

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2020 年 4 月 30 日 (30.04.2020)



(10) 国际公布号
WO 2020/082409 A1

(51) 国际专利分类号:
H02J 3/46 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2018/113461

(22) 国际申请日: 2018 年 11 月 1 日 (01.11.2018)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201811227076.2 2018年10月22日 (22.10.2018) CN

(71) 申请人: 清华大学 (TSINGHUA UNIVERSITY)
[CN/CN]; 中国北京市海淀区清华园,
Beijing 100084 (CN)。

(72) 发明人: 吴文传 (WU, Wenchuan); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。王彬 (WANG, Bin); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。蔺晨晖 (LIN, Chenhui); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。张伯明 (ZHANG, Boming); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。孙宏斌 (SUN, Hongbin); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。

郭庆来 (GUO, Qinglai); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。

(74) 代理人: 北京清亦华知识产权代理事务所 (普通合伙) (TSINGYIHUA INTELLECTUAL PROPERTY LLC); 中国北京市海淀区清华园清华大学照澜院商业楼301室, Beijing 100084 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,

(54) Title: NON-ITERATIVE DECOMPOSITION-COORDINATION DYNAMIC SCHEDULING METHOD FOR POWER TRANSMISSION AND DISTRIBUTION NETWORKS

(54) 发明名称: 一种输电网非迭代的分解协调动态调度方法

(57) Abstract: The present application relates to a non-iterative decomposition-coordination dynamic scheduling method for power transmission and distribution networks, which belongs to the technical field of the operation of power systems. In the method, dynamic scheduling models of a power transmission network and a power distribution network are integrated, and a dynamic scheduling model of the coordination of the power transmission and distribution networks is presented in the form of a matrix. With regard to the dynamic scheduling model of transmission and distribution cooperation in the form of a matrix, each power distribution network calculates a local optimal cost function with respect to a boundary injection power, and transfers the function to the power transmission network; and the power transmission network carries out global optimization in conjunction with the local optimal cost function of each power distribution network, and issues the boundary injection power of each power distribution network obtained by means of optimization, and each power distribution network then carries out independent scheduling. The method of the present application does not need repeated iteration between a power transmission network and a power distribution network and uses an asynchronous structure, thus reducing dependence on communication and the complexity of an algorithm, having a relatively high algorithm execution stability, and being beneficial for practical applications.

(57) 摘要: 本申请反馈涉及一种输电网非迭代的分解协调动态调度方法, 属于电力系统运行技术领域。本方法整合了输电网和配电网的动态调度模型, 并将输电网协同的动态调度模型以矩阵的形式表示。针对矩阵形式的输配协同动态调度模型, 各个配电网计算局部最优成本关于边界注入功率的函数, 传递给输电网, 输电网结合各个配电网的局部最优成本函数进行全局优化, 下发优化得到的各个配电网边界注入功率, 再由各个配电网进行独立调度。本申请反馈方法不需要输电网和配电网之间的反复迭代, 采用异步式架构, 低了对通信的依赖与算法复杂性, 有着较高的算法执行稳定性, 利于实际应用。

RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,
CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布：

- 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

一种输配电网非迭代的分解协调动态调度方法

5 相关申请的交叉引用

本申请要求清华大学于 2018 年 10 月 22 日提交的、发明名称为“一种输配电网非迭代的分解协调动态调度方法”的、中国专利申请号“201811227076.2”的优先权。

技术领域

10 本申请反馈涉及一种输配电网非迭代的分解协调动态调度方法，属于电力系统运行控制技术领域。

背景技术

分布式电源与主动配电网的发展对电网运行带来了诸多挑战，输电网和配电网协同的调度成为了发展趋势。由于输电网和配电网分别属于独立的运营商管理，输电网和配电网协同的调度难以集中式开展，因此，需要发展输配电网分解协调动态调度方法。已有的大部分输配电网分解协调动态调度方法需要输电网和配电网之间的反复信息交互迭代，属于同步式分解协调方法。异步式分解协调动态调度方法的优点在于不需要输配电网之间的迭代，对信息交互与通信依赖较小。

20 本申请人提出的申请号为 201710087438.1 的专利，公开了一种基于多参数规划的输配电网协调的动态经济调度方法，该方法采用输电网和配电网之间反复迭代的形式来进行输配电网协调的动态调度，其缺点在于，输配电网之间的反复迭代需要持续的信息交互，对输电网和配电网之间通信的依赖性很高，方法的执行易受到通信故障、阻塞等影响。

25 发明内容

本申请反馈的目的是提出一种输配电网非迭代的分解协调动态调度方法，对已有的输配电网的调度方法进行改进，无需输配电网之间的反复迭代，将输配协调动态调度问题分解求解，通过输电网和配电网间两次有限的信息交互来获得全局最优解。

本申请反馈提出的输配电网非迭代的分解协调动态调度方法，包括以下步骤：

30 (1) 建立一个输配电网协调的动态调度模型，该模型由目标函数和约束条件构成，包括：

(1-1) 动态调度模型的目标函数：

以输电网和配电网的总发电成本为动态调度的目标函数为:

$$\min \sum_{t \in T} \sum_{i \in G^{trans}} C_i^{trans} (pg_{i,t}^{trans}) + \sum_{t \in T} \sum_{k \in DIST} \sum_{i \in G^{dist,k}} C_i^{dist,k} (pg_{i,t}^{dist,k})$$

上式中, i 为输电网或配电网中的任意节点, T 代表动态调度时刻集合, G 代表输电网或配电网中发电机组所在节点集合, $DIST$ 代表配电网编号集合, $pg_{i,t}$ 代表输电网或配电网中连接节点 i 的发电机组在动态调度时刻 t 的有功功率, 上标 $trans$ 代表输电网, 上标 $dist,k$ 代表编号为 k 的配电网, 函数 $C_i(\bullet)$ 代表连接节点 i 的发电机组的发电成本函数, 该成本函数用二次函数表示为:

$$C_i (pg_{i,t}) = a_{0,i} + a_{1,i} pg_{i,t} + a_{2,i} pg_{i,t}^2$$

上式中, $a_{0,i}$ 、 $a_{1,i}$ 和 $a_{2,i}$ 分别代表连接节点 i 的发电机组的发电成本常数项系数、一次项系数和二次项系数, 常数项系数、一次项系数和二次项系数为发电机组固有参数;

(1-2) 动态调度模型的约束条件, 包括:

(1-2-1) 输电网模型约束条件,

其中的有功功率平衡约束条件为:

$$\sum_{i \in G^{trans}} pg_{i,t}^{trans} = \sum_{i \in B^{trans}} pb_{i,t}^{trans} + \sum_{i \in D^{trans}} PD_{i,t}^{trans}, \forall t \in T$$

上式中, B 代表输电网中的输电网与配电网相互连接的边界节点集合, $pb_{i,t}^{trans}$ 代表在动态调度时刻 t , 输电网从边界节点 i 传送到配电网的有功功率, D 代表输电网或配电网中负荷节点集合, $PD_{i,t}$ 代表在动态调度时刻 t 连接节点 i 的负荷预测值;

其中的输电网中线路传输容量的约束条件为:

$$\begin{aligned} -PL_n^{trans} &\leq \sum_{i \in G^{trans}} SF_{n-i}^{trans} pg_{i,t}^{trans} - \sum_{i \in B^{trans}} SF_{n-i}^{trans} pb_{i,t}^{trans} \\ &\quad - \sum_{i \in D^{trans}} SF_{n-i}^{trans} PD_{i,t}^{trans} \leq PL_n^{trans}, \forall n \in L^{trans}, \forall t \in T \end{aligned}$$

上式中, n 为线路编号, PL_n 表示输电网中任意线路 n 的传输容量, SF_{n-i} 代表节点 i 到线路 n 的转移分布因子, 转移分布因子为电网拓扑参数, 从电网调度中心获取, L 是输电网中所有线路编号的集合;

其中的旋转备用约束条件为:

$$0 \leq ru_{i,t}^{trans} \leq RU_i^{trans} \Delta t, ru_{i,t}^{trans} \leq \overline{PG}_i^{trans} - pg_{i,t}^{trans}, \forall i \in G^{trans}, \forall t \in T$$

$$0 \leq rd_{i,t}^{trans} \leq RD_i^{trans} \Delta t, rd_{i,t}^{trans} \leq pg_{i,t}^{trans} - \underline{PG}_i^{trans}, \forall i \in G^{trans}, \forall t \in T$$

$$\sum_{i \in G^{trans}} ru_{i,t}^{trans} \geq SRU_t^{trans}, \sum_{i \in G^{trans}} rd_{i,t}^{trans} \geq SRD_t^{trans}, \forall t \in T$$

上式中, $ru_{i,t}$ 和 $rd_{i,t}$ 分别为在动态调度时刻 t , 连接节点 i 的发电机组向上旋转备用容量和向下旋转备用容量, RU_i 和 RD_i 分别为连接节点 i 的发电机组向上爬坡速率和向下爬坡速率, Δt 为动态调度的时间间隔, 时间间隔的取值由电力调度需求确定, $\overline{PG}_i$ 和 $\underline{PG}_i$ 分别为连接节点 i 的发电机组的有功功率上限和有功功率下限, SRU_t 和 SRD_t 分别为输电网或配电网的向上旋转备用的容量需求和向下旋转备用的容量需求;

其中的输电网中发电机组的爬坡约束条件为:

$$-RD_i^{trans} \Delta t \leq pg_{i,t+1}^{trans} - pg_{i,t}^{trans} \leq RU_i^{trans} \Delta t, \forall i \in G^{trans}, \forall t \in T$$

其中的输电网中发电机组的有功功率约束条件为:

$$\underline{PG}_i^{trans} \leq pg_{i,t}^{trans} \leq \overline{PG}_i^{trans}, \forall i \in G^{trans}, \forall t \in T;$$

(1-2-2) 配电网模型约束条件:

其中的配电网潮流约束条件为:

$$\sum_{i:i \rightarrow j} (p_{i \rightarrow j,t}^{dist,k} - l_{i \rightarrow j,t}^{dist,k}) + p_{j,t}^{dist,k} = \sum_{m:j \rightarrow m} p_{j \rightarrow m,t}^{dist,k}, \forall j \in N^{dist,k}, \forall t \in T$$

