

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.
H02J 3/00 (2006.01)



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200710176083.X

[43] 公开日 2008年4月2日

[11] 公开号 CN 101154813A

[22] 申请日 2007.10.19

[21] 申请号 200710176083.X

[71] 申请人 清华大学

地址 100084 北京市海淀区清华园

[72] 发明人 张伯明 吴文传 孙宏斌 蒋维勇

[74] 专利代理机构 北京清亦华知识产权代理事务所
代理人 廖元秋

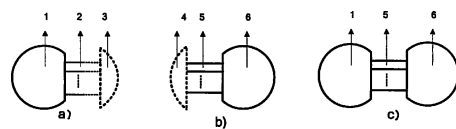
权利要求书 3 页 说明书 9 页 附图 1 页

[54] 发明名称

多区域电网潮流模型的在线合并方法

[57] 摘要

本发明涉及多区域电网潮流模型的在线合并方法，属于电力系统调度自动化领域。该方法包括：上级、下级电网调度中心根据所管辖电网实时数据，利用状态估计方法自动生成本区域内部电网模型和潮流分布，同时建立与之相连的外部电网等值模型，并通过广域网将所述下级电网模型和潮流数据发送给上级电网调度中心；将上级电网模型和各级下级电网模型通过它们之间的联络线对接，将上、下级电网模型合并成计算用的全局电网模型；利用潮流匹配方法调节下级电网模型的潮流，得到全局电网潮流模型。该方法保证合并后全局电网模型中上级电网部分的潮流不变。本发明可以保证互联电网在线安全分析和仿真计算结果的正确性，对保证电网的安全运行具有重要意义。



1、一种多区域电网潮流模型的在线合并方法，其特征在于，该方法包括以下步骤：

(1) 上级电网调度中心根据所管辖电网实时数据，利用状态估计方法自动生成本区域内部电网模型和潮流分布，同时建立与之相连的外部电网等值模型，所述内、外部模型通过两者之间实际存在的联络线相连形成上级电网模型；

(2) 下级各分区电网调度中心根据所管辖电网实时数据，利用状态估计方法自动生成本区域内部电网模型和潮流分布，同时建立与之相连的外部电网等值模型，所述内、外部模型通过两者之间实际存在的联络线相连形成下级电网模型，并通过广域网将所述下级电网模型和潮流数据发送给上级电网调度中心；

(3) 将上级电网模型和各下级电网模型通过它们之间的联络线对接，将上、下级电网模型合并成计算用的全局电网模型；

(4) 利用潮流匹配方法调节下级电网模型的潮流，使得上下级电网模型的潮流匹配，最后得到全局电网潮流模型。

2、如权利要求1所述的方法，其特征在于，所述的步骤(4)中的潮流匹配方法为：

通过节点撕裂，把上下级电网之间的联络线靠近下级电网侧的端节点定义成边界节点，并将它分裂成内外两个虚拟节点，接在下级电网侧的为下级电网边界节点，接在上级电网侧的为上级电网边界节点，从而把上级电网与下级电网隔离开；调节下级电网内部节点注入有功功率 P 和无功功率 Q 或调节下级电网内部节点注入有功功率 P 和电压幅值 V ，使得下级电网边界节点处的电压和注入功率与上级电网实时潮流上级电网边界节点处的相应量值相等，以实现两个电网潮流模型的无扰动合并。

3、如权利要求2所述的方法，其特征在于，所述调节下级电网内部节点注入有功功率 P 和无功功率 Q ，具体包括以下步骤：

(1) 把下级电网边界节点设置为 $V\theta$ 给定节点，该节点集合定义为 S ，其电压幅值 V 和电压相角 θ 设置成上级电网调度中心给出的上级电网实时潮流中上级电网边界节点的相应量值；将下级电网中其他节点设置为 PQ 节点，该 PQ 给定电量值设置为下级电网中原有潮流结果值，进行下级电网的多 $V\theta$ 节点潮流计算，得到下级电网边界节点处的注入有功功率 P_s 和无功功率 Q_s ，该值与上级电网实时潮流中上级电网边界节点的相应量值之间存在偏差 ΔP_s 和 ΔQ_s ；

