DOI: 10.7641/CTA.2018.70802

基于交替方向乘子法的电力系统完全分布式动态经济调度方法

杨青润,李 澄,丁 涛,李更丰,别朝红[†]

(电力设备电气绝缘国家重点实验室;陕西省智能电网重点实验室;西安交通大学电气工程学院,陕西西安710049)

摘要:本文基于交替方向乘子法(alternating direction multiplier method, ADMM)提出了一种完全分布式的跨区域电 力系统动态经济调度方法.其中的经济调度模型以整个系统的运行成本最小为目标,并满足各种系统运行约束.为了实 现模型的分布式求解,本文利用交替方向乘子法将各区域之间的联系解耦,将整个系统的大型优化问题分解为各个区域 内部的子优化问题,通过迭代求解每个区域的子问题即可得到整个系统的最优解.进一步地,本文算法取消了负责乘子 更新的数据中心,实现了完全分布式的调度策略.同时,为了兼顾电力系统中时间断面之间的紧密联系,本文的经济调 度模型采用了多时段优化方法.最后,本文对基于IEEE标准测试系统的3区域互联系统算例进行了分析,验证了本文的 调度策略的有效性.

关键词: 电力系统; 动态经济调度; 分布式算法; ADMM

引用格式:杨青润,李澄,丁涛,等.基于交替方向乘子法的电力系统完全分布式动态经济调度方法.控制理论与应用, 2018.35(5):709-716

中图分类号: TP273 文献标识码: A

Fully distributed dynamic economical dispatching method for power system based on alternating direction multiplier method

YANG Qing-run, LI Cheng, DING Tao, LI Geng-feng, BIE Zhao-hong[†] (State Key Lab of Electrical Insulation and Power Equipment; Shaanxi Key Laboratory of Smart Grid; School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi 710049, China)

Abstract: In this paper, a fully distributed cross-regional power system dynamic economic dispatching method is proposed based on the alternating direction multiplier method (ADMM). The economic dispatching model is to minimize the operation cost of the whole system, while satisfying all kinds of system operational constraints. In order to solve the model with distributed algorithm, the alternating direction multiplier method is applied in this paper to decouple the links between the regions, which decomposes the large-scale optimization problem of the whole system into sub-optimization problems in each region, and the optimal solution of the whole system can be obtained by solving the sub-problems of each region iteratively. Furthermore, the coordinator for updating the multipliers is canceled in the proposed algorithm, which realizes the fully distributed dispatch strategy. Meanwhile, in order to take into account the close relationship between the time periods in the power system, the economic dispatching model in this paper adopts the multi-period optimization method. Finally,

this paper analyzes the example of 3-region interconnected system based on IEEE standard test systems, and verifies the effectiveness of the proposed strategy.

Key words: power system; dynamic economic dispatch; distributed algorithms; ADMM

Citation: YANG Qingrun, LI Cheng, DING Tao, et al. Fully distributed dynamic economical dispatching method for power system based on alternating direction multiplier method. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(5): 709 – 716

1 引言(Introduction)

电力系统中的经济调度问题是一类以网络损耗最小或者发电成本最低为目标,同时满足电力系统潮流约束以及其他运行约束条件的优化问题^[1-8].与此同

时,随着光伏,风电等清洁能源的快速推广,使得不同时间断面间的耦合更加紧密,只考虑了单个时间断面的静态经济调度已经不能满足电力系统的实际情况,因此研究其动态经济调度更具有突出的意义.

收稿日期: 2017-11-03; 录用日期: 2018-05-09.

[†]通信作者. E-mail: zhbie@mail.xjtu.edu.cn.

本文责任编委: 梅生伟.

率又近江骊安, 雨至10. 国家重点基础研究发展计划项目(2016YFB09011900), 国家电网公司总部科技项目, 国家自然科学基金重点项目(51637008), 中国博士后科学基 金第十批特别资助项目(2017T100748)资助.

Supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFB09011900), the Science and Technology Project of SGCC–Research, the National Natural Science Foundation of China-Key Program (51637008) and the Special Financial Grant from the China Post-doctoral Science Foundation (2017T100748).

在电力市场快速发展的情况下,为了实现资源的 优化配置,电力系统各区域之间的联系日益密切,各 区域之间输电断面的功率交换日益频繁.而跨区域的 功率交换只能通过具有更高调度权的跨区域调度中 心集中调度或者各区域调度中心之间相互协调实现.

集中式调度是传统的调度方式,需要建立调度中 心收集各调度区域的详细相关信息,统一调度各区域 的运行方式.已经有诸多国内外学者致力于电力系统 的集中调度问题.诸如内点法^[9]、Lambda迭代法^[10]、 拉格朗日法^[11]等经典优化算法都被应用于了电力系 统中的优化调度问题中.这些优化算法均为集中式算 法.集中式调度算法的一大重要优势在于不需要迭代, 可以直接进行全局的统筹优化,但是当整个系统电力 调度问题规模很大时,待求变量数急剧增加,问题的 维数也相应提高,使得整个问题难以直接求解.

