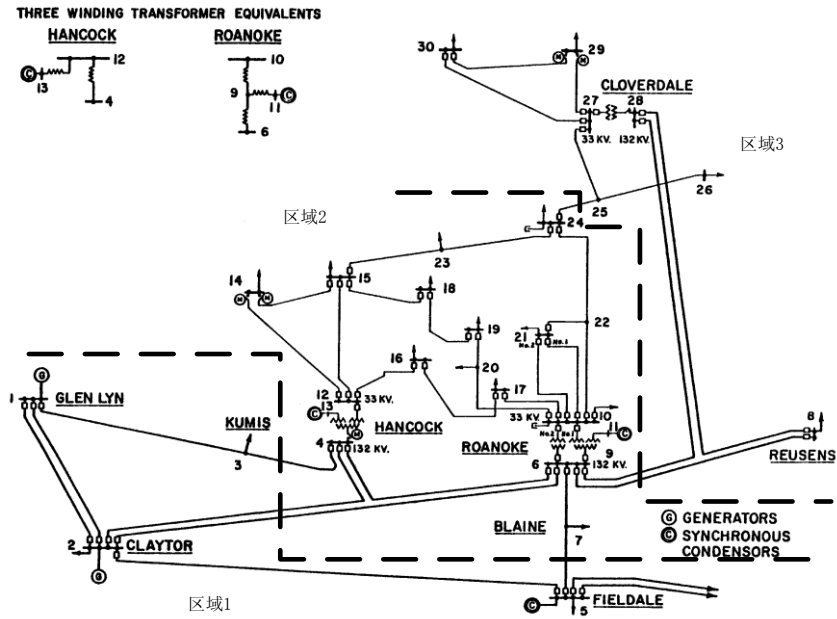
Fig.B1 Three-zone 6-bus interconnected system

表 B1 集中式算法和分布式算法潮流计算结果对比
Table B1 Comparison of power flow between centralized algorithm and distributed algorithm

节点	集中式算法		分布式算法	
	电压幅值	电压相角/rad	电压幅值	电压相角/rad
1	1.0500	0.0000	1.0500	0.0000
2	1.0500	-3.6712	1.0500	-3.6708
3	1.0700	-4.2733	1.0700	-4.2727
4	0.9894	-4.1958	0.9894	-4.1955
5	0.9854	-5.2764	0.9854	-5.2760
6	1.0044	-5.9475	1.0044	-5.9469

表 B2 集中式算法和分布式算法收敛过程对比
Table B2 Comparison of convergence between centralized algorithm and distributed algorithm

迭代次数	集中式算法	分布式算法（外层迭代）
1	0.9463	0.9463
2	0.0271	0.0271
3	5.8048×10^{-5}	5.8016×10^{-5}
4	2.9672×10^{-10}	2.4616×10^{-10}