(2) 根据所述 $V\theta$ 给定节点有功功率偏差量 ΔP_s ，利用下式计算下级电网内部参与有功功率调节的节点注入有功功率调节量 ΔP_M ， M 是参与有功功率调整的节点集合：

$$\Delta P_M = \tilde{D}_{MS} \Delta P_S$$

式中 \tilde{D}_{MS} 是 ΔP_M 和 ΔP_S 之间的分布因子矩阵，用下式计算

$$\tilde{D}_{MS} = \begin{cases} D_{SM}^T (D_{SM} D_{SM}^T)^{-1}, & \text{如果 } M > S \\ D_{SM}^{-T}, & \text{如果 } M = S \\ (D_{SM}^T D_{SM})^{-1} D_{SM}^T, & \text{如果 } M < S \end{cases}$$

式中， D_{SM} 是 ΔP_S 和 ΔP_M 之间的 $S \times M$ 阶无量纲灵敏度矩阵，即： $\Delta P_S = D_{SM} \Delta P_M$ ；矩阵的上标 T 表示矩阵的转置；用 ΔP_M 修正 M 集合节点的注入有功功率来减小 V θ 给定节点注入有功功率偏差 ΔP_S ；

(3) 根据所述 V θ 给定节点注入无功功率偏差量 ΔQ_S ，利用下式计算下级电网内部参与无功功率调整节点的注入无功功率调节量 ΔQ_R ，该调整节点集合为 R：

$$\Delta Q_R = \tilde{S}_{RS} \Delta Q_S$$

式中 \tilde{S}_{RS} 是 ΔQ_R 和 ΔQ_S 之间的分布因子矩阵，用下式计算

$$\tilde{S}_{RS} = \begin{cases} S_{SR}^T (S_{SR} S_{SR}^T)^{-1}, & \text{如果 } R > S \\ S_{SR}^{-T}, & \text{如果 } R = S \\ (S_{SR}^T S_{SR})^{-1} S_{SR}^T, & \text{如果 } R < S \end{cases}$$

式中 S_{SR} 是 ΔQ_S 和 ΔQ_R 之间的 $S \times R$ 阶无量纲的灵敏度矩阵，即： $\Delta Q_S = S_{SR} \Delta Q_R$ ；矩阵的上标 T 表示矩阵的转置；用 ΔQ_R 修正 R 集合节点的注入无功功率来减小 V θ 给定节点注入无功功率偏差 ΔQ_S ；

(4) 重新返回步骤 (1) - 步骤 (3)，直到下级电网边界节点处的节点注入有功功率 P 和无功功率 Q 与上级电网实时潮流中上级电网边界节点处的值相等，即偏差 ΔP_S 和 ΔQ_S 均为零；此时上级、下级两个电网潮流匹配，以实现上、下级两个电网模型无扰动合并成全局电网潮流模型。

4、如权利要求 2 所述的方法，其特征在于，所述调节下级电网潮流采用调节下级电网内部节点注入有功功率 P 和电压幅值 V，具体包括以下步骤：

(1) 把下级电网侧边界节点设置为 Q θ 给定节点，该节点集合定义为 S，其节点注入无功功率 Q 和节点电压相角 θ 设置成上级电网实时潮流中上级电网边界节点的相应值，将下级电网中需要参与电压调整的节点设置为 PV 节点，R 为该 PV 节点集合，其他节点设置为 PQ 节点，该 PQ 和 PV 给定电量值设置为下级电网中原有潮流结果值，进行下级电网的多 Q θ 节点潮流计算，得到下级电网边界节点的注入有功功率 P_S 和节点电压幅值 V_S ，该值与上级电网实时潮流中上级电网边界节点的相应量值之间存在偏差 ΔP_S 和 ΔV_S ；

(2) 根据所述 Q₀ 给定节点注入有功功率偏差量 ΔP_S ，利用下式计算下级电网内部参与有功功率调节节点的注入有功功率调节量 ΔP_M ，M 是参与有功功率调整的节点集合：

$$\Delta P_M = \tilde{D}_{MS} \Delta P_S$$

式中 \tilde{D}_{MS} 是 ΔP_M 和 ΔP_S 之间的分布因子矩阵，用下式计算

$$\tilde{D}_{MS} = \begin{cases} D_{SM}^T (D_{SM} D_{SM}^T)^{-1}, & \text{如果 } M > S \\ D_{SM}^{-T}, & \text{如果 } M = S \\ (D_{SM}^T D_{SM})^{-1} D_{SM}^T, & \text{如果 } M < S \end{cases}$$