此外,随着对于全球能源互联网研究的深入开展, 建设跨国的区域性特高压电网将有效地实现电源互 补、负荷错峰以及电力支援.到目前为止,我国已经与 俄罗斯、蒙古、越南、老挝、缅甸等一些周边国家实现 了部分电力互联,总的互联规模约260万千瓦.然而, 各国出于自身战略保密的要求,可能难以共享其电力 系统的详细信息,这也就限制了拥有全局调度权的更 高一级调度中心的存在.因此,必须要引入分布式调 度的模式,将调度权分散到各区域的调度中心,在各 区域之间交换尽可能少的信息的前提下,通过分布式 的调度模式实现全局最优的电力调度.

为了应对这些特点,越来越多的学者致力于分布 式动态调度问题的研究. 分布式动态调度算法起始于 对于分布式最优潮流优化策略的研究, 文献[12-15]通 过引入虚拟节点的方法平衡解耦后各个子区域的潮 流,构建了多区域分解算法.其中,文献[12]对于大规 模区域互联系统提出了一种并行化分布式最优潮流 模型,并通过一些中型系统的仿真进行了验证. 文献 [13]在文献[12]的基础上引入了预测校正极大乘子法 (predictor-corrector proximal multiplier, PCPM) 和交 替方向法(alternating direction method, ADM)两种数 学分解方法来实现所提出的分布式方案. 文献[14] 对大规模电力系统的多目标无功优化问题进行了分 布式处理,解决了电力系统中集中式无功优化的问题. 文献[15]在基础的分布式最优潮流模型上通过余弦近 似的方法引入了网络损耗. 文献[16-18]利用辅助问题 原理(auxiliary problem principle, APP)解决了区域耦 合约束,实现了分布式的最优潮流算法.

此外,交替方向乘子法^[19-23](alternating direction method of multipliers, ADMM)也被广泛应用在分布式动态调度问题中,并结合电力系统的特点加以改进. 文献[19]对于微电网中的最优潮流问题应用半定规划松弛技术将其变为凸问题,并结合ADMM方法进行分

布式求解. 文献[20]将基于一致性的ADMM方法应用 于电力系统无功的分布式最优控制中,并与对偶上升 法(dual-ascent method)进行对比,验证了ADMM方法 的优越性. 进一步地,完全分布式的ADMM方法能够 将负责数据收集与分配的协调模块取消,使得信息只 需要在相邻的子区域中交换,并在电力系统的许多方 面进行了应用. 文献[21]提出了一种基于ADMM方法 的完全分布式鲁棒最优潮流算法,实现了基于区域的 最优化进程,收到了良好的效果. 文献[22]给出了一种 新的分布式一致性ADMM方法,该方法由动态平均一 致性算法与分布式ADMM方法,该方法由动态平均一 含需求侧响应的直流潮流问题,讨论了相关的完全分 布式ADMM方法,验证了其全局收敛性.

本文结合电力系统的实际特点,应用交替方向乘 子法将区域间联系解耦,并结合各区域间联络线的特 点引入了完全分布式的算法,建立了一个以整体经济 性最优为目标的多区域完全分布式动态调度模型.该 模型将电力系统中多区域互联结构下的集中式动态 调度问题分解为各个区域内部的子优化问题,并进一 步取消了负责乘子更新的数据中心,即实现了完全分 布式的调度策略,最终通过迭代求解每个区域的经济 调度子问题即可得到整个系统的最优解.通过一个基 于IEEE标准测试系统构建的多区域互联系统的算例 分析证明,本文的模型能够高效正确地解决电力系统 中多区域分布式动态调度问题.

2 多区域动态调度模型 (Multi-region dynamic economic dispatch)

电力系统中各区域之间调度联系的可抽象为图1 所示的多区域电力调度模型.在每个区域中,都包含 发电机组以及负荷,三者通过传输线路相互联结.在 区域之间,通过联络线进行电力与信息的交互,完成 区域之间的互联.此外,考虑到各个区域的独立调度 特性,各区域难以实时分享各自的所有电力调度信息. 因此,必须引入分布式调度,将调度中心去除,各区域 之间在交换尽可能少的信息的前提下,通过迭代完成 全局最优的电力调度.





传统集中式的电力调度模型可建立如下:

1) 目标函数.

目标函数为最小化系统的总运行费用.其中,主要 考虑发电机组的运行成本费用.目标函数的表达式如 下:

$$F = \sum_{t=1}^{T} \sum_{n=1}^{N} (a_n P_{n,t}^2 + b_n P_{n,t} + c_n), \qquad (1)$$

其中: F为系统的运行总费用; t为各调度时段的编号; T表示调度时段的总数量; n, n_B 分别为发电机组和系统节点的编号; N, N_B 分别为发电机组和系统节点的总数量; $P_{n,t}$ 表示发电机组n在t时段的实际出力; a_n, b_n, c_n 为发电机组n出力特性的系数.