上式中, $i:i \rightarrow j$ 表示末端节点为节点 j 的支路的首端节点集合, $p_{i \rightarrow j,t}$ 表示配电网中, 节点 i 向节点 j 的有功功率潮流, $l_{i \rightarrow j,t}$ 表示配电网中节点 i 向节点 j 的有功功率损耗, $p_{j,t}^{dist,k}$ 表示配电网中节点 j 的有功功率输入, $N^{dist,k}$ 表示配电网节点编号集合, 节点 j 的有功功率输入 $p_{j,t}^{dist,k}$ 和有功功率损耗 $l_{i \rightarrow j,t}$ 分别通过下面两式计算:

$$p_{j,t}^{dist,k} = \begin{cases} pg_{j,t}^{dist,k} - PD_{j,t}^{dist,k} + pb_t^{dist,k}, & j \text{ 连接输电网} \\ pg_{j,t}^{dist,k} - PD_{j,t}^{dist,k}, & j \text{ 不连接输电网} \end{cases}, \forall j \in N^{dist,k}, \forall t \in T$$

$$l_{i \rightarrow j,t}^{dist,k} = \left[\left(\hat{P}_{i \rightarrow j,t}^{dist,k} \right)^2 + \left(\hat{Q}_{i \rightarrow j,t}^{dist,k} \right)^2 \right] R_{i \rightarrow j}^{dist,k} / \left(\hat{V}_{i,t}^{dist,k} \right)^2$$

$$+ 2 \left(p_{i \rightarrow j,t}^{dist,k} - \hat{P}_{i \rightarrow j,t}^{dist,k} \right) \hat{P}_{i \rightarrow j,t}^{dist,k} R_{i \rightarrow j}^{dist,k} / \left(\hat{V}_{i,t}^{dist,k} \right)^2, \forall (i \rightarrow j) \in L^{dist,k}, \forall t \in T$$

上式中, $pb_t^{dist,k}$ 为输电网向配电网 k 在动态调度时刻 t 的传输功率, $\hat{P}_{i \rightarrow j,t}$ 和 $\hat{Q}_{i \rightarrow j,t}$ 分别表示配电网中从节点 $i \rightarrow$ 节点 j 线路上的有功功率潮流展开点和无功功率潮流展开点, $\hat{V}_{i,t}$ 表示节点 i 的电压展开点, 上述各展开点从电网调度中心的历史相近负荷水平下线路对应的运行数据中选取, $R_{i \rightarrow j}$ 表示线路 $i \rightarrow j$ 的电阻;

其中的配电网线路传输容量约束条件为:

$$-PL_{i \rightarrow j}^{dist,k} \leq p_{i \rightarrow j,t}^{dist,k} \leq PL_{i \rightarrow j}^{dist,k}, \forall (i \rightarrow j) \in L^{dist,k}, \forall t \in T$$

上式中, $PL_{i \rightarrow j}$ 表示配电网中线路 $i \rightarrow j$ 的传输容量;

其中的配电网中发电机组有功功率约束条件为:

$$5 \quad \underline{PG}_i^{dist,k} \leq pg_{i,t}^{dist,k} \leq \overline{PG}_i^{dist,k}, \forall i \in G^{dist,k}, \forall t \in T$$

(1-2-3) 输电网与配电网模型连接的边界约束条件:

边界约束条件即在每个调度时段输电网向配电网传输的有功功率与配电网接收的有功功率之间的平衡, 表示为:

$$pb_{I(k),t}^{trans} = pb_t^{dist,k}, \forall k \in DIST, \forall t \in T$$

10 上式中, $I(k)$ 表示输电网中与配电网 k 相连的节点;

(2) 将上述步骤 (1) 建立的输配电网协调的动态调度模型转化为矩阵形式, 将输配电网协调的动态调度模型中的输电网模型变量记为向量 $\mathbf{x}^{trans}$, 配电网 k 在动态调度时刻 t 的变量记为向量 $\mathbf{x}_t^{dist,k}$, 则输配电网协调的动态调度模型的矩阵形式如下:

$$\min C^{trans}(\mathbf{x}^{trans}) + \sum_{t \in T} \sum_{k \in DIST} C_t^{dist,k}(\mathbf{x}_t^{dist,k})$$

满足:

$$\mathbf{x}^{trans} \in X^{trans}$$

$$\mathbf{x}_t^{dist,k} \in X_t^{dist,k}, \forall k \in DIST, \forall t \in T$$

$$\mathbf{A}_t^k \mathbf{x}^{trans} + \mathbf{B}_t^k \mathbf{x}_t^{dist,k} \leq \mathbf{c}_t^k, \forall k \in DIST, \forall t \in T$$

15 上式中, 函数 $C^{trans}(\cdot)$ 表示输电网的目标函数, 函数 $C_t^{dist,k}(\cdot)$ 表示配电网 k 在动态调度

时刻 t 的目标函数, X^{trans} 和 $X_t^{dist,k}$ 分别表示输电网和配电网 k 在动态调度时刻 t 的约束集合,

$\mathbf{A}_t^k \mathbf{x}^{trans} + \mathbf{B}_t^k \mathbf{x}_t^{dist,k} \leq \mathbf{c}_t^k$ 表示边界约束条件, 其中的 $\mathbf{A}_t^k$ 、 $\mathbf{B}_t^k$ 、 $\mathbf{c}_t^k$ 分别为配电网 k 在动态调度

时刻 t 与输电网边界条件中的输电网变量系数、配电网变量系数和常量系数, 由上述步骤

(1-2-3) 中的约束系数中提取得到, 提取方法为: 步骤 (1-2-3) 中的约束在

20 $\mathbf{A}_t^k \mathbf{x}^{trans} + \mathbf{B}_t^k \mathbf{x}_t^{dist,k} \leq \mathbf{c}_t^k$ 中对应 2 行, $\mathbf{A}_t^k$ 中与 $pb_{I(k),t}^{trans}$ 相对应的列在两行中分别为 1 和 -1, 其余

为 0, $\mathbf{B}_t^k$ 中与 $pb_t^{dist,k}$ 相对应的列在两行中分别为 -1 和 1, 其余为 0, $\mathbf{c}_t^k$ 为 0, $DIST$ 代表配

电网编号集合, T 代表调度时段集合;

(3) 求解上述步骤 (2) 得到的矩阵形式的输配电网协调的动态调度模型, 具体步骤

如下:

(3-1) 在配电网侧, 由每个配电网独立求解配电网的成本函数, 步骤如下:

(3-1-1) 将配电网单时段调度问题表示为以下优化问题:

$$\min \frac{1}{2} (\mathbf{x}_t^{\text{dist},k})^T \mathbf{Q}_t^k (\mathbf{x}_t^{\text{dist},k})$$

$$\text{满足: } \mathbf{G}_t^k \mathbf{x}_t^{\text{dist},k} + \mathbf{h}_t^k p_t^{b,k} \leq \mathbf{i}_t^k$$

5 上式中, $\mathbf{Q}_t^k$ 为步骤 (1-1) 中的目标函数中配电网项 $\sum_{t \in T} \sum_{k \in \text{DIST}} \sum_{i \in G^{\text{dist},k}} C_i^{\text{dist},k} (pg_{i,t}^{\text{dist},k})$ 的二次系数矩阵, $\mathbf{G}_t^k \mathbf{x}_t^{\text{dist},k} + \mathbf{h}_t^k p_t^{b,k} \leq \mathbf{i}_t^k$ 表示配电网 k 在动态调度时刻 t 的约束条件以及配电网 k 和输电网的边界约束条件, 即步骤 (1-2-2) - (1-2-3) 中的约束条件, 其中 $\mathbf{G}_t^k$ 为配电网 k 在动态调度时刻 t 的变量的系数矩阵, $\mathbf{h}_t^k$ 配电网 k 在动态调度时刻 t 从输电网的输入功率变量的系数矩阵, $\mathbf{i}_t^k$ 为约束条件中的常数项;

10 (3-1-2) 计算配电网各个时段内对从输电网输入的功率的需求范围, 其中每个时段对从输电网输入的功率的需求下界为下面优化问题中 $p_t^{b,k}$ 的解:

$$\min p_t^{b,k}$$

$$\text{满足: } \mathbf{G}_t^k \mathbf{x}_t^{\text{dist},k} + \mathbf{h}_t^k p_t^{b,k} \leq \mathbf{i}_t^k$$

每个时段对从输电网输入的功率的需求上界为下面优化问题中 $p_t^{b,k}$ 的解:

$$\max p_t^{b,k}$$

$$\text{满足: } \mathbf{G}_t^k \mathbf{x}_t^{\text{dist},k} + \mathbf{h}_t^k p_t^{b,k} \leq \mathbf{i}_t^k$$

15 求解上述优化问题, 计算得到配电网在各个时段内对从输电网输入的功率的下界和上界, 分别记为 $lb_t^{b,k}$ 和 $ub_t^{b,k}$;

(3-1-3) 初始化时, 设配电网中成本函数计算次数 $u=1$, 并设配电网中从输电网输入的功率子区间下界 $\alpha_t^{k,u-1} = lb_t^{b,k}$;

(3-1-4) 取微小偏移量 $e=1 \times 10^{-3}$, 令 $p_t^{b,k} = \alpha_t^{k,u-1} + e$, 将 $p_t^{b,k}$ 代入上述步骤 (3-1-1) 的优化问题中, 对步骤 (3-1-1) 的优化问题中的约束条件进行判断, 将起作用的约束, 即最优解处不等式 $\mathbf{G}_t^k \mathbf{x}_t^{\text{dist},k} + \mathbf{h}_t^k p_t^{b,k} \leq \mathbf{i}_t^k$ 中两侧相等的行用下标 $(\)_A$ 表示, 将不起作用约束, 即最优解处不等式 $\mathbf{G}_t^k \mathbf{x}_t^{\text{dist},k} + \mathbf{h}_t^k p_t^{b,k} \leq \mathbf{i}_t^k$ 中两侧不相等的行用下标 $(\)_I$ 表示;

(3-1-5) 计算配电网中从输电网输入的功率子区间上界 $\alpha_t^{k,u}$, 该上界通过求解下面的

优化问题得到，其最优目标函数值为配电网中从输电网输入的功率子区间上界 $\alpha_t^{k,u}$ ：

$$\max p_t^{b,k}$$

满足：

$$\begin{aligned} & \left((\mathbf{G}_t^k)_A (\mathbf{Q}_t^k)^{-1} (\mathbf{G}_t^k)_A^T \right)^{-1} (\mathbf{h}_t^k)_A p_t^{b,k} \geq \left((\mathbf{G}_t^k)_A (\mathbf{Q}_t^k)^{-1} (\mathbf{G}_t^k)_A^T \right)^{-1} (\mathbf{i}_t^k)_A \\ & \left[(\mathbf{G}_t^k)_I (\mathbf{Q}_t^k)^{-1} (\mathbf{G}_t^k)_A^T \left((\mathbf{G}_t^k)_A (\mathbf{Q}_t^k)^{-1} (\mathbf{G}_t^k)_A^T \right)^{-1} (\mathbf{h}_t^k)_A - (\mathbf{h}_t^k)_I \right] p_t^{b,k} \geq \\ & (\mathbf{G}_t^k)_I (\mathbf{Q}_t^k)^{-1} (\mathbf{G}_t^k)_A^T \left[(\mathbf{G}_t^k)_A (\mathbf{Q}_t^k)^{-1} (\mathbf{G}_t^k)_A^T \right]^{-1} (\mathbf{i}_t^k)_A - (\mathbf{i}_t^k)_I \end{aligned}$$