式中， D_{SM} 是 ΔP_S 和 ΔP_M 之间的 $S \times M$ 阶无量纲灵敏度矩阵，即： $\Delta P_S = D_{SM} \Delta P_M$ ；矩阵的上标 T 表示矩阵的转置；用 ΔP_M 修正 M 集合节点的注入有功功率来减小下级电网 Q₀ 给定节点注入有功功率偏差 ΔP_S ；

(3)、根据所述 Q₀ 给定节点电压幅值偏差量 ΔV_S ，用下式计算下级电网参与电压调整的节点的电压调节量 ΔV_R ，R 为下级电网参与电压调整的节点的集合：

$$\Delta V_R = \tilde{R}_{RS} \Delta V_S$$

式中 \tilde{R}_{RS} 是 ΔV_R 和 ΔV_S 之间的灵敏度，用下式计算

$$\tilde{R}_{RS} = \begin{cases} R_{SR}^T (R_{SR} R_{SR}^T)^{-1}, & \text{如果 } R > S \\ R_{SR}^{-T}, & \text{如果 } R = S \\ (R_{SR}^T R_{SR})^{-1} R_{SR}^T, & \text{如果 } R < S \end{cases}$$

式中 R_{SR} 是 S 集合节点电压幅值变化量 ΔV_S 与 R 集合节点电压幅值调节量 ΔV_R 之间的灵敏度，即： $\Delta V_S = R_{SR} \Delta V_R$ ；矩阵的上标 T 表示矩阵的转置；用 ΔV_R 修正 R 集合节点电压幅值来减小下级电网 Q₀ 给定节点电压幅值的偏差 ΔV_S ；

(4) 重新返回步骤 (1) - 步骤 (3)，直到下级电网边界节点处的节点注入有功功率 P 和节点电压幅值 V 与上级电网实时潮流中上级电网边界节点的值相等，即偏差 ΔP_S 和 ΔV_S 均为零；此时上级、下级两个电网潮流匹配，以实现上级、下级两个电网模型无扰动合并成全局电网潮流模型。

多区域电网潮流模型的在线合并方法

技术领域

本发明属于电力系统调度自动化技术领域，涉及电力系统中多区域电网潮流模型的在线合并方法、保证合并后全局电网模型中上级电网潮流与上级电网实时状态一致的匹配潮流方法。

背景技术

现代电网是由多个区域电网互联组成的，事故对电网的影响是全局的。然而，目前电网的管理是分级、分区进行的，每个调度中心管辖的电网只是大电网的一个部分。当前电网调度中心能量管理系统（EMS）只对自己管辖区电网进行建模，并利用电力系统的实时遥测遥信量（遥测量主要包括发电机有功功率、无功功率与机端母线电压、负荷的有功功率与无功功率、线路有功功率与无功功率、变压器的有功功率与无功功率、母线的电压等；遥信量主要包括开关与刀闸的位置、变压器分接头档位等），通过实时状态估计确定电力系统的网络拓扑和电网运行状态，通过在线进行的潮流计算实时确定电网潮流分布，这样确定的电网模型和潮流分布称之为电网潮流模型。

对于一个含有 N 个节点的电网，电网潮流模型可以描述如下：

若电网中节点 i 的注入有功功率和注入无功功率为已知量，则称该节点为 PQ 节点，并有约束方程：

$$\begin{cases} P_i^{sp} = V_i \sum_{j \in j} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i^{sp} = V_i \sum_{j \in j} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases}$$

若节点 i 的注入有功功率和电压幅值为已知量，则称该节点为 PV 节点，并有约束方程：

$$\begin{cases} P_i^{sp} = V_i \sum_{j \in j} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ V_i^{sp} = V_i \end{cases}$$

若节点 i 的节点电压幅值和相角为已知量，则称该节点为 Vθ 节点，并有约束方程：

$$\begin{cases} V_i^{sp} = V_i \\ \theta_i^{sp} = \theta_i \end{cases}$$

以上公式中 P_i^{sp} ， Q_i^{sp} ， V_i^{sp} 和 θ_i^{sp} 分别是节点 i 给定的注入有功功率、注入无功功率、节点电压幅值和节点电压相角； G_{ij} ， B_{ij} 是节点导纳矩阵第 i 行 j 列元素的实部和虚部； θ_{ij} 是节点 i 和节点 j 之间的节点电压相角差； V_i ， V_j 是节点 i 和节点 j 的电压幅值。