2) 约束条件.

a) 系统功率平衡约束,即在任一时段的总发电机 出力等于负荷需求:

$$\sum_{n=1}^{N} P_{n,t} = \sum_{n_{\rm B}=1}^{N_{\rm B}} D_{n_{\rm B},t},$$
(2)

其中*D*_{n_B,t}为节点*n*在t时段的负荷需求.

b) 发电机组出力上下限约束:

$$P_n^{\min} \leqslant P_{n,t} \leqslant P_n^{\max}, \tag{3}$$

其中 P_n^{\min} , P_n^{\max} 分别为发电机组n在任一时段的出力下限和出力上限.

c) 发电机组爬坡上下限约束:

$$\Delta P_n^{\min} \leqslant P_{n,t} - P_{n,t-1} \leqslant \Delta P_n^{\max}, \qquad (4)$$

其中 $\Delta P_n^{\min}, \Delta P_n^{\max}$ 分别为发电机组n的最小爬坡速率(即最大向下爬坡速率)与最大爬坡速率(即最大向上爬坡速率).

d)发电机组合同电量约束,即给定时段内的发电 机组总发电量需符合约定的合同:

$$\sum_{t=1}^{T} P_{n,t} = E_n, \ n \in \Phi,$$
(5)

其中: E_n 为发电机组n在给定时段内约定的合同电量; Φ 为约定合同电量的发电机组的集合.

e) 合同机组日电能分解值偏差约束,即分解到日的合同电量需处于一定的偏差范围内:

$$E_n^{\text{day,min}} \leqslant E_{n,d}^{\text{day}} \leqslant E_n^{\text{day,max}},$$
 (6)

其中: d为调度日期的编号; $E_{n,d}^{day}$ 为发电机组n在日期 d内所发电量; $E_n^{day,min}$, $E_n^{day,max}$ 分别为发电机组n日电能分解值的计划允许最小值和最大值.

f) 传输线路最大容量约束:

$$-P_l^{\max} \leqslant P_{l,t} \leqslant P_l^{\max},\tag{7}$$

其中: *P*_{*l*,*t*}为线路*l*在*t*时段的传输功率; *P*_{*l*}^{max}为线路*l* 的最大传输功率. 线路的双向传输的最大容量相等.

g) 区域联络线最大容量约束:

$$T_{ij}^{\max} \leqslant T_{ij,t} \leqslant T_{ij}^{\max},$$
 (8)

其中: **T**_{ij,t}为向量变量,表示区域i与区域j之间各联 络线在t时段的传输功率; **T**_{ij}本为向量常数,表示区域 i与区域j之间各联络线的最大传输功率.在这里本文 假设各联络线的双向传输的最大容量相等.

h) 区域联络线交易电量约束,即给定时段内的联 络线交易电量需符合区域之间的约定:

$$\sum_{t=1}^{T} \mathbf{1}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{T}_{ij,t} = E_{ij}, \ ij \in \Gamma,$$
(9)

其中: $\mathbf{1} = (1 \cdots 1)^{\mathrm{T}}; E_{ij}$ 为区域i与区域j之间在给 定时段内约定的总交易电量; Γ 为约定交易电量的区 域对的集合.

i) 区域联络线交换功率计划约束,即各个时段的 区域联络线交换功率需处于考核偏差允许范围内:

$$T_{ij}^{kh,\min} \leq \mathbf{1}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{T}_{ij,t} \leq T_{ij}^{kh,\max},$$
 (10)

其中 $T_{ij}^{kh,\min}, T_{ij}^{kh,\max}$ 分别为区域i与区域j之间在t时段的交换功率计划允许的最小值和最大值.

对于各传输线路上的功率,可以使用功率传输分 布因子 (power transfer distribution factor, PTDF)矩阵 求得. PTDF矩阵能够将各节点的净注入功率与各支 路的功率传输直接联系,其最大的优点为不引入多余 的电压相角变量,并且只和网架结构与线路参数有关 系,而与各节点注入功率的变化无关,即对于确定的 网络,只需要求一次PTDF矩阵就可以反复使用.其应 用的基本格式为

$$\boldsymbol{P}_{\mathrm{flow}} = \boldsymbol{H} \boldsymbol{P}_{\mathrm{in}j}, \qquad (11)$$

其中: **P**_{flow}为各支路的功率构成的向量; **H**为对应的 PTDF矩阵; **P**_{inj}为各节点的净注入功率构成的向量. 对于该集中式调度问题, 有

$$\boldsymbol{P}_{l,t} = \boldsymbol{H}(\boldsymbol{C}\boldsymbol{P}_{n,t} + \boldsymbol{C}_{w}\boldsymbol{W}_{n_{w},t} + \boldsymbol{C}_{s}\boldsymbol{S}_{n_{s},t} - \boldsymbol{D}_{n_{B},t}),$$
(12)

其中C为排序矩阵,将发电机组的编号按照所在节点编号的顺序重新排列.

2.2 分布式调度模型 (Distributed economic dispatch)

分布式调度的基本思想,就是首先解耦各区域之间的联系,使总的电力调度优化问题可以分解为各个 区域调度的子问题;然后通过迭代更新,不断求解各 个子问题,直到满足给定的误差条件.