(3-1-6) 计算属于配电网中从输电网输入的功率子区间 $[\alpha_t^{k,u-1}, \alpha_t^{k,u}]$ 的配电网局部成本函数 $Q_t^{k,u}$ ，该函数表示为：

$$5 \quad Q_t^{k,u} (p_t^{b,k}) = \min \frac{1}{2} (\mathbf{x}_t^{\text{dist},k})^T \mathbf{Q}_t^k (\mathbf{x}_t^{\text{dist},k})$$

上式中：

$$\mathbf{x}_t^{\text{dist},k} = -(\mathbf{Q}_t^k)^{-1} (\mathbf{G}_t^k)_A^T \left[(\mathbf{G}_t^k)_A (\mathbf{Q}_t^k)^{-1} (\mathbf{G}_t^k)_A^T \right]^{-1} \left((\mathbf{h}_t^k)_A p_t^{b,k} - (\mathbf{i}_t^k)_A \right)$$

(3-1-7) 将上述步骤 (3-1-5) 计算得到的配电网中从输电网输入的功率子区间上界 $\alpha_t^{k,u}$ 与上述步骤 (3-1-2) 计算得到的配电网中从输电网输入的功率上界 $ub_t^{b,k}$ 进行比较，若 $\alpha_t^{k,u} =$
 10 $ub_t^{b,k}$ ，则将生成的配电网中从输电网输入的功率子区间与每个子区间的配电网局部成本函数传给输电网，并进行步骤 (3-2)，若 $\alpha_t^{k,u} < ub_t^{b,k}$ ，则将 u 增加 1，返回步骤 (3-1-4)；

(3-2) 输电网根据上述步骤 (3-1) 的配电网在每个调度时段中从输电网输入的功率子区间，计算得到输电网的调度策略；

(3-2-1) 初始化时，设定求解步数 v 初始化为 1，求解下述优化问题，并将优化问题的
 15 最优解记为 $(\mathbf{x}_v^{\text{trans}}, \mathbf{p}_v^b)$ ，其中向量 $\mathbf{p}_v^b$ 由所有配电网在每一个调度时段的注入功率 $p_t^{b,k}$ 组成，
 向量 $\mathbf{x}_v^{\text{trans}}$ 对应下述优化问题中向量 $\mathbf{x}^{\text{trans}}$ 在最优解处的取值：

$$\begin{aligned} & \min C^{\text{trans}} (\mathbf{x}^{\text{trans}}) + \sum_{t \in T} \sum_{k \in \text{DIST}} CBL_t^k \\ & \text{满足：} \mathbf{D} \mathbf{x}^{\text{trans}} + \sum_{t \in T} \sum_{k \in \text{DIST}} \mathbf{e}_t^k p_t^{b,k} \leq \mathbf{f} \\ & CBL_t^k \geq \delta_t^{k,u} p_t^{b,k} + \varepsilon_t^{k,u}, \forall u = 1, 2, \dots, n_t^k, \forall t \in T, \forall k \in \text{DIST} \end{aligned}$$

上式中， CBL_t^k 是中间变量，物理含义为线性化后的配电网子区间局部最优成本， n_t^k 代

表配电网 k 在动态调度时刻 t 的子区间数目, $\delta_t^{k,u}$ 与 $\varepsilon_t^{k,u}$ 的定义如下式:

$$\begin{aligned}\delta_t^{k,u} &= (Q_t^{k,u}(\alpha_t^{k,u}) - Q_t^{k,u}(\alpha_t^{k,u-1})) / (\alpha_t^{k,u} - \alpha_t^{k,u-1}), \\ \varepsilon_t^{k,u} &= Q_t^{k,u}(\alpha_t^{k,u}) - \delta_t^{k,u} \alpha_t^{k,u}, \forall u = 1, 2, \dots, n_t^k\end{aligned}$$

上式中, $Q_t^{k,u}$ 为步骤 (3-1-6) 生成的配电网局部成本函数, $\alpha_t^{k,u}$ 为配电网中从输电网输入的功率子区间的边界;

- 5 (3-2-2) 从上述步骤 (3-1-6) 的配电网中从输电网输入的功率子区间 $[\alpha_t^{k,u-1}, \alpha_t^{k,u}]$ 中, 找到包含上述最优解 $(\mathbf{x}_v^{\text{trans}}, \mathbf{p}_v^{\text{b}})$ 的配电网子区间, 将所有包含上述最优解 $(\mathbf{x}_v^{\text{trans}}, \mathbf{p}_v^{\text{b}})$ 的配电网子区间构成一个集合, 记作 C_v ;

(3-2-3) 利用下式, 求解最优解 $(\hat{\mathbf{x}}_v^{\text{trans}}, \hat{\mathbf{p}}_v^{\text{b}})$:

$$\begin{aligned}\min & C^{\text{trans}}(\mathbf{x}^{\text{trans}}) + CB_v(\mathbf{p}^{\text{b}}) \\ \text{满足: } & \mathbf{D}\mathbf{x}^{\text{trans}} + \mathbf{E}\mathbf{p}^{\text{b}} \leq \mathbf{f} \\ & \mathbf{p}^{\text{b}} \in C_v\end{aligned}$$

- 10 上式中, $\mathbf{E}\mathbf{p}^{\text{b}} = \sum_{t \in T} \sum_{k \in \text{DIST}} \mathbf{e}_t^k p_t^{b,k}$, $CB_v(\mathbf{p}^{\text{b}})$ 是每个配电网在每个调度时段内与上述集合 C_v 相对应的局部成本函数 $Q_t^{k,u}$ 的加和;

(3-2-4) 根据上述步骤 (3-2-3) 的最优解 $(\hat{\mathbf{x}}_v^{\text{trans}}, \hat{\mathbf{p}}_v^{\text{b}})$, 得到输配电网成本函数的下降方向, 根据下降方向得到输配电网成本下降量的目标函数:

$$\begin{aligned}\min_{(\Delta \mathbf{x}^{\text{trans}}, \Delta \mathbf{p}^{\text{b}})} & \nabla C^{\text{trans}}(\hat{\mathbf{x}}_v^{\text{trans}}) \cdot \Delta \mathbf{x}^{\text{trans}} + \nabla CB_v(\hat{\mathbf{p}}_v^{\text{b}}) \cdot \Delta \mathbf{p}^{\text{b}} \\ \text{满足: } & \mathbf{D} \cdot (\hat{\mathbf{x}}_v^{\text{trans}} + \Delta \mathbf{x}^{\text{trans}}) + \mathbf{E} \cdot (\hat{\mathbf{p}}_v^{\text{b}} + \Delta \mathbf{p}^{\text{b}}) \leq \mathbf{f} \\ & \|\Delta \mathbf{x}^{\text{trans}}\|_{\infty} \leq e, \|\Delta \mathbf{p}^{\text{b}}\|_{\infty} \leq e\end{aligned}$$

- 15 式中, $(\Delta \mathbf{x}^{\text{trans}}, \Delta \mathbf{p}^{\text{b}})$ 为下降方向, $\nabla C^{\text{trans}}(\hat{\mathbf{x}}_v^{\text{trans}})$ 为函数 C^{trans} 在 $\hat{\mathbf{x}}_v^{\text{trans}}$ 的梯度, $\nabla CB_v(\hat{\mathbf{p}}_v^{\text{b}})$ 为函数 CB_v 在 $\hat{\mathbf{p}}_v^{\text{b}}$ 的梯度, e 为一个足够小的正数, 取值为 1×10^{-3} ;

对输配电网成本下降量的目标函数进行判断, 若目标函数值大于或等于 0, 则得到输配电网成本最优解 $(\hat{\mathbf{x}}^{\text{trans}}, \hat{\mathbf{p}}^{\text{b}})$, 进行步骤 (3-3), 若目标函数值小于 0, 根据下式计算

$(\mathbf{x}_{v+1}^{\text{trans}}, \mathbf{p}_{v+1}^{\text{b}})$:

- 20 $(\mathbf{x}_{v+1}^{\text{trans}}, \mathbf{p}_{v+1}^{\text{b}}) = (\hat{\mathbf{x}}_v^{\text{trans}} + \Delta \mathbf{x}_v^{\text{trans}}, \hat{\mathbf{p}}_v^{\text{b}} + \Delta \mathbf{p}_v^{\text{b}})$

将 v 增加 1，返回步骤 (3-2-2)；

(3-3) 每个配电网从上述步骤 (3-2-4) 输电网成本最优解 $(\hat{\mathbf{x}}^{\text{trans}}, \hat{\mathbf{p}}^b)$ 中的向量 $\hat{\mathbf{p}}^b$ ，得到配电网各自调度时段的分量 $p_t^{b,k}$ ，利用下式，计算得到配电网模型变量 $\mathbf{x}_t^{\text{dist},k}$ ：

$$\begin{aligned} \min & \frac{1}{2} (\mathbf{x}_t^{\text{dist},k})^T \mathbf{Q}_t^k (\mathbf{x}_t^{\text{dist},k}) \\ \text{s.t.} & \mathbf{G}_t^k \mathbf{x}_t^{\text{dist},k} + \mathbf{h}_t^k p_t^{b,k} \leq \mathbf{i}_t^k \end{aligned}$$

5 (4) 输电网和配电网分别将步骤 (3-2-4)、步骤 (3-3) 计算得到的最优解 $\hat{\mathbf{x}}^{\text{trans}}$ 、 $\mathbf{x}_t^{\text{dist},k}$ 中的调度计划分量下发至所管辖的各个电厂，各个电厂依据调度计划对发电机组采用自动控制方法追踪执行，实现输配电网非迭代的分解协调动态调度。

本申请反馈提出的输配电网非迭代的分解协调动态调度方法，其优点是：

10 本申请反馈方法能够将输配电网协同动态调度问题以分解协调的非迭代方式进行求解，保障输电网和配电网运营商各自的信息隐私安全。同时所提出的非迭代的分解协调算法不需要输电网和配电网之间的反复迭代，仅通过有限的两次信息交互即可获得最优调度参数，相比于传统同步式需要迭代的分解协调算法，降低了对通信的依赖与算法复杂性，有较高的算法执行稳定性，更利于实际应用。

15 具体实施方式

本申请反馈提出的输配电网非迭代的分解协调动态调度方法，包括以下步骤：

(1) 建立一个输配电网协调的动态调度模型，该模型由目标函数和约束条件构成，包括：

(1-1) 动态调度模型的目标函数：

20 以输电网和配电网的总发电成本为动态调度的目标函数为：

$$\min \sum_{t \in T} \sum_{i \in G^{\text{trans}}} C_i^{\text{trans}} (pg_{i,t}^{\text{trans}}) + \sum_{t \in T} \sum_{k \in \text{DIST}} \sum_{i \in G^{\text{dist},k}} C_i^{\text{dist},k} (pg_{i,t}^{\text{dist},k})$$