(a) 划分方式 1

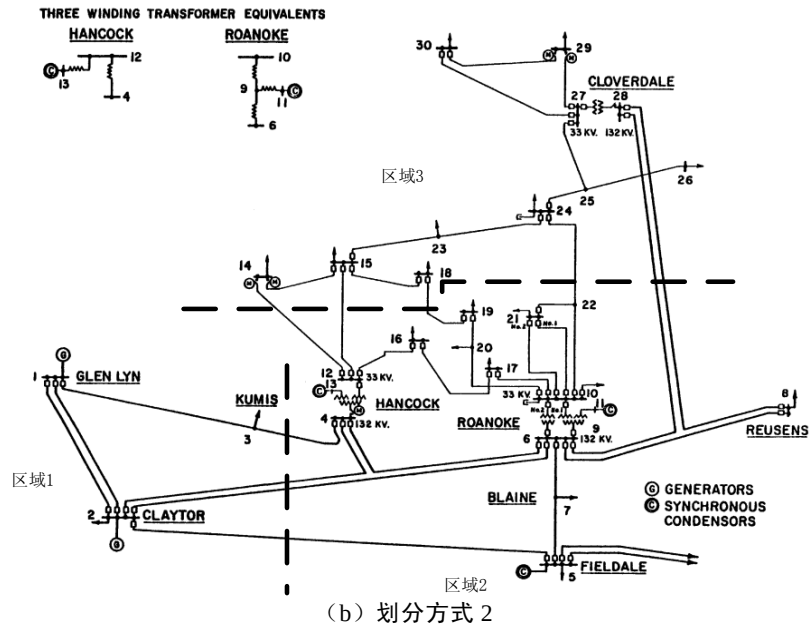


图 B2 30 节点系统三区域 2 种划分方式

Fig.B2 Two divisionways of 30-bus system three-zone

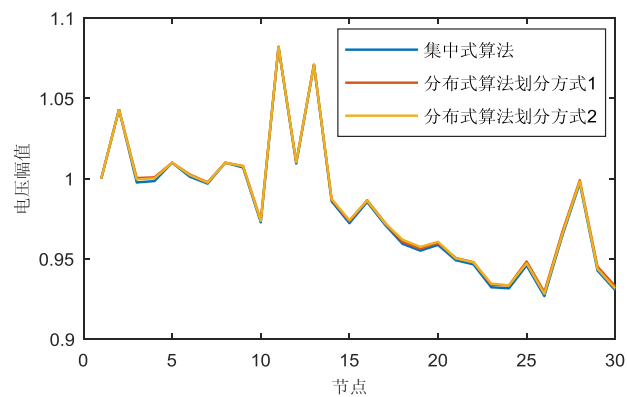


图 B3 30 节点系统集中式-分布式算法电压幅值结果对比

Fig.B3 Comparison of voltage amplitude between centralized algorithm and distributed algorithm in 30-bus system

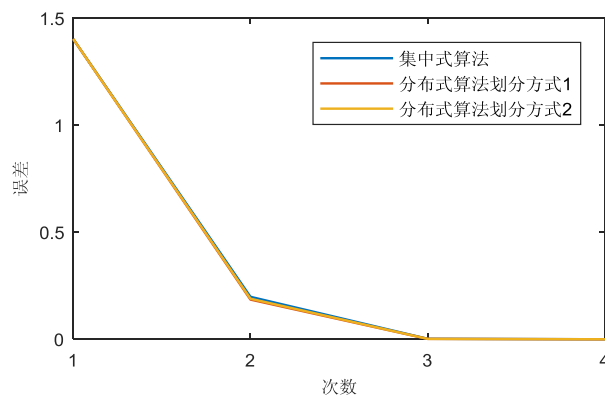


图 B4 30 节点系统集中式-分布式算法收敛结果对比

Fig.B4 Comparison of convergence between centralized algorithm and distributed algorithm in 30-bus system