常用的分布式调度的数学方法之一是拉格朗日松 弛法(lagrange relaxation, LR). 该方法能够松弛相关 的约束, 并添加至目标函数中, 通过迭代求解更新相 应的拉格朗日乘数, 最终满足迭代终止条件. 但是该 方法在乘数更新步骤中的更新步长难以选择,使得其 收敛性有所降低.为了解决这个问题,提出了增广拉 格朗日松弛法(augmented lagrange relaxation, ALR), 在目标函数中添加了关于松弛约束的二次惩罚项,使 得乘数更新的步长固定,并且有良好的收敛性.然而, 添加的二次惩罚项破坏了优化问题的可分解性,这是 ALR方法的主要缺点.通常的解决方法有两种:辅助 问题原理方法^[24-27]和交替方向乘子法^[28-32].两种方 法各有优缺点: APP方法可以实现并行求解,但收敛 速度一般; ADMM方法不能并行求解,只能串行求解, 但收敛速度较快.考虑到在现有电力系统结构中总体 的区域数量也不会很多,所以最终选择ADMM方法来 进行多区域的分布式电力调度问题求解.

1) 传统ADMM方法.

考虑如下的优化问题:

$$\min f(x) + g(z), \tag{13a}$$

s.t.
$$Ax + Bz = c.$$
 (13b)

对等式约束应用增广拉格朗日松弛得无约束优化 问题为

$$\min f(x) + g(z) + \lambda^{\mathrm{T}} (Ax + Bz - c) + \frac{\rho}{2} \|Ax + Bz - c\|_{2}^{2}, \qquad (14)$$

其中: λ为拉格朗日乘数, ρ为正的二次惩罚项系数.

ADMM方法的主要思想是,在求解某一变量时, 其余的变量都看做常数,并使用最新的迭代结果.这 样就相当于"解耦"了各变量之间的联系,并巧妙地 避开了二次惩罚项的处理问题. ADMM的基本迭代过 程如下:

$$x^{k+1} := \arg\min L_{\rho}(x, z^k, \lambda^k), \tag{15a}$$

$$z^{k+1} := \arg\min L_{\rho}(x^{k+1}, z, \lambda^k), \tag{15b}$$

$$\lambda^{k+1} = \lambda^k + \rho(Ax^{k+1} + Bz^{k+1} - c), \qquad (15c)$$

如此反复进行迭代,直到满足迭代终止条件为止.

2) 基于传统ADMM方法的多区域分布式电力调 度.

以集中式调度模型为基础,应用传统的ADMM方 法得到多区域分布式电力调度的模型.其主要过程如下:观察集中式调度模型,可以发现区域之间的耦合 约束反映在与联络线相关的约束上,即区域联络线最 大容量约束— $T_{ij}^{max} \leq T_{ij,t} \leq T_{ij}^{max}$.但是其中的 $T_{ij,t}$ 变量同时与区域*i*和区域*j*有关联,若直接对该约束进 行松弛,无法实现实质意义上的解耦.因此,需首先对 该约束进行改写如下:

$$\boldsymbol{T}_{ij,t}^{i} = \boldsymbol{T}_{ij,t}^{j}, \qquad (16a)$$

$$-\boldsymbol{T}_{ij}^{\max} \leqslant \boldsymbol{T}_{ij,t}^{i} \leqslant \boldsymbol{T}_{ij}^{\max},$$
 (16b)

$$T_{ij}^{\max} \leqslant T_{ij,t}^j \leqslant T_{ij}^{\max},$$
 (16c)

其中: $T_{ij,t}^{i}$ 表示在求解区域i的子问题时,区域i与区域j之间各联络线在t时段的传输功率; $T_{ij,t}^{j}$ 表示在求解区域j的子问题时,区域i与区域j之间各联络线在t时段的传输功率.图2表示了这一过程,即将区域i和区域j之间的联络线看做两个,分别隶属于各自的区域并满足同样的最大容量约束,最后保证这两条联络线的功率时刻相等.经过处理之后,两个区域之间的联系就鲜明地反映在约束 $T_{ij,t}^{i} = T_{ij,t}^{j}$ 上.



图 2 联络线约束改写的示意图 Fig. 2 Diagram of tie-line constraints rewrite

对约束 $\boldsymbol{T}_{ij,t}^{i} = \boldsymbol{T}_{ij,t}^{j}$ 应用增广拉格朗日松弛, 可得目标函数为

$$F_{\rm L} = \sum_{t=1}^{T} \sum_{n=1}^{N} \left(a_n P_{n,t}^2 + b_n P_{n,t} + c_n \right) + \sum_{j \in i, j \neq i} \lambda_{ij,t}^{\rm T} (\boldsymbol{T}_{ij,t}^i - \boldsymbol{T}_{ij,t}^j) + \sum_{j \in i, j \neq i} \rho \| \boldsymbol{T}_{ij,t}^i - \boldsymbol{T}_{ij,t}^j \|_2^2,$$
(17)