上式中， i 为输电网或配电网中的任意节点， T 代表动态调度时刻集合， G 代表输电网或配电网中发电机组所在节点集合， DIST 代表配电网编号集合， $pg_{i,t}$ 代表输电网或配电网中连接节点 i 的发电机组在动态调度时刻 t 的有功功率，上标 $^{\text{trans}}$ 代表输电网，上标 $^{\text{dist},k}$ 代表编号为 k 的配电网，函数 $C_i(\bullet)$ 代表连接节点 i 的发电机组的发电成本函数，该成本函数用二次函数表示为：

$$C_i (pg_{i,t}) = a_{0,i} + a_{1,i} pg_{i,t} + a_{2,i} pg_{i,t}^2$$

上式中, $a_{0,i}$ 、 $a_{1,i}$ 和 $a_{2,i}$ 分别代表连接节点 i 的发电机组的发电成本常数项系数、一次项系数和二次项系数, 常数项系数、一次项系数和二次项系数为发电机组固有参数, 可以从发电机铭牌获取;

(1-2) 动态调度模型的约束条件, 包括:

5 (1-2-1) 输电网模型约束条件,

其中的有功功率平衡约束条件为:

$$\sum_{i \in G^{trans}} pg_{i,t}^{trans} = \sum_{i \in B^{trans}} pb_{i,t}^{trans} + \sum_{i \in D^{trans}} PD_{i,t}^{trans}, \forall t \in T$$

10 上式中, B 代表输电网中的输电网与配电网相互连接的边界节点集合, $pb_{i,t}^{trans}$ 代表在动态调度时刻 t , 输电网从边界节点 i 传送到配电网的有功功率, D 代表输电网或配电网中负荷节点集合, $PD_{i,t}$ 代表在动态调度时刻 t 连接节点 i 的负荷预测值;

其中的输电网中线路传输容量的约束条件为:

$$\begin{aligned} -PL_n^{trans} &\leq \sum_{i \in G^{trans}} SF_{n-i}^{trans} pg_{i,t}^{trans} - \sum_{i \in B^{trans}} SF_{n-i}^{trans} pb_{i,t}^{trans} \\ &\quad - \sum_{i \in D^{trans}} SF_{n-i}^{trans} PD_{i,t}^{trans} \leq PL_n^{trans}, \forall n \in L^{trans}, \forall t \in T \end{aligned}$$

15 上式中, n 为线路编号, PL_n 表示输电网中任意线路 n 的传输容量, SF_{n-i} 代表节点 i 到线路 n 的转移分布因子, 转移分布因子为电网拓扑参数, 从电网调度中心获取, L 是输电网中所有线路编号的集合;

其中的旋转备用约束条件为:

$$\begin{aligned} 0 &\leq ru_{i,t}^{trans} \leq RU_i^{trans} \Delta t, ru_{i,t}^{trans} \leq \overline{PG}_i^{trans} - pg_{i,t}^{trans}, \forall i \in G^{trans}, \forall t \in T \\ 0 &\leq rd_{i,t}^{trans} \leq RD_i^{trans} \Delta t, rd_{i,t}^{trans} \leq pg_{i,t}^{trans} - \underline{PG}_i^{trans}, \forall i \in G^{trans}, \forall t \in T \\ \sum_{i \in G^{trans}} ru_{i,t}^{trans} &\geq SRU_t^{trans}, \sum_{i \in G^{trans}} rd_{i,t}^{trans} \geq SRD_t^{trans}, \forall t \in T \end{aligned}$$

20 上式中, $ru_{i,t}$ 和 $rd_{i,t}$ 分别为在动态调度时刻 t , 连接节点 i 的发电机组向上旋转备用容量和向下旋转备用容量, RU_i 和 RD_i 分别为连接节点 i 的发电机组向上爬坡速率和向下爬坡速率, Δt 为动态调度的时间间隔, 时间间隔的取值由电力调度需求确定, 取值为1小时或15分钟, $\overline{PG}_i$ 和 $\underline{PG}_i$ 分别为连接节点 i 的发电机组的有功功率上限和有功功率下限, SRU_t 和 SRD_t 分别为输电网或配电网的向上旋转备用的容量需求和向下旋转备用的容量需求;

25 其中的输电网中发电机组的爬坡约束条件为:

$$-RD_i^{trans} \Delta t \leq pg_{i,t+1}^{trans} - pg_{i,t}^{trans} \leq RU_i^{trans} \Delta t, \forall i \in G^{trans}, \forall t \in T$$

其中的输电网中发电机组的有功功率约束条件为:

$$\underline{PG}_i^{trans} \leq pg_{i,t}^{trans} \leq \overline{PG}_i^{trans}, \forall i \in G^{trans}, \forall t \in T;$$

(1-2-2) 配电网模型约束条件:

5 其中的配电网潮流约束条件为:

$$\sum_{i:i \rightarrow j} (p_{i \rightarrow j,t}^{dist,k} - l_{i \rightarrow j,t}^{dist,k}) + p_{j,t}^{dist,k} = \sum_{m:j \rightarrow m} p_{j \rightarrow m,t}^{dist,k}, \forall j \in N^{dist,k}, \forall t \in T$$

上式中, $i:i \rightarrow j$ 表示末端节点为节点 j 的支路的首端节点集合, $p_{i \rightarrow j,t}$ 表示配电网中, 节点 i 向节点 j 的有功功率潮流, $l_{i \rightarrow j,t}$ 表示配电网中节点 i 向节点 j 的有功功率损耗, $p_{j,t}^{dist,k}$ 表示配电网中节点 j 的有功功率输入, $N^{dist,k}$ 表示配电网节点编号集合, 节点 j 的有功功率

10 输入 $p_{j,t}^{dist,k}$ 和有功功率损耗 $l_{i \rightarrow j,t}$ 分别通过下面两式计算:

$$p_{j,t}^{dist,k} = \begin{cases} pg_{j,t}^{dist,k} - PD_{j,t}^{dist,k} + pb_t^{dist,k}, & j \text{ 连接输电网} \\ pg_{j,t}^{dist,k} - PD_{j,t}^{dist,k}, & j \text{ 不连接输电网} \end{cases}, \forall j \in N^{dist,k}, \forall t \in T$$

$$l_{i \rightarrow j,t}^{dist,k} = \left[\left(\hat{P}_{i \rightarrow j,t}^{dist,k} \right)^2 + \left(\hat{Q}_{i \rightarrow j,t}^{dist,k} \right)^2 \right] R_{i \rightarrow j}^{dist,k} / \left(\hat{V}_{i,t}^{dist,k} \right)^2$$

$$+ 2 \left(p_{i \rightarrow j,t}^{dist,k} - \hat{P}_{i \rightarrow j,t}^{dist,k} \right) \hat{P}_{i \rightarrow j,t}^{dist,k} R_{i \rightarrow j}^{dist,k} / \left(\hat{V}_{i,t}^{dist,k} \right)^2, \forall (i \rightarrow j) \in L^{dist,k}, \forall t \in T$$

上式中, $pb_t^{dist,k}$ 为输电网向配电网 k 在动态调度时刻 t 的传输功率, $\hat{P}_{i \rightarrow j,t}$ 和 $\hat{Q}_{i \rightarrow j,t}$ 分别表示配电网中从节点 $i \rightarrow$ 节点 j 线路上的有功功率潮流展开点和无功功率潮流展开点, $\hat{V}_{i,t}$ 表示节点 i 的电压展开点, 上述各展开点从电网调度中心的历史相近负荷水平下线路对应的运行数据中选取, $R_{i \rightarrow j}$ 表示线路 $i \rightarrow j$ 的电阻;

其中的配电网线路传输容量约束条件为:

$$-PL_{i \rightarrow j}^{dist,k} \leq p_{i \rightarrow j,t}^{dist,k} \leq PL_{i \rightarrow j}^{dist,k}, \forall (i \rightarrow j) \in L^{dist,k}, \forall t \in T$$

上式中, $PL_{i \rightarrow j}$ 表示配电网中线路 $i \rightarrow j$ 的传输容量;

20 其中的配电网中发电机组有功功率约束条件为:

$$\underline{PG}_i^{dist,k} \leq pg_{i,t}^{dist,k} \leq \overline{PG}_i^{dist,k}, \forall i \in G^{dist,k}, \forall t \in T$$

(1-2-3) 输电网与配电网模型连接的边界约束条件:

边界约束条件即在每个调度时段输电网向配电网传输的有功功率与配电网接收的有功功率之间的平衡, 表示为:

$$pb_{I(k),t}^{trans} = pb_t^{dist,k}, \forall k \in DIST, \forall t \in T$$

上式中, $I(k)$ 表示输电网中与配电网 k 相连的节点;

(2) 将上述步骤 (1) 建立的输配电网协调的动态调度模型转化为矩阵形式, 将输配电网协调的动态调度模型中的输电网模型变量记为向量 $\mathbf{x}^{trans}$, 配电网 k 在动态调度时刻 t 的变量记为向量 $\mathbf{x}_t^{dist,k}$, 则输配电网协调的动态调度模型的矩阵形式如下:

$$\min C^{trans}(\mathbf{x}^{trans}) + \sum_{t \in T} \sum_{k \in DIST} C_t^{dist,k}(\mathbf{x}_t^{dist,k})$$

满足:

$$\mathbf{x}^{trans} \in X^{trans}$$

$$\mathbf{x}_t^{dist,k} \in X_t^{dist,k}, \forall k \in DIST, \forall t \in T$$

$$\mathbf{A}_t^k \mathbf{x}^{trans} + \mathbf{B}_t^k \mathbf{x}_t^{dist,k} \leq \mathbf{c}_t^k, \forall k \in DIST, \forall t \in T$$

上式中, 函数 $C^{trans}(\cdot)$ 表示输电网的目标函数, 函数 $C_t^{dist,k}(\cdot)$ 表示配电网 k 在动态调度时刻 t 的目标函数, X^{trans} 和 $X_t^{dist,k}$ 分别表示输电网和配电网 k 在动态调度时刻 t 的约束集合, $\mathbf{A}_t^k \mathbf{x}^{trans} + \mathbf{B}_t^k \mathbf{x}_t^{dist,k} \leq \mathbf{c}_t^k$ 表示边界约束条件, 其中的 $\mathbf{A}_t^k$ 、 $\mathbf{B}_t^k$ 、 $\mathbf{c}_t^k$ 分别为配电网 k 在动态调度时刻 t 与输电网边界条件中的输电网变量系数、配电网变量系数和常量系数, 由上述步骤 (1-2-3) 中的约束系数中提取得到, 提取方法为: 步骤 (1-2-3) 中的约束在 $\mathbf{A}_t^k \mathbf{x}^{trans} + \mathbf{B}_t^k \mathbf{x}_t^{dist,k} \leq \mathbf{c}_t^k$ 中对应 2 行, $\mathbf{A}_t^k$ 中与 $pb_{I(k),t}^{trans}$ 相对应的列在两行中分别为 1 和 -1, 其余为 0, $\mathbf{B}_t^k$ 中与 $pb_t^{dist,k}$ 相对应的列在两行中分别为 -1 和 1, 其余为 0, $\mathbf{c}_t^k$ 为 0, $DIST$ 代表配电网编号集合, T 代表调度时段集合;

(3) 求解上述步骤 (2) 得到的矩阵形式的输配电网协调的动态调度模型, 具体步骤如下:

(3-1) 在配电网侧, 由每个配电网独立求解配电网的成本函数, 步骤如下:

(3-1-1) 将配电网单时段调度问题表示为以下优化问题:

$$\min \frac{1}{2} (\mathbf{x}_t^{dist,k})^T \mathbf{Q}_t^k (\mathbf{x}_t^{dist,k})$$

$$\text{满足: } \mathbf{G}_t^k \mathbf{x}_t^{dist,k} + \mathbf{h}_t^k p_t^{b,k} \leq \mathbf{i}_t^k$$

上式中, $\mathbf{Q}_t^k$ 为步骤 (1-1) 中的目标函数中配电网项 $\sum_{t \in T} \sum_{k \in DIST} \sum_{i \in G^{dist,k}} C_i^{dist,k}(pg_{i,t}^{dist,k})$ 的二次系数矩阵, $\mathbf{G}_t^k \mathbf{x}_t^{dist,k} + \mathbf{h}_t^k p_t^{b,k} \leq \mathbf{i}_t^k$ 表示配电网 k 在动态调度时刻 t 的约束条件以及配电网 k 和输电网的边界约束条件, 即步骤 (1-2-2) - (1-2-3) 中的约束条件, 其中 $\mathbf{G}_t^k$ 为配电网 k 在

动态调度时刻 t 的变量的系数矩阵, $\mathbf{h}_t^k$ 配电网 k 在动态调度时刻 t 从输电网的输入功率变量的系数矩阵, $\mathbf{i}_t^k$ 为约束条件中的常数项;

(3-1-2) 计算配电网各个时段内对从输电网输入的功率的需求范围, 其中每个时段对从输电网输入的功率的需求下界为下面优化问题中 $p_t^{b,k}$ 的解:

$$\begin{aligned} & \min p_t^{b,k} \\ & \text{满足: } \mathbf{G}_t^k \mathbf{x}_t^{\text{dist},k} + \mathbf{h}_t^k p_t^{b,k} \leq \mathbf{i}_t^k \end{aligned}$$

每个时段对从输电网输入的功率的需求上界为下面优化问题中 $p_t^{b,k}$ 的解:

$$\begin{aligned} & \max p_t^{b,k} \\ & \text{满足: } \mathbf{G}_t^k \mathbf{x}_t^{\text{dist},k} + \mathbf{h}_t^k p_t^{b,k} \leq \mathbf{i}_t^k \end{aligned}$$

求解上述优化问题, 计算得到配电网在各个时段内对从输电网输入的功率的下界和上界, 分别记为 $lb_t^{b,k}$ 和 $ub_t^{b,k}$;

(3-1-3) 初始化时, 设配电网中成本函数计算次数 $u=1$, 并设配电网中从输电网输入的功率子区间下界 $\alpha_t^{k,u-1} = lb_t^{b,k}$;

(3-1-4) 取微小偏移量 $e=1 \times 10^{-3}$, 令 $p_t^{b,k} = \alpha_t^{k,u-1} + e$, 将 $p_t^{b,k}$ 代入上述步骤(3-1-1)的优化问题中, 基于优化结果中每一个约束是否起作用, 对步骤(3-1-1)的优化问题中的约束条件进行判断, 其中每一行分类为起作用约束和不起作用约束, 将起作用的约束, 即最优解处不等式 $\mathbf{G}_t^k \mathbf{x}_t^{\text{dist},k} + \mathbf{h}_t^k p_t^{b,k} \leq \mathbf{i}_t^k$ 中两侧相等的行用下标 $(\)_A$ 表示, 将不起作用约束, 即最优解处不等式 $\mathbf{G}_t^k \mathbf{x}_t^{\text{dist},k} + \mathbf{h}_t^k p_t^{b,k} \leq \mathbf{i}_t^k$ 中两侧不相等的行用下标 $(\)_I$ 表示;

(3-1-5) 计算配电网中从输电网输入的功率子区间上界 $\alpha_t^{k,u}$, 该上界通过求解下面的优化问题得到, 其最优目标函数值为配电网中从输电网输入的功率子区间上界 $\alpha_t^{k,u}$:

$$\begin{aligned} & \max p_t^{b,k} \\ & \text{满足:} \\ & \left((\mathbf{G}_t^k)_A (\mathbf{Q}_t^k)^{-1} (\mathbf{G}_t^k)_A^T \right)^{-1} (\mathbf{h}_t^k)_A p_t^{b,k} \geq \left((\mathbf{G}_t^k)_A (\mathbf{Q}_t^k)^{-1} (\mathbf{G}_t^k)_A^T \right)^{-1} (\mathbf{i}_t^k)_A \\ & \left[(\mathbf{G}_t^k)_I (\mathbf{Q}_t^k)^{-1} (\mathbf{G}_t^k)_A^T \left((\mathbf{G}_t^k)_A (\mathbf{Q}_t^k)^{-1} (\mathbf{G}_t^k)_A^T \right)^{-1} (\mathbf{h}_t^k)_A - (\mathbf{h}_t^k)_I \right] p_t^{b,k} \geq \\ & (\mathbf{G}_t^k)_I (\mathbf{Q}_t^k)^{-1} (\mathbf{G}_t^k)_A^T \left[(\mathbf{G}_t^k)_A (\mathbf{Q}_t^k)^{-1} (\mathbf{G}_t^k)_A^T \right]^{-1} (\mathbf{i}_t^k)_A - (\mathbf{i}_t^k)_I \end{aligned}$$

(3-1-6) 计算属于配电网中从输电网输入的功率子区间 $[\alpha_t^{k,u-1}, \alpha_t^{k,u}]$ 的配电网局部成本

函数 $Q_t^{k,u}$ ，该函数表示为：

$$Q_t^{k,u}(p_t^{b,k}) = \min \frac{1}{2} (\mathbf{x}_t^{\text{dist},k})^T \mathbf{Q}_t^k (\mathbf{x}_t^{\text{dist},k})$$

上式中：

$$\mathbf{x}_t^{\text{dist},k} = -(\mathbf{Q}_t^k)^{-1} (\mathbf{G}_t^k)^T \left[(\mathbf{G}_t^k)_A (\mathbf{Q}_t^k)^{-1} (\mathbf{G}_t^k)_A^T \right]^{-1} \left((\mathbf{h}_t^k)_A p_t^{b,k} - (\mathbf{i}_t^k)_A \right)$$

- 5 (3-1-7) 将上述步骤 (3-1-5) 计算得到的配电网中从输电网输入的功率子区间上界 $\alpha_t^{k,u}$ 与上述步骤 (3-1-2) 计算得到的配电网中从输电网输入的功率上界 $ub_t^{b,k}$ 进行比较，若 $\alpha_t^{k,u} = ub_t^{b,k}$ ，则将生成的配电网中从输电网输入的功率子区间与每个子区间的配电网局部成本函数传给输电网，并进行步骤 (3-2)，若 $\alpha_t^{k,u} < ub_t^{b,k}$ ，则将 u 增加 1，返回步骤 (3-1-4)；

- 10 (3-2) 输电网根据上述步骤 (3-1) 的配电网在每个调度时段中从输电网输入的功率子区间，计算得到输电网的调度策略；

(3-2-1) 初始化时，设定求解步数 v 初始化为 1，求解下述优化问题，并将优化问题的最优解记为 $(\mathbf{x}_v^{\text{trans}}, \mathbf{p}_v^b)$ ，其中向量 $\mathbf{p}_v^b$ 由所有配电网在每一个调度时段的注入功率 $p_t^{b,k}$ 组成，向量 $\mathbf{x}_v^{\text{trans}}$ 对应下述优化问题中向量 $\mathbf{x}^{\text{trans}}$ 在最优解处的取值：

$$\begin{aligned} \min C^{\text{trans}}(\mathbf{x}^{\text{trans}}) + \sum_{t \in T} \sum_{k \in \text{DIST}} CBL_t^k \\ \text{满足: } \mathbf{D}\mathbf{x}^{\text{trans}} + \sum_{t \in T} \sum_{k \in \text{DIST}} \mathbf{e}_t^k p_t^{b,k} \leq \mathbf{f} \\ CBL_t^k \geq \delta_t^{k,u} p_t^{b,k} + \varepsilon_t^{k,u}, \forall u = 1, 2, \dots, n_t^k, \forall t \in T, \forall k \in \text{DIST} \end{aligned}$$

- 15 上式中， CBL_t^k 是中间变量，物理含义为线性化后的配电网子区间局部最优成本， n_t^k 代表配电网 k 在动态调度时刻 t 的子区间数目， $\delta_t^{k,u}$ 与 $\varepsilon_t^{k,u}$ 的定义如下式：

$$\begin{aligned} \delta_t^{k,u} &= (Q_t^{k,u}(\alpha_t^{k,u}) - Q_t^{k,u}(\alpha_t^{k,u-1})) / (\alpha_t^{k,u} - \alpha_t^{k,u-1}), \\ \varepsilon_t^{k,u} &= Q_t^{k,u}(\alpha_t^{k,u}) - \delta_t^{k,u} \alpha_t^{k,u}, \forall u = 1, 2, \dots, n_t^k \end{aligned}$$

上式中， $Q_t^{k,u}$ 为步骤 (3-1-6) 生成的配电网局部成本函数， $\alpha_t^{k,u}$ 为配电网中从输电网输入的功率子区间的边界；

- 20 (3-2-2) 从上述步骤 (3-1-6) 的配电网中从输电网输入的功率子区间 $[\alpha_t^{k,u-1}, \alpha_t^{k,u}]$ 中，找到包含上述最优解 $(\mathbf{x}_v^{\text{trans}}, \mathbf{p}_v^b)$ 的配电网子区间，将所有包含上述最优解 $(\mathbf{x}_v^{\text{trans}}, \mathbf{p}_v^b)$ 的配电网

子区间构成一个集合，记作 C_v ；

(3-2-3) 利用下式，求解最优解 $(\hat{\mathbf{x}}_v^{\text{trans}}, \hat{\mathbf{p}}_v^{\text{b}})$ ：

$$\min C^{\text{trans}}(\mathbf{x}^{\text{trans}}) + CB_v(\mathbf{p}^{\text{b}})$$

$$\text{满足: } \mathbf{D}\mathbf{x}^{\text{trans}} + \mathbf{E}\mathbf{p}^{\text{b}} \leq \mathbf{f}$$

$$\mathbf{p}^{\text{b}} \in C_v$$

上式中， $\mathbf{E}\mathbf{p}^{\text{b}} = \sum_{t \in T} \sum_{k \in \text{DIST}} \mathbf{e}_t^k p_t^{b,k}$ ， $CB_v(\mathbf{p}^{\text{b}})$ 是每个配电网在每个调度时段内与上述集合 C_v