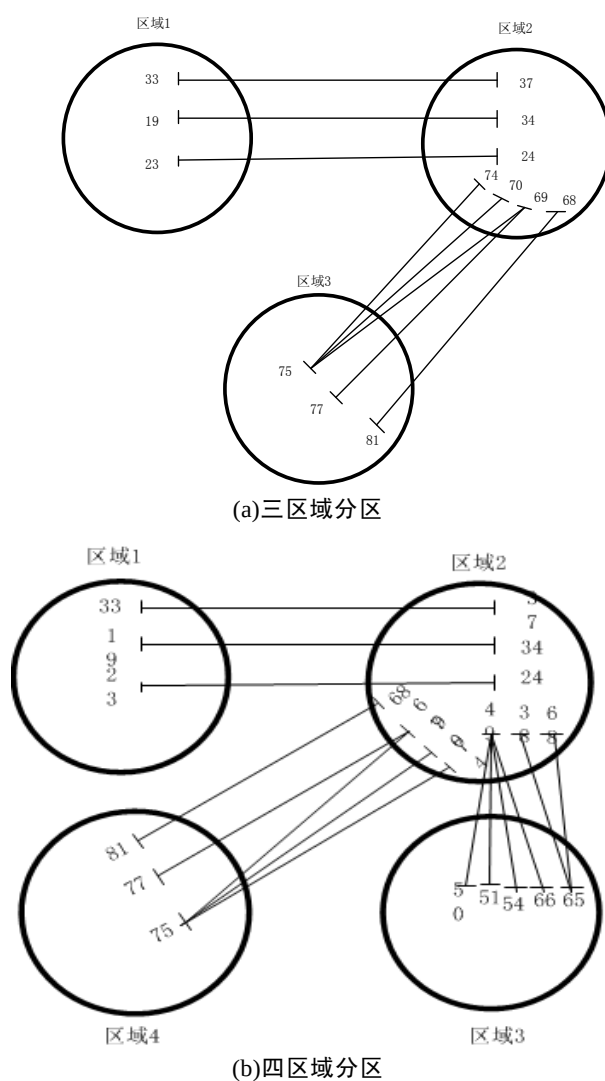


图 B5 118 节点系统三区域与四区域分区示意图

Fig.B5 Schematic diagram of three-zone and four-zone divisions of 118-bus system

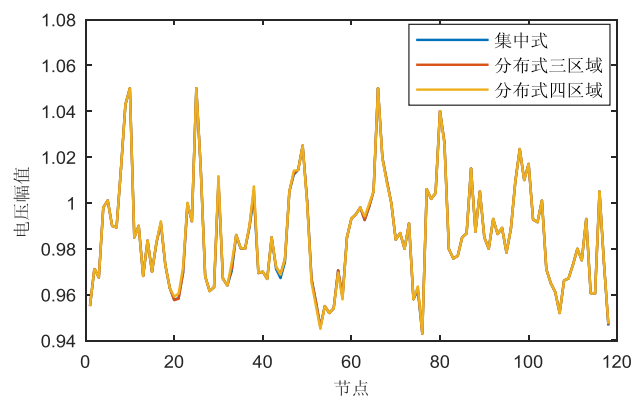
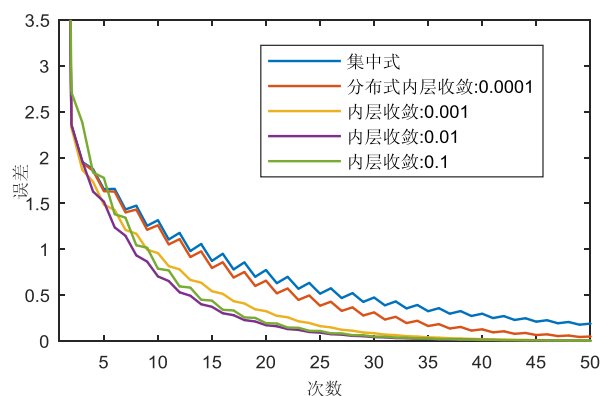
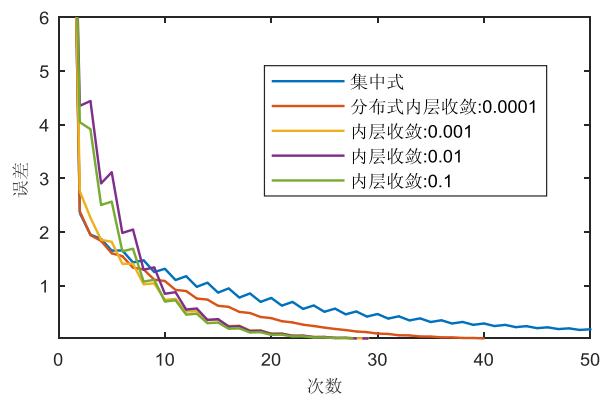


图 B6 集中式算法与三区、四区分布式算法电压幅值对比

Fig.B6 Comparison of voltage amplitude between centralized algorithm, three-zone and four-zone distributed algorithms



(a)三区收敛图



(b)四区域收敛图

图 B7 118 节点系统集中式-分布式算法（不同内层迭代收敛标准）收敛过程对比

Fig.B7 Comparison of convergence between centralized algorithm and distributed algorithm with different inner layer convergence criteria in 118-bus system

表 B3 集中式算法在 3 种系统中的迭代次数

Table B3 Number of iterations of centralized algorithms in three systems

系统	6 节点	30 节点	118 节点
迭代次数	4	5	427

表 B4 分布式算法（不同内层迭代收敛标准）在 3 种系统中的迭代次数

Table B4 Number of iterations of distributed algorithm
(with different internal iterative convergence standards) in three systems

内层迭代收敛标准	6 节点	30 节点		118 节点	
		划分方式 1	划分方式 2	三区域	四区域
0.0001	4	5	5	163	110
0.001	4	5	4	143	98
0.01	4	5	4	140	98
0.1	4	4	4	142	96

表 B5 集中式算法在 3 种系统中的计算时长

Table B5 Calculation time of centralized algorithm in three systems

系统	6 节点	30 节点	118 节点
计算时长/s	0.174	0.50	96.12

表 B6 分布式算法（不同内层迭代收敛标准）在 3 种系统中的计算时长

Table B6 Calculation time of distributed algorithm
(with different internal iterative convergence standards) in three systems

		s			
内层迭代收敛标准	6 节点	30 节点		118 节点	
		划分方式 1	划分方式 2	三区域	四区域
0.0001	2.12	20.28	16.28	213.12	177.47
0.001	0.391	6.76	6.29	98.3	99.4
0.01	0.0739	0.337	0.226	86.94	85.15
0.1	0.0746	0.239	0.200	88.37	88.11