其中: $\lambda_{ij,t}^{T}$ 是被松弛约束 $T_{ij,t}^{i} = T_{ij,t}^{j}$ 的拉格朗日向量 乘数; ρ 是相应的二次惩罚项的正系数. 注意到二次惩 罚项 $\sum_{j \in i, j \neq i} \rho \|T_{ij,t}^{i} - T_{ij,t}^{j}\|_{2}^{2}$ 破坏了问题的可分解性, 故应用ADMM方法进行分布式的求解,即对每个区域 分别进行求解,每次求解时其他区域的变量都看做常

数,并使用最新的迭代结果.区域*i*的第*k*次迭代优化问题可给出如下:

$$\min F_{\rm L}^{i(k)} = \sum_{t=1}^{1} \sum_{n \in A^{i}} (a_{n} P_{n,t}^{2} + b_{n} P_{n,t} + c_{n}) + \sum_{\substack{j \in i, j \neq i}} \lambda_{ij,t}^{(k-1)T} \boldsymbol{T}_{ij,t}^{i} + \sum_{\substack{j \in i, j \neq i}} \rho \| \boldsymbol{T}_{ij,t}^{i} - \boldsymbol{T}_{ij,t}^{j(\text{newest})} \|_{2}^{2}, \quad (18a)$$

s.t.
$$\sum_{n \in A^i} P_{n,t} + \sum_{j \in i, j \neq i} \mathbf{1}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{T}^i_{ij,t} = \sum_{n_{\mathrm{B}} \in A^i} D_{n_{\mathrm{B}},t}, \quad (18b)$$

$$P_n^{\min} \leqslant P_{n,t} \leqslant P_n^{\max}, \ n \in A^i, \tag{18c}$$

$$\Gamma_{n,t} - \Gamma_{n,t-1} \in \Delta \Gamma_n \quad , \ n \in A \; ,$$

$$(18d)$$

$$\sum_{t=1}^{T} P_{n,t} = E_n, \ n \in \Phi, \ n \in A^i,$$
(18e)

$$-P_l^{\max} \leqslant P_{l,t} \leqslant P_l^{\max}, \ l \in A^i,$$
(18f)

$$- \boldsymbol{T}_{ij}^{\max} \leqslant \boldsymbol{T}_{ij,t} \leqslant \boldsymbol{T}_{ij}^{\max}, \ j \in i, \ j \neq i,$$
(18g)
$$\sum_{t=1}^{T} x \boldsymbol{1}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{T}_{ij,t} = E_{ij}, \ ij \in \Gamma, \ j \in i, \ j \neq i,$$
(18h)

其中: A^i 代表区域i中所有元素的集合; $T_{ij,t}^{j(\text{newest})}$ 为 $T_{ij,t}^{j}$ 的最新迭代值,即

$$\boldsymbol{T}_{ij,t}^{j(\text{newest})} = \begin{cases} \boldsymbol{T}_{ij,t}^{j(k)}, & j < i, \\ \boldsymbol{T}_{ij,t}^{j(k-1)}, & j > i, \end{cases}$$
(19)

每次迭代结束后,乘数的更新过程为

$$\lambda_{ij,t}^{(k)} = \lambda_{ij,t}^{(k-1)} + \rho(\boldsymbol{T}_{ij,t}^{i(k)} - \boldsymbol{T}_{ij,t}^{j(k)}).$$
(20)

对于区域*i*中的传输线路功率,仍可用PTDF矩阵求出. 但是先前求得的集中式调度中的全网络PTDF矩阵需 要所有节点的信息,显然不能直接应用在区域*i*的问题 求解中.现在需要寻找相应的PTDF矩阵,能够利用区 域*i*中的信息以及区域*i*与其他区域联络线的信息,得 到区域*i*中的线路功率传输情况.

图 3 中给出了目标 PTDF 矩阵的求解方法. 首先, 将与区域*i*互联的所有区域(即图中的区域*j*₁与区域 *j*₂)等效为区域*i*外的节点,其注入功率为相应的联络 线传输功率. 然后,对这一等效的网络求PTDF矩阵, 利用该PTDF矩阵,即可利用区域*i*中的信息以及区域 *i*与其他区域联络线的信息,得到区域*i*中的线路功率 传输情况. 其公式如下(所有变量都属于区域*i*):

$$P_{l,t} = H_i \cdot [(CP_{n,t} + C_w W_{n_w,t} + C_s S_{n_s,t} - D_{n_B,t}), T^i_{ij,t}, T^i_{i-j+1,t}]. \quad (21)$$





Fig. 3 The construction of PTDF matrix for region i

同样地,可以对其他区域进行对应的PTDF矩阵求 解.所有区域的PTDF仍然只需求解一次,就可在所有 迭代过程中使用,具有极大的便利性.

3) 应用全分布式ADMM方法的多区域分布式电力调度.