5 相对应的局部成本函数 $Q_t^{k,u}$ 的加和；

(3-2-4) 根据上述步骤 (3-2-3) 的最优解 $(\hat{\mathbf{x}}_v^{\text{trans}}, \hat{\mathbf{p}}_v^{\text{b}})$ ，得到输配电网成本函数的下降方向，根据下降方向得到输配电网成本下降量的目标函数：

$$\min_{(\Delta \mathbf{x}^{\text{trans}}, \Delta \mathbf{p}^{\text{b}})} \nabla C^{\text{trans}}(\hat{\mathbf{x}}_v^{\text{trans}}) \cdot \Delta \mathbf{x}^{\text{trans}} + \nabla CB_v(\hat{\mathbf{p}}_v^{\text{b}}) \cdot \Delta \mathbf{p}^{\text{b}}$$

$$\text{满足: } \mathbf{D} \cdot (\hat{\mathbf{x}}_v^{\text{trans}} + \Delta \mathbf{x}^{\text{trans}}) + \mathbf{E} \cdot (\hat{\mathbf{p}}_v^{\text{b}} + \Delta \mathbf{p}^{\text{b}}) \leq \mathbf{f}$$

$$\|\Delta \mathbf{x}^{\text{trans}}\|_{\infty} \leq e, \|\Delta \mathbf{p}^{\text{b}}\|_{\infty} \leq e$$

式中， $(\Delta \mathbf{x}^{\text{trans}}, \Delta \mathbf{p}^{\text{b}})$ 为下降方向， $\nabla C^{\text{trans}}(\hat{\mathbf{x}}_v^{\text{trans}})$ 为函数 C^{trans} 在 $\hat{\mathbf{x}}_v^{\text{trans}}$ 的梯度， $\nabla CB_v(\hat{\mathbf{p}}_v^{\text{b}})$

10 为函数 CB_v 在 $\hat{\mathbf{p}}_v^{\text{b}}$ 的梯度， e 为一个足够小的正数，取值为 1×10^{-3} ；

对输配电网成本下降量的目标函数进行判断，若目标函数值大于或等于 0，则得到输配电网成本最优解 $(\hat{\mathbf{x}}^{\text{trans}}, \hat{\mathbf{p}}^{\text{b}})$ ，进行步骤 (3-3)，若目标函数值小于 0，根据下式计算

$(\mathbf{x}_{v+1}^{\text{trans}}, \mathbf{p}_{v+1}^{\text{b}})$ ：

$$(\mathbf{x}_{v+1}^{\text{trans}}, \mathbf{p}_{v+1}^{\text{b}}) = (\hat{\mathbf{x}}_v^{\text{trans}} + \Delta \mathbf{x}_v^{\text{trans}}, \hat{\mathbf{p}}_v^{\text{b}} + \Delta \mathbf{p}_v^{\text{b}})$$

15 将 v 增加 1，返回步骤 (3-2-2)；

(3-3) 每个配电网从上述步骤 (3-2-4) 输电网成本最优解 $(\hat{\mathbf{x}}^{\text{trans}}, \hat{\mathbf{p}}^{\text{b}})$ 中的向量 $\hat{\mathbf{p}}_v^{\text{b}}$ ，得到配电网各自调度时段的分量 $p_t^{b,k}$ ，分量 $p_t^{b,k}$ ，利用下式，计算得到配电网模型变量 $\mathbf{x}_t^{\text{dist},k}$ ：

$$\min \frac{1}{2} (\mathbf{x}_t^{\text{dist},k})^T \mathbf{Q}_t^k (\mathbf{x}_t^{\text{dist},k})$$

$$s.t. \mathbf{G}_t^k \mathbf{x}_t^{\text{dist},k} + \mathbf{h}_t^k p_t^{b,k} \leq \mathbf{i}_t^k$$

(4) 输电网和配电网分别将步骤 (3-2-4)、步骤 (3-3) 计算得到的最优解 $\hat{\mathbf{x}}^{\text{trans}}$ 、 $\mathbf{x}_t^{\text{dist},k}$

20 中的调度计划分量下发至所管辖的各个电厂，各个电厂依据调度计划对发电机组采用自动控制方法追踪执行，实现输配电网非迭代的分解协调动态调度。

权利要求书

1、一种输电网非迭代的分解协调动态调度方法，其特征在于该方法包括以下步骤：

(1) 建立一个输电网协调的动态调度模型，该模型由目标函数和约束条件构成，包
括：

(1-1) 动态调度模型的目标函数：

以输电网和配电网的总发电成本为动态调度的目标函数为：

$$\min \sum_{t \in T} \sum_{i \in G^{trans}} C_i^{trans} (pg_{i,t}^{trans}) + \sum_{t \in T} \sum_{k \in DIST} \sum_{i \in G^{dist,k}} C_i^{dist,k} (pg_{i,t}^{dist,k})$$

上式中， i 为输电网或配电网中的任意节点， T 代表动态调度时刻集合， G 代表输电网
或配电网中发电机组所在节点集合， $DIST$ 代表配电网编号集合， $pg_{i,t}$ 代表输电网或配电网
中连接节点 i 的发电机组在动态调度时刻 t 的有功功率，上标 $trans$ 代表输电网，上标 $dist,k$ 代表编
号为 k 的配电网，函数 $C_i(\bullet)$ 代表连接节点 i 的发电机组的发电成本函数，该成本函数用二次
函数表示为：

$$C_i (pg_{i,t}) = a_{0,i} + a_{1,i} pg_{i,t} + a_{2,i} pg_{i,t}^2$$

上式中， $a_{0,i}$ 、 $a_{1,i}$ 和 $a_{2,i}$ 分别代表连接节点 i 的发电机组的发电成本常数项系数、一次
项系数和二次项系数，常数项系数、一次项系数和二次项系数为发电机组固有参数；

(1-2) 动态调度模型的约束条件，包括：

(1-2-1) 输电网模型约束条件，

其中的有功功率平衡约束条件为：

$$\sum_{i \in G^{trans}} pg_{i,t}^{trans} = \sum_{i \in B^{trans}} pb_{i,t}^{trans} + \sum_{i \in D^{trans}} PD_{i,t}^{trans}, \forall t \in T$$

上式中， B 代表输电网中的输电网与配电网相互连接的边界节点集合， $pb_{i,t}^{trans}$ 代表在动
态调度时刻 t ，输电网从边界节点 i 传送到配电网的有功功率， D 代表输电网或配电网中负
荷节点集合， $PD_{i,t}$ 代表在动态调度时刻 t 连接节点 i 的负荷预测值；

其中的输电网中线路传输容量的约束条件为：

$$\begin{aligned} -PL_n^{trans} &\leq \sum_{i \in G^{trans}} SF_{n-i}^{trans} pg_{i,t}^{trans} - \sum_{i \in B^{trans}} SF_{n-i}^{trans} pb_{i,t}^{trans} \\ &\quad - \sum_{i \in D^{trans}} SF_{n-i}^{trans} PD_{i,t}^{trans} \leq PL_n^{trans}, \forall n \in L^{trans}, \forall t \in T \end{aligned}$$

上式中， n 为线路编号， PL_n 表示输电网中任意线路 n 的传输容量， SF_{n-i} 代表节点 i 到

线路 n 的转移分布因子, 转移分布因子为电网拓扑参数, 从电网调度中心获取, L 是输电网中所有线路编号的集合;

其中的旋转备用约束条件为:

$$\begin{aligned}
 0 &\leq ru_{i,t}^{trans} \leq RU_i^{trans} \Delta t, ru_{i,t}^{trans} \leq \overline{PG}_i^{trans} - pg_{i,t}^{trans}, \forall i \in G^{trans}, \forall t \in T \\
 0 &\leq rd_{i,t}^{trans} \leq RD_i^{trans} \Delta t, rd_{i,t}^{trans} \leq pg_{i,t}^{trans} - \underline{PG}_i^{trans}, \forall i \in G^{trans}, \forall t \in T \\
 \sum_{i \in G^{trans}} ru_{i,t}^{trans} &\geq SRU_t^{trans}, \sum_{i \in G^{trans}} rd_{i,t}^{trans} \geq SRD_t^{trans}, \forall t \in T
 \end{aligned}$$

上式中, $ru_{i,t}$ 和 $rd_{i,t}$ 分别为在动态调度时刻 t , 连接节点 i 的发电机组向上旋转备用容量和向下旋转备用容量, RU_i 和 RD_i 分别为连接节点 i 的发电机组向上爬坡速率和向下爬坡速率, Δt 为动态调度的时间间隔, 时间间隔的取值由电力调度需求确定, $\overline{PG}_i$ 和 $\underline{PG}_i$ 分别为连接节点 i 的发电机组的有功功率上限和有功功率下限, SRU_t 和 SRD_t 分别为输电网或配电网的向上旋转备用的容量需求和向下旋转备用的容量需求;

其中的输电网中发电机组的爬坡约束条件为:

$$-RD_i^{trans} \Delta t \leq pg_{i,t+1}^{trans} - pg_{i,t}^{trans} \leq RU_i^{trans} \Delta t, \forall i \in G^{trans}, \forall t \in T$$

其中的输电网中发电机组的有功功率约束条件为:

$$\underline{PG}_i^{trans} \leq pg_{i,t}^{trans} \leq \overline{PG}_i^{trans}, \forall i \in G^{trans}, \forall t \in T;$$

(1-2-2) 配电网模型约束条件:

其中的配电网潮流约束条件为:

$$\sum_{i:i \rightarrow j} (p_{i \rightarrow j,t}^{dist,k} - l_{i \rightarrow j,t}^{dist,k}) + p_{j,t}^{dist,k} = \sum_{m:j \rightarrow m} p_{j \rightarrow m,t}^{dist,k}, \forall j \in N^{dist,k}, \forall t \in T$$

上式中, $i:i \rightarrow j$ 表示末端节点为节点 j 的支路的首端节点集合, $p_{i \rightarrow j,t}$ 表示配电网中, 节点 i 向节点 j 的有功功率潮流, $l_{i \rightarrow j,t}$ 表示配电网中节点 i 向节点 j 的有功功率损耗, $p_{j,t}^{dist,k}$ 表示配电网中节点 j 的有功功率输入, $N^{dist,k}$ 表示配电网节点编号集合, 节点 j 的有功功率输入 $p_{j,t}^{dist,k}$ 和有功功率损耗 $l_{i \rightarrow j,t}$ 分别通过下面两式计算:

$$\begin{aligned}
 p_{j,t}^{dist,k} &= \begin{cases} pg_{j,t}^{dist,k} - PD_{j,t}^{dist,k} + pb_t^{dist,k}, & j \text{ 连接输电网} \\ pg_{j,t}^{dist,k} - PD_{j,t}^{dist,k}, & j \text{ 不连接输电网} \end{cases}, \forall j \in N^{dist,k}, \forall t \in T \\
 l_{i \rightarrow j,t}^{dist,k} &= \left[\left(\hat{P}_{i \rightarrow j,t}^{dist,k} \right)^2 + \left(\hat{Q}_{i \rightarrow j,t}^{dist,k} \right)^2 \right] R_{i \rightarrow j}^{dist,k} / \left(\hat{V}_{i,t}^{dist,k} \right)^2 \\
 &\quad + 2 \left(p_{i \rightarrow j,t}^{dist,k} - \hat{P}_{i \rightarrow j,t}^{dist,k} \right) \hat{P}_{i \rightarrow j,t}^{dist,k} R_{i \rightarrow j}^{dist,k} / \left(\hat{V}_{i,t}^{dist,k} \right)^2, \forall (i \rightarrow j) \in L^{dist,k}, \forall t \in T
 \end{aligned}$$