N个节点的电网的潮流模型中，每个节点的类型是上述3类节点之一，通常只设一个V θ 节点。常规潮流计算是：根据已知以上公式中左侧的给定值，计算公式中右侧的 V_i 和 θ_i ， $i=1,2,\dots,N$ 。

对于多区域电网，每个子区域电网都可以用以上方法进行潮流计算。但是，在实时建立电网潮流模型过程中，由于不易获得自己管辖区以外电网的潮流模型，为了计及全局电网对自己管辖区电网潮流的影响，目前采用离线做好的外部电网等值模型代替其实际外部电网，这种做法无法适应外部电网的变化，导致安全分析计算精度差，给EMS的实用化带来困难。

2003年8.14美加大停电事故促使电网调度人员反思，只局限于自己管辖区电网模型这种计算模式不能满足电网在线安全分析的要求，需要在线建立全局电网潮流模型。该模型不仅应能够正确表示管辖区电网的实时状态，同时应能够正确计及非管辖区电网对管辖区电网的影响。只有在全局电网潮流模型基础上进行电网安全分析，才能有效保证在线安全分析结果的正确性，从而保障电网安全运行。

这里需要说明的是，目前管辖区电网（也称为内部电网）和非管辖区电网（也称为外部电网）之间的关系主要有列2种：横向平级关系（比如互联的两个省级电网之间的关系，其中一个省级电网进行安全分析计算时需要考虑另一个省级电网对其的影响）、纵向上下级关系（比如大区电网和该区域下属各省级电网之间的关系，由于两者建模的精细程度不同，大区电网在进行安全分析中，需要考虑该区域各省级电网的详细模型）。对以上两种情况，合并局部电网、建立全局电网潮流模型的方法是相同的。本发明的目的就是要提出一种方法在线合并多区域电网的潮流模型，同时保证合并后全局电网潮流模型中管辖区电网部分的潮流与管辖区电网实时状态一致。为了叙述方便，以下用上级电网表示管辖区电网（或称内部电网），用下级电网表示非管辖区电网（或称外部电网）。

发明内容

本发明的目的是为了解决传统EMS不能在线正确建立全局电网模型问题，也为了满足新一代EMS对建立全局电网潮流模型的新需求，提出多区域电网潮流模型的在线合并方法，在电力系统中利用当前电网调度中心之间已经建成的高速数据通信网，进行管辖区电网和非管辖区电网之间的电网模型交互，并利用匹配潮流法对非管辖区电网潮流模型进行调节，实现管辖区电网和非管辖区电网之间潮流模型的无扰动合并，保证合并后的全局电网潮流模型中管辖区电网部分的状态与其实时状态完全一致。在全局电网潮流模型基础上进行电网安全分析，可有效保证分析结果的正确性，从而保障电网安全运行。

本发明提出的多区域电网潮流模型的在线合并方法，其特征在于，该方法包括以下步骤：

- (1) 上级电网调度中心根据所管辖电网实时数据，利用状态估计方法自动生成本区域

内部电网模型和潮流分布，同时建立与之相连的外部电网等值模型，所述内、外部模型通过两者之间实际存在的联络线相连形成上级电网模型；

(2) 下级各分区电网调度中心根据所管辖电网实时数据，利用状态估计方法自动生成本区域内部电网模型和潮流分布，同时建立与之相连的外部电网等值模型，所述内、外部模型通过两者之间实际存在的联络线相连形成下级电网模型，并通过广域网将所述下级电网模型和潮流数据发送给上级电网调度中心；

(3) 将上级电网模型和各下级电网模型通过它们之间的联络线对接，将上、下级电网模型合并成计算用的全局电网模型；

(4) 利用潮流匹配方法调节下级电网模型的潮流，使得上下级电网模型的潮流匹配，最后得到全局电网潮流模型。

本发明的特点：

上级电网调度中心和下级各分区电网调度中心分别建立和维护本级别、本区域电网的潮流模型，以符合分级、分区调度的现有管理模式。下级电网调度中心需要将本辖区电网实时潮流模型发送给上级调度中心，上级调度中心收集到下级各分区电网的潮流模型后，将各下级各分区电网模型和上级电网模型合并，形成全局电网模型。在合并过程中，调整下级电网潮流，使得下级电网潮流和上级电网潮流匹配，从而保证两者电网潮流模型的无扰动合并，合并后全局电网潮流模型中上级电网部分与上级电网实时状态一致。整个过程自动完成，适合大规模互联电网的在线安全分析、调度决策和模拟仿真。