传统的ADMM存在的问题在于,仍然需要一个上 层的数据中心来收集各联络线的数据,并进行乘子的 计算与分配.虽然不需要各区域分享自己的关键电力 信息,但是这样的上层数据中心在实际应用中仍然有 着一定的权威,所以比较难实现.结合表1给出的对 比,可以发现在上述传统ADMM方法的整个迭代过程 中,松弛的约束只有联络线约束,而每一条联络线上 的信息都只产生于其联络的两个区域,并且对应的乘 子也只被联络的两个区域使用,而与其他区域无关. 也就是说,利用联络线不是全局约束这一特点,对于 每一条联络线,其对应乘子的更新过程可以在对应的 两个互联区域之间完成,无需上传至数据中心.由此, 各个联络线的乘子计算与分配工作可以交由相关的 子区域完成,上层的数据中心可以取消,即可以实现 全分布式的ADMM方法.需要注意的是,每个区域的 子问题求解与乘子更新的数学公式并未更改,因此该 方法具有与传统ADMM方法同样的数学性质.

表 1 ADMM方法中松弛约束的对比

Table 1 Comparison of relaxed constraints in

ADMM methods								
松弛约束	全局约束	联络线约束						
乘子更新特点 乘子分配特点	需要所有区域的信息 需要分配至所有区域	仅需联络区域的信息 仅需分配至联络区域						
上层数据中心	需要	不需要,相应工作可 交由联络区域						

图4给出了由传统 ADMM 方法向全分布式 ADMM方法转化的示意图. 实线代表电力联络线, 虚 线代表信息联络线.可以看出传统ADMM方法区域间 进行电力传输,各区域与上层的数据中心进行信息传 输;而全分布式的ADMM方法取消了上层的数据中 心,区域之间直接完成电力和信息的传输.其具体过 程如下:在第k次迭代中,首先按照顺序求解区域i的 问题,并得到相应的联络线功率结果;区域i将此结果 传输给区域i+1,作为最新的迭代结果参与区域 i+1的问题求解;在区域i+1的问题求解完后,区域 i+1已经拥有了更新区域i与区域i+1的联络线乘子 的必需信息,即 $T_{i-i+1,t}^{i(k)}$ 与 $T_{i-i+1,t}^{i+1(k)}$,所以可以直接在 区域i+1完成对应乘子的更新工作;在第k+1次迭 代之前,区域i+1将更新的乘子回传给区域i,由此开 始下一次迭代.同样的,区域i+2可以更新区域i与区 \overline{i} 域i+2,区 \overline{i} 域i+1与区 \overline{i} 区域i+2的乘子.最终所有的乘 子更新工作都由各区域完成,而不需要上层数据中心 的参与.此外,对于迭代的停止条件也可以由各区域 判定完成.负责乘子更新的区域可以进一步计算相应 的被松弛约束的误差,并与给定的误差允许量相比较. 如不满足条件,可以经由整个信息网络将这一信号传 导至各个区域,迭代继续进行.应用全分布式ADMM 方法的多区域分布式电力调度的求解步骤如下:

步骤 1 给定所有变量和参数的初值(迭代次数 *k* = 0, 区域编号*i* = 1).

步骤 2 基于ADMM方法, 求解区域i的子问题.

步骤3 比较区域i与互联区域的编号. 若i大于

12

集中式

分布式

AT 11 TT . 1. 1.

23

1.8167

1.8167

任何互联区域的编号,则区域*i*负责更新相应的乘子, 并将结果传输至相应的互联区域.

步骤 4 *i* = *i* + 1, 若*i*大于最大区域编号, 转到步骤5; 否则, 转到步骤2.

步骤 5 比较联络线约束最大误差与给定的允许误差.若满足误差要求,则结束迭代,输出结果;否则, *k* = *k* + 1, *i* = 1,转到步骤2.





3 仿真结果分析(Simulation results analysis)

本文以IEEE 30节点、39节点和57节点的标准测 试系统作为基础,构造三区域互联的测试算例验证上 述方法的正确性,互联系统的结构示意图如图5所示. 在每个子系统的内部,网络拓扑和有关参数与原系统 相同,仅根据互联系统的需要做相应的编号调整.根 据"两峰一谷"的典型日负荷变化特性^[33]构造24小 时的负荷数据,并选取节点13,23,61,68,72和81的发 电机作为合同电量机组,设定合同电量为满发电量的 一半.联络线的最大容量约束设置为500 MW,并设置 30节点系统与39节点系统的交易电量为2 GWh,交换 功率计划约束为-50 MW至400 MW.取参数ρ = 0.1, 联络线约束最大误差为0.1 MW,分别应用集中式方法 与全分布式的ADMM方法进行模型求解,结果如表2 所示.







由表2可知,本文所提出的方法具有准确的求解结 果,且迭代次数也在合理范围内.在实际应用中可在 难以进行集中调度的场合完成跨区域互联电力调度 问题的求解.

表 2 朱 平 式 万 法 与 分 布 式 万 法 裸 型 求 解 结 未 比 较				
Table 2 Comparison of results between centralized				
and distributed model				
调度方法 P _{21,1} /MW ^{1^T} T _{30-39,1} F/10 ⁶ 元 迭代次数				

314.8780 -131.0152

314.9792 -130.8220

表3给出了在ρ = 0.1的情况下,分布式方法中选 择不同的区域迭代顺序时,迭代次数的变化.可以看 出,各种区域迭代顺序对迭代次数的影响不大,即说 明在分布式求解时,各区域可以以任意顺序进行迭代, 均可以较快地收敛.下面对参数ρ的选择进一步分析.