上式中, $pb_t^{dist,k}$ 为输电网向配电网 k 在动态调度时刻 t 的传输功率, $\hat{P}_{i \rightarrow j,t}$ 和 $\hat{Q}_{i \rightarrow j,t}$ 分别表示配电网中从节点 $i \rightarrow$ 节点 j 线路上的有功功率潮流展开点和无功功率潮流展开点, $\hat{V}_{i,t}$ 表示节点 i 的电压展开点, 上述各展开点从电网调度中心的历史相近负荷水平下线路对应的运行数据中选取, $R_{i \rightarrow j}$ 表示线路 $i \rightarrow j$ 的电阻;

5 其中的配电网线路传输容量约束条件为:

$$-PL_{i \rightarrow j}^{dist,k} \leq p_{i \rightarrow j,t}^{dist,k} \leq PL_{i \rightarrow j}^{dist,k}, \forall (i \rightarrow j) \in L^{dist,k}, \forall t \in T$$

上式中, $PL_{i \rightarrow j}$ 表示配电网中线路 $i \rightarrow j$ 的传输容量;

其中的配电网中发电机组有功功率约束条件为:

$$\underline{PG}_i^{dist,k} \leq pg_{i,t}^{dist,k} \leq \overline{PG}_i^{dist,k}, \forall i \in G^{dist,k}, \forall t \in T$$

10 (1-2-3) 输电网与配电网模型连接的边界约束条件:

边界约束条件即在每个调度时段输电网向配电网传输的有功功率与配电网接收的有功功率之间的平衡, 表示为:

$$pb_{I(k),t}^{trans} = pb_t^{dist,k}, \forall k \in DIST, \forall t \in T$$

上式中, $I(k)$ 表示输电网中与配电网 k 相连的节点;

15 (2) 将上述步骤 (1) 建立的输配电网协调的动态调度模型转化为矩阵形式, 将输配电网协调的动态调度模型中的输电网模型变量记为向量 $\mathbf{x}^{trans}$, 配电网 k 在动态调度时刻 t 的变量记为向量 $\mathbf{x}_t^{dist,k}$, 则输配电网协调的动态调度模型的矩阵形式如下:

$$\min C^{trans}(\mathbf{x}^{trans}) + \sum_{t \in T} \sum_{k \in DIST} C_t^{dist,k}(\mathbf{x}_t^{dist,k})$$

满足:

$$\mathbf{x}^{trans} \in X^{trans}$$

$$\mathbf{x}_t^{dist,k} \in X_t^{dist,k}, \forall k \in DIST, \forall t \in T$$

$$\mathbf{A}_t^k \mathbf{x}^{trans} + \mathbf{B}_t^k \mathbf{x}_t^{dist,k} \leq \mathbf{c}_t^k, \forall k \in DIST, \forall t \in T$$

上式中, 函数 $C^{trans}(\cdot)$ 表示输电网的目标函数, 函数 $C_t^{dist,k}(\cdot)$ 表示配电网 k 在动态调度时刻 t 的目标函数, X^{trans} 和 $X_t^{dist,k}$ 分别表示输电网和配电网 k 在动态调度时刻 t 的约束集合, $\mathbf{A}_t^k \mathbf{x}^{trans} + \mathbf{B}_t^k \mathbf{x}_t^{dist,k} \leq \mathbf{c}_t^k$ 表示边界约束条件, 其中的 $\mathbf{A}_t^k$ 、 $\mathbf{B}_t^k$ 、 $\mathbf{c}_t^k$ 分别为配电网 k 在动态调度时刻 t 与输电网边界条件中的输电网变量系数、配电网变量系数和常量系数, 由上述步骤 (1-2-3) 中的约束系数中提取得到, 提取方法为: 步骤 (1-2-3) 中的约束在

$\mathbf{A}_t^k \mathbf{x}_t^{\text{trans}} + \mathbf{B}_t^k \mathbf{x}_t^{\text{dist},k} \leq \mathbf{c}_t^k$ 中对应 2 行, $\mathbf{A}_t^k$ 中与 $pb_{l(k),t}^{\text{trans}}$ 相对应的列在两行中分别为 1 和 -1, 其余为 0, $\mathbf{B}_t^k$ 中与 $pb_t^{\text{dist},k}$ 相对应的列在两行中分别为 -1 和 1, 其余为 0, $\mathbf{c}_t^k$ 为 0, $DIST$ 代表配电网编号集合, T 代表调度时段集合;

(3) 求解上述步骤 (2) 得到的矩阵形式的输配电网协调的动态调度模型, 具体步骤如下:

(3-1) 在配电网侧, 由每个配电网独立求解配电网的成本函数, 步骤如下:

(3-1-1) 将配电网单时段调度问题表示为以下优化问题:

$$\min \frac{1}{2} (\mathbf{x}_t^{\text{dist},k})^T \mathbf{Q}_t^k (\mathbf{x}_t^{\text{dist},k})$$

$$\text{满足: } \mathbf{G}_t^k \mathbf{x}_t^{\text{dist},k} + \mathbf{h}_t^k p_t^{b,k} \leq \mathbf{i}_t^k$$

上式中, $\mathbf{Q}_t^k$ 为步骤 (1-1) 中的目标函数中配电网项 $\sum_{t \in T} \sum_{k \in DIST} \sum_{i \in G^{\text{dist},k}} c_i^{\text{dist},k} (pg_{i,t}^{\text{dist},k})$ 的二次系数矩阵, $\mathbf{G}_t^k \mathbf{x}_t^{\text{dist},k} + \mathbf{h}_t^k p_t^{b,k} \leq \mathbf{i}_t^k$ 表示配电网 k 在动态调度时刻 t 的约束条件以及配电网 k 和输电网的边界约束条件, 即步骤 (1-2-2) - (1-2-3) 中的约束条件, 其中 $\mathbf{G}_t^k$ 为配电网 k 在动态调度时刻 t 的变量的系数矩阵, $\mathbf{h}_t^k$ 配电网 k 在动态调度时刻 t 从输电网的输入功率变量的系数矩阵, $\mathbf{i}_t^k$ 为约束条件中的常数项;

(3-1-2) 计算配电网各个时段内对从输电网输入的功率的需求范围, 其中每个时段对从输电网输入的功率的需求下界为下面优化问题中 $p_t^{b,k}$ 的解:

$$\min p_t^{b,k}$$

$$\text{满足: } \mathbf{G}_t^k \mathbf{x}_t^{\text{dist},k} + \mathbf{h}_t^k p_t^{b,k} \leq \mathbf{i}_t^k$$

每个时段对从输电网输入的功率的需求上界为下面优化问题中 $p_t^{b,k}$ 的解:

$$\max p_t^{b,k}$$

$$\text{满足: } \mathbf{G}_t^k \mathbf{x}_t^{\text{dist},k} + \mathbf{h}_t^k p_t^{b,k} \leq \mathbf{i}_t^k$$

求解上述优化问题, 计算得到配电网在各个时段内对从输电网输入的功率的下界和上界, 分别记为 $lb_t^{b,k}$ 和 $ub_t^{b,k}$;

(3-1-3) 初始化时, 设配电网中成本函数计算次数 $u=1$, 并设配电网中从输电网输入的功率子区间下界 $\alpha_t^{k,u-1} = lb_t^{b,k}$;

(3-1-4) 取微小偏移量 $e = 1 \times 10^{-3}$, 令 $p_t^{b,k} = \alpha_t^{k,u-1} + e$, 将 $p_t^{b,k}$ 代入上述步骤 (3-1-1)

的优化问题中，对步骤（3-1-1）的优化问题中的约束条件进行判断，将起作用的约束，即最优解处不等式 $\mathbf{G}_t^k \mathbf{x}_t^{\text{dist},k} + \mathbf{h}_t^k p_t^{b,k} \leq \mathbf{i}_t^k$ 中两侧相等的行用下标 $(\)_A$ 表示，将不起作用约束，即最优解处不等式 $\mathbf{G}_t^k \mathbf{x}_t^{\text{dist},k} + \mathbf{h}_t^k p_t^{b,k} \leq \mathbf{i}_t^k$ 中两侧不相等的行用下标 $(\)_I$ 表示；

（3-1-5）计算配电网中从输电网输入的功率子区间上界 $\alpha_t^{k,u}$ ，该上界通过求解下面的

5 优化问题得到，其最优目标函数值为配电网中从输电网输入的功率子区间上界 $\alpha_t^{k,u}$ ：

$$\max p_t^{b,k}$$

满足：

$$\begin{aligned} & \left((\mathbf{G}_t^k)_A (\mathbf{Q}_t^k)^{-1} (\mathbf{G}_t^k)_A^T \right)^{-1} (\mathbf{h}_t^k)_A p_t^{b,k} \geq \left((\mathbf{G}_t^k)_A (\mathbf{Q}_t^k)^{-1} (\mathbf{G}_t^k)_A^T \right)^{-1} (\mathbf{i}_t^k)_A \\ & \left[(\mathbf{G}_t^k)_I (\mathbf{Q}_t^k)^{-1} (\mathbf{G}_t^k)_A^T \left((\mathbf{G}_t^k)_A (\mathbf{Q}_t^k)^{-1} (\mathbf{G}_t^k)_A^T \right)^{-1} (\mathbf{h}_t^k)_A - (\mathbf{h}_t^k)_I \right] p_t^{b,k} \geq \\ & (\mathbf{G}_t^k)_I (\mathbf{Q}_t^k)^{-1} (\mathbf{G}_t^k)_A^T \left[(\mathbf{G}_t^k)_A (\mathbf{Q}_t^k)^{-1} (\mathbf{G}_t^k)_A^T \right]^{-1} (\mathbf{i}_t^k)_A - (\mathbf{i}_t^k)_I \end{aligned}$$

（3-1-6）计算属于配电网中从输电网输入的功率子区间 $[\alpha_t^{k,u-1}, \alpha_t^{k,u}]$ 的配电网局部成本函数 $Q_t^{k,u}$ ，该函数表示为：

$$Q_t^{k,u}(p_t^{b,k}) = \min \frac{1}{2} (\mathbf{x}_t^{\text{dist},k})^T \mathbf{Q}_t^k (\mathbf{x}_t^{\text{dist},k})$$

10 上式中：

$$\mathbf{x}_t^{\text{dist},k} = -(\mathbf{Q}_t^k)^{-1} (\mathbf{G}_t^k)_A^T \left[(\mathbf{G}_t^k)_A (\mathbf{Q}_t^k)^{-1} (\mathbf{G}_t^k)_A^T \right]^{-1} \left((\mathbf{h}_t^k)_A p_t^{b,k} - (\mathbf{i}_t^k)_A \right)$$