表 3 区域迭代顺序对迭代次数的影响

 Table 3 The effect of regional iteration order on iteration number

iteration number							
区域迭代顺序	30-39-57	30-57-39	39–30–57				
迭代次数	23	24	21				
区域迭代顺序	39–57–30	57-30-39	57-39-30				
迭代次数	20	23	24				

表4给出了参数 ρ 选取不同值时,求解结果的变化. 可以看出,选取不同的参数 ρ 时得到的目标函数值都 相当准确,但是迭代次数有着一定的差别: ρ 的取值过 大或过小,都会造成迭代次数的增加.进一步地,作 $\rho = 0.01 = \rho = 2$ 时的误差变化曲线如图6与图7所示.

表 4 参数 ρ 的选取对求解结果的影响 Table 4 The effect of ρ on the result of the solution

	ρ	0.01	0	.05	0.1		0.5	2	
I 讫	7/10 ⁶ 元 も代次数	1.816 79	8 1.8 2	3166 21	1.816 23	71	.8167 24	1.81′ 34	72
联络线约束最大误差 / MW	1200		-1						
	1000								-
	800								-
	600								-
	400 -	l							-
	200 -								-
	00	10	20	30	40	50	60	70	 80
		迭代次数							
	图(图6 参数 $\rho = 0.01$ 的迭代误差曲线							
Fig. 6 Iteration error curve when $\rho = 0.01$									



Fig. 7 Iteration error curve when $\rho = 2$

观察图6与图7可知, 当 $\rho = 0.01$ 时, 迭代误差曲线 较为平滑, 但是下降较慢, 因此迭代次数较多; 当 $\rho = 2$ 时, 迭代曲线下降很快, 但是有一定的波动, 迭代次数 也相应较多.

因此,参数ρ既反映了迭代过程中的乘子修正步 长,又影响着迭代过程的波动情况,两者对迭代收敛 速度起着相反的作用.在实际应用中,可以通过一定 数量的实验,选取参数ρ的相对最优值.

4 结论(Conclusions)

本文主要针对跨区域电力系统动态经济调度问题 进行分析与建模.模型应用交替方向乘子法(ADMM) 实现了集中式优化问题的解耦与子问题分解,并在传 统方法上加以改进,取消了负责乘子更新的上层数据 中心,最终建立了一种完全分布式的动态经济调度模 型.对基于IEEE标准测试系统的3系统互联算例进行 了仿真测试,测试表明所提出的方法可以在合理的迭 代次数内,求解得到非常准确的结果.算例中进一步 研究了参数ρ的取值策略,实验表明参数ρ的取值对于 迭代次数有一定的影响,过大会加剧迭代过程的波动, 过小会使乘子更新速度变慢,均不利于迭代的快速收 敛.在实际应用中,可以通过一定数量的实验进行参 数ρ的优化选择.

参考文献(References):

- HU Guowei, BIE Zhaohong, WANG Xifan. Optimal dispatch in wind integrated system considering operation reliability [J]. *Transactions* of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 58 – 65.
 (胡国伟, 别朝红, 王锡凡. 考虑运行可靠性的含风电电力系统优化 调度 [J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 58 – 65.)
- [2] WALTERS D C, SHEBLE G B. Genetic algorithm solution of economic dispatch with valve point loading [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1993, 8(3): 1325 – 1332.
- [3] CHIANG C L. Improved genetic algorithm for power economic dispatch of units with valve-point effects and multiple fuels [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2005, 20(4): 1690 – 1699.

- [4] HETZER J, DAVID C Y, BHATTARAI K. An economic dispatch model incorporating wind power [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2008, 23(2): 603 – 611.
- [5] DING T, BO R, GU W, et al. Big-M based MIQP method for economic dispatch with disjoint prohibited zones [J]. *IEEE Transactions* on Power Systems, 2014, 29(2): 976 – 977.
- [6] DING T, BO R, LI F X, et al. A bi-level branch and bound method for economic dispatch with disjoint prohibited zones considering network losses [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 30(6): 2841 – 2855.
- [7] ATTAVIRIYANUPAP P, KITA H, TANAKA E, et al. A hybrid EP and SQP for dynamic economic dispatch with nonsmooth fuel cost function [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2002, 17(2): 411 – 416.
- [8] CHEN Haoyong, WANG Yongchao, XUAN Peizheng, et al. Robust economic dispatch method of microgrid containing high propotion of wind power [J]. Control Theory & Applications. 2017, 34(8): 1104 – 1111. (陈皓勇, 王勇超, 禤培正, 等. 含高渗透率风电的微网系统鲁棒经济

(陈眙男, 土男超, 栩培止, 寺. 含高渗透率风电的鼠网系统音棒经济 调度方法 [J]. 控制理论与应用, 2017, 34(8): 1104 – 1111.)

- [9] LIN W M, CHEN S J. Bid-based dynamic economic dispatch with an efficient interior point algorithm [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2002, 24(1): 51 – 57.
- [10] LIN C E, VIVIANI G L. Hierarchical economic dispatch for piecewise quadratic cost functions [J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1984, 103(6): 1170 – 1175.
- [11] GUO T, HENWOOD M I, VAN OOIJEN M. An algorithm for combined heat and power economic dispatch [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1996, 11(4): 1778 – 1784.
- [12] KIM B H, BALDICK R. Coarse-grained distributed optimal power flow [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1997, 12(2): 932 – 939.
- [13] KIM B H, BALDICK R. A comparison of distributed optimal power flow algorithms [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2000, 15(2): 599 – 604.
- [14] CHENG Xingong, LI Jiwen, CAO Lixia, et al. Multi-objective distributed parallel reactive power optimization based on subarea division of the power systems [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(10): 109-113.
 (程新功, 厉吉文, 曹立霞, 等. 基于电网分区的多目标分布式并行无功优化研究 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 109-113.)
- [15] CONEJO A J, AGUADO J A. Multi-area coordinated decentralized DC optimal power flow [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1998, 13(4): 1272 – 1278.
- [16] ZHENG W, WU W, ZHANG B, et al. Fully distributed multi-area economic dispatch method for active distribution networks [J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2015, 9(12): 1341 – 1351.
- [17] CHENG Xingong, LI Jiwen, CAO Lixia, et al. Distributed and parallel optimal power flow solution of electronic power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(24): 23 27. (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 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(24): 23 27.)
- [18] NOGALES F J, PRIETO F J, CONEJO A J. A decomposition methodology applied to the multi-area optimal power flow problem [J]. Annals of Operations Research, 2003, 120(1/4): 99 – 116.
- [19] DALL'ANESE E, ZHU H, GIANNAKIS G B. Distributed optimal power flow for smart microgrids [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2013, 4(3): 1464 – 1475.
- [20] SULC P, BACKHAUS S, CHERTKOV M. Optimal distributed control of reactive power via the alternating direction method of multipliers [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2014, 29(4): 968 – 977.

- [21] ERSEGHE T. Distributed optimal power flow using ADMM [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2370 – 2380.
- [22] ZHANG H, LI Y, GAO W D, et al. Distributed optimal energy management for energy internet [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(6): 3081 – 3097.
- [23] WANG Y, WU L, WANG S. A fully-decentralized consensus-based ADMM approach for DC-OPF with demand response [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 8(6): 2637 – 2647.
- [24] COHEN G. Auxiliary problem principle and decomposition of optimization problems [J]. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 1980, 32(3): 277 – 305.
- [25] COHEN G. Auxiliary problem principle extended to variational inequalities [J]. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 1988, 59(2): 325 – 333.
- [26] HUR D, PARK J K, KIM B 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.
- [27] LOSI A, RUSSO M. On the application of the auxiliary problem principle [J]. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 2003, 117(2): 377 – 396.
- [28] CHEN C, HE B, YE Y, et al. The direct extension of ADMM for multi-block convex minimization problems is not necessarily convergent [J]. *Mathematical Programming*, 2016, 155(1/2): 57 – 79.
- [29] GHADIMI E, TEIXEIRA A, SHAMES I, et al. Optimal parameter selection for the alternating direction method of multipliers (ADM-M): quadratic problems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2015, 60(3): 644 – 658.

- [30] HONG M, LUO Z Q. On the linear convergence of the alternating direction method of multipliers [J]. *Mathematical Programming*, 2017, 162(1/2): 165 – 199.
- [31] FUKUSHIMA M. Application of the alternating direction method of multipliers to separable convex programming problems [J]. *Computational Optimization and Applications*, 1992, 1(1): 93 – 111.
- [32] WEI E, OZDAGLAR A. Distributed alternating direction method of multipliers [C]// The 51st IEEE Conference on Decision and Control. Maui, HI, USA: IEEE, 2012: 5445 – 5450.
- [33] XIA Daozhi. Power System Analysis [M]. Second Edition. Beijing: China Electric Power Press, 2011.
 (夏道止. 电力系统分析 [M]. 第2版. 北京: 中国电力出版社, 2011.)

作者简介:

杨青润 (1996--), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为电力系统优化

运行, E-mail: yqr1996@stu.xjtu.edu.cn;

李 澄 (1994--),男,硕士研究生,目前研究方向为电力系统规

划, E-mail: cheng.li@IEEE.org;

丁 涛 (1986--), 男, 副教授, 目前研究方向为电力系统规划与运行, E-mail: tding15@mail.xjtu.edu.cn;

李更丰 (1984-), 男, 副教授, 目前研究方向为综合能源系统规划 与运行, E-mail: gengfengli@mail.xjtu.edu.cn;

别朝红 (1970--), 女, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为电力系 统规划及可靠性评估, E-mail: zhbie@mail.xjtu.edu.cn.