（3-1-7）将上述步骤（3-1-5）计算得到的配电网中从输电网输入的功率子区间上界 $\alpha_t^{k,u}$ 与上述步骤（3-1-2）计算得到的配电网中从输电网输入的功率上界 $ub_t^{b,k}$ 进行比较，若 $\alpha_t^{k,u} = ub_t^{b,k}$ ，则将生成的配电网中从输电网输入的功率子区间与每个子区间的配电网局部成本函

15 数传给输电网，并进行步骤（3-2），若 $\alpha_t^{k,u} < ub_t^{b,k}$ ，则将 u 增加 1，返回步骤（3-1-4）；

（3-2）输电网根据上述步骤（3-1）的配电网在每个调度时段中从输电网输入的功率子区间，计算得到输电网的调度策略；

（3-2-1）初始化时，设定求解步数 v 初始化为 1，求解下述优化问题，并将优化问题的最优解记为 $(\mathbf{x}_v^{\text{trans}}, \mathbf{p}_v^b)$ ，其中向量 $\mathbf{p}_v^b$ 由所有配电网在每一个调度时段的注入功率 $p_t^{b,k}$ 组成，

20 向量 $\mathbf{x}_v^{\text{trans}}$ 对应下述优化问题中向量 $\mathbf{x}^{\text{trans}}$ 在最优解处的取值：

$$\begin{aligned} \min C^{trans}(\mathbf{x}^{trans}) + \sum_{t \in T} \sum_{k \in DIST} CBL_t^k \\ \text{满足: } \mathbf{D}\mathbf{x}^{trans} + \sum_{t \in T} \sum_{k \in DIST} \mathbf{e}_t^k p_t^{b,k} \leq \mathbf{f} \\ CBL_t^k \geq \delta_t^{k,u} p_t^{b,k} + \varepsilon_t^{k,u}, \forall u = 1, 2, \dots, n_t^k, \forall t \in T, \forall k \in DIST \end{aligned}$$

上式中, CBL_t^k 是中间变量, 物理含义为线性化后的配电网子区间局部最优成本, n_t^k 代表配电网 k 在动态调度时刻 t 的子区间数目, $\delta_t^{k,u}$ 与 $\varepsilon_t^{k,u}$ 的定义如下式:

$$\begin{aligned} \delta_t^{k,u} &= (Q_t^{k,u}(\alpha_t^{k,u}) - Q_t^{k,u}(\alpha_t^{k,u-1})) / (\alpha_t^{k,u} - \alpha_t^{k,u-1}), \\ \varepsilon_t^{k,u} &= Q_t^{k,u}(\alpha_t^{k,u}) - \delta_t^{k,u} \alpha_t^{k,u}, \forall u = 1, 2, \dots, n_t^k \end{aligned}$$

- 5 上式中, $Q_t^{k,u}$ 为步骤 (3-1-6) 生成的配电网局部成本函数, $\alpha_t^{k,u}$ 为配电网中从输电网输入的功率子区间的边界;

(3-2-2) 从上述步骤 (3-1-6) 的配电网中从输电网输入的功率子区间 $[\alpha_t^{k,u-1}, \alpha_t^{k,u}]$ 中, 找到包含上述最优解 $(\mathbf{x}_v^{trans}, \mathbf{p}_v^b)$ 的配电网子区间, 将所有包含上述最优解 $(\mathbf{x}_v^{trans}, \mathbf{p}_v^b)$ 的配电网子区间构成一个集合, 记作 C_v ;

- 10 (3-2-3) 利用下式, 求解最优解 $(\hat{\mathbf{x}}_v^{trans}, \hat{\mathbf{p}}_v^b)$:

$$\begin{aligned} \min C^{trans}(\mathbf{x}^{trans}) + CB_v(\mathbf{p}^b) \\ \text{满足: } \mathbf{D}\mathbf{x}^{trans} + \mathbf{E}\mathbf{p}^b \leq \mathbf{f} \\ \mathbf{p}^b \in C_v \end{aligned}$$

上式中, $\mathbf{E}\mathbf{p}^b = \sum_{t \in T} \sum_{k \in DIST} \mathbf{e}_t^k p_t^{b,k}$, $CB_v(\mathbf{p}^b)$ 是每个配电网在每个调度时段内与上述集合 C_v

相对应的局部成本函数 $Q_t^{k,u}$ 的加和;

(3-2-4) 根据上述步骤 (3-2-3) 的最优解 $(\hat{\mathbf{x}}_v^{trans}, \hat{\mathbf{p}}_v^b)$, 得到输配电网成本函数的下降方

- 15 向, 根据下降方向得到输配电网成本下降量的目标函数:

$$\begin{aligned} \min_{(\Delta \mathbf{x}^{trans}, \Delta \mathbf{p}^b)} \nabla C^{trans}(\hat{\mathbf{x}}_v^{trans}) \cdot \Delta \mathbf{x}^{trans} + \nabla CB_v(\hat{\mathbf{p}}_v^b) \cdot \Delta \mathbf{p}^b \\ \text{满足: } \mathbf{D} \cdot (\hat{\mathbf{x}}_v^{trans} + \Delta \mathbf{x}^{trans}) + \mathbf{E} \cdot (\hat{\mathbf{p}}_v^b + \Delta \mathbf{p}^b) \leq \mathbf{f} \\ \|\Delta \mathbf{x}^{trans}\|_{\infty} \leq e, \|\Delta \mathbf{p}^b\|_{\infty} \leq e \end{aligned}$$

式中, $(\Delta \mathbf{x}^{trans}, \Delta \mathbf{p}^b)$ 为下降方向, $\nabla C^{trans}(\hat{\mathbf{x}}_v^{trans})$ 为函数 C^{trans} 在 $\hat{\mathbf{x}}_v^{trans}$ 的梯度, $\nabla CB_v(\hat{\mathbf{p}}_v^b)$ 为函数 CB_v 在 $\hat{\mathbf{p}}_v^b$ 的梯度, e 为一个足够小的正数, 取值为 1×10^{-3} ;

对输配电网成本下降量的目标函数进行判断, 若目标函数值大于或等于 0, 则得到输

配电网成本最优解 $(\hat{\mathbf{x}}^{\text{trans}}, \hat{\mathbf{p}}^{\text{b}})$ ，进行步骤（3-3），若目标函数值小于 0，根据下式计算

$(\mathbf{x}_{v+1}^{\text{trans}}, \mathbf{p}_{v+1}^{\text{b}})$ ：

$$(\mathbf{x}_{v+1}^{\text{trans}}, \mathbf{p}_{v+1}^{\text{b}}) = (\hat{\mathbf{x}}_v^{\text{trans}} + \Delta \mathbf{x}_v^{\text{trans}}, \hat{\mathbf{p}}_v^{\text{b}} + \Delta \mathbf{p}_v^{\text{b}})$$

将 v 增加 1，返回步骤（3-2-2）；

- 5 （3-3）每个配电网从上述步骤（3-2-4）输电网成本最优解 $(\hat{\mathbf{x}}^{\text{trans}}, \hat{\mathbf{p}}^{\text{b}})$ 中的向量 $\hat{\mathbf{p}}_v^{\text{b}}$ ，得到配电网各自调度时段的分量 $p_t^{b,k}$ ，分量 $p_t^{b,k}$ ，利用下式，计算得到配电网模型变量 $\mathbf{x}_t^{\text{dist},k}$ ：

$$\begin{aligned} & \min \frac{1}{2} (\mathbf{x}_t^{\text{dist},k})^T \mathbf{Q}_t^k (\mathbf{x}_t^{\text{dist},k}) \\ & s.t. \quad \mathbf{G}_t^k \mathbf{x}_t^{\text{dist},k} + \mathbf{h}_t^k p_t^{b,k} \leq \mathbf{i}_t^k \end{aligned}$$

（4）输电网和配电网分别将步骤（3-2-4）、步骤（3-3）计算得到的最优解 $\hat{\mathbf{x}}^{\text{trans}}$ 、 $\mathbf{x}_t^{\text{dist},k}$

中的调度计划分量下发至所管辖的各个电厂，各个电厂依据调度计划对发电机组采用自动

- 10 控制方法追踪执行，实现输配电网非迭代的分解协调动态调度。

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2018/113461

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H02J 3/46(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H02J

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT, CNKI, WPI, EPODOC: 输电, 配电, 调度, 模型, 建模, 约束, 优化, 成本, 电厂, 发电机, 功率, 区间, 上界, 上限, 下界, 下限, 边界, 范围, power, energy, electric, distribution, transmission, system, network, grid, schedul+, model, constraint?, constrained, restriction?, optimiz+, cost+

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 107069706 A (TSINGHUA UNIVERSITY) 18 August 2017 (2017-08-18) claim 1	1
A	CN 106953358 A (STATE GRID JIANGXI ELECTRIC POWER CO. ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE ET AL.) 14 July 2017 (2017-07-14) entire document	1
A	WO 2016074187 A1 (THE UNIVERSITY OF HONG KONG) 19 May 2016 (2016-05-19) entire document	1
A	于立杰等 (YU, Lijie et al.). "柔性直流配电网优化调度研究 (Non-official translation: Study on Optimal Dispatching of Flexible DC Distribution Networks)" <i>精密制造与自动化 (Precise Manufacturing & Automation)</i> , No. no. 1, 25 February 2018 (2018-02-25), entire document	1



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

27 February 2019

Date of mailing of the international search report

27 March 2019

Name and mailing address of the ISA/CN

State Intellectual Property Office of the P. R. China
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2018/113461

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	107069706	A	18 August 2017	US	2018241209	A1	23 August 2018
CN	106953358	A	14 July 2017	None			
WO	2016074187	A1	19 May 2016	US	2017317499	A1	02 November 2017

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2018/113461

A. 主题的分类

H02J 3/46 (2006.01) i

按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号)

H02J

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用))

CNPAT, CNKI, WPI, EPDOC: 输电, 配电, 调度, 模型, 建模, 约束, 优化, 成本, 电厂, 发电机, 功率, 区间, 上界, 上限, 下界, 下限, 边界, 范围, power, energy, electric, distribution, transmission, system, network, grid, schedul+, model, constraint?, constrained, restriction?, optimiz+, cost+

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
A	CN 107069706 A (清华大学) 2017年 8月 18日 (2017 - 08 - 18) 权利要求1	1
A	CN 106953358 A (国网江西省电力公司电力科学研究院等) 2017年 7月 14日 (2017 - 07 - 14) 全文	1
A	WO 2016074187 A1 (THE UNIVERSITY OF HONG KONG) 2016年 5月 19日 (2016 - 05 - 19) 全文	1
A	于立杰等. “柔性直流配电网优化调度研究” 精密制造与自动化, 第1期, 2018年 2月 25日 (2018 - 02 - 25), 全文	1

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2019年 2月 27日

国际检索报告邮寄日期

2019年 3月 27日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局 (ISA/CN)

中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

受权官员

张枫

电话号码 86-(10)-53961628

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2018/113461

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	107069706	A	2017年 8月 18日	US	2018241209	A1	2018年 8月 23日
CN	106953358	A	2017年 7月 14日	无			
WO	2016074187	A1	2016年 5月 19日	US	2017317499	A1	2017年 11月 2日