本发明的方法具有如下优点：

- 1、各级电网调度中心只需维护各自电网潮流模型，不增加维护工作量；
- 2、通过各分区电网模型的汇总和潮流匹配，自动实现多区域电网潮流模型的在线合并，合并后全局电网潮流模型中上级电网部分和实际情况一致，保证了互联电网安全分析、控制决策和模拟仿真精度，从而确保电网的安全运行。

附图说明

图1为本发明的电网潮流模型的在线合并方法示意图；其中 a)是上级电网潮流模型，b)是下级电网潮流模型，c)是合并后的全局电网潮流模型。

图2是电网模型撕裂示意图，其中 a)是撕裂前的电网，b)是撕裂后的电网。

图2中的1是下级电网的内部电网；

图2中的2是上级电网的内部电网；

图2中的3是撕裂后的边界节点。

具体实施方式

本发明提出电力系统中的多区域电网潮流模型的在线合并方法结合附图及实施例详细说明如下：

本发明的具体实现方法如图 1 和图 2 所示，包括以下步骤：

步骤一、如图 1 b) 所示，上级电网调度中心根据所管辖电网实时数据，利用状态估计方法自动生成本区域内部电网模型 6 和潮流分布，电网模型 6 和潮流分布包括电网拓扑结构，电网发电机的有功功率、无功功率或机端母线电压，电网负荷的有功功率和无功功率，电网母线电压和线路的有功功率和无功功率，以及变压器的有功功率、无功功率，变压器分接头档位等；同时建立与之相连的外部电网等值模型 4，所述内、外部模型通过两者之间实际存在的联络线 5 相连形成上级电网模型；

步骤二、如图 1 a) 所示，下级各分区电网调度中心根据所管辖电网实时数据，利用状态估计方法自动生成本区域内部电网模型 1 和潮流分布，电网模型 1 和潮流分布包括电网拓扑结构，电网发电机的有功功率、无功功率或机端母线电压，电网负荷的有功功率和无功功率，电网母线电压和线路的有功功率和无功功率，以及变压器的有功功率、无功功率，变压器分接头档位等，同时建立与之相连的外部电网等值模型 3，所述内、外部模型通过两者之间实际存在的联络线 2 相连形成下级电网模型，并通过广域网将所述下级电网模型和潮流数据发送给上级电网调度中心；

步骤三、上级电网调度中心接收上述各分区电网调度中心发来的下级电网模型和潮流数据，首先剔除各自电网模型中的外网等值模型（虚线）部分，然后，将所述上级电网模型和各下级电网模型通过它们之间的联络线 5 对接（联络线 2、5 表示同一组联络线，这里采用上级电网侧的 5），就可以将上、下级电网模型合并成计算用的全局电网模型，如图 1 c) 所示，可以看出这个全局电网模型是将图 1 a) 和图 1 b) 中模型分别去掉虚线部分区域后通过联络线对接在一起而得到的。

步骤四、利用潮流匹配方法调节下级电网模型的潮流，使得上下级电网模型的潮流匹配，最后得到全局电网潮流模型。

由于全局电网中各下级电网上传的电网潮流模型和上级电网潮流模型在时间上不一致，因此下级电网潮流模型的联络线功率和边界节点电压与上级电网相同边界节点处的相应量值存在偏差，如果不将这一偏差调整为零，两者模型就不能无扰动合并。如果合并，全局电网中上级电网部分的状态将发生变化，不满足上级电网的计算要求。本发明提出潮流匹配方法来消除这种偏差，该方法保持上级电网潮流不变，修正下级电网的潮流分布，使得各下级电网与上级电网之间的联络线有功功率和无功功率以及边界母线电压与合并前上级电网对应的量相一致，这样可实现上下级电网潮流模型的无扰动对接。对接后全局电网潮流模型中，上级电网部分的潮流不变。电力系统可在此模型上进行全局电网潮流计算得到的全局电网潮流分布，其中上级电网部分的状态与合并前上级电网实时状态完全一

致。此全局电网潮流模型即可提供给能量管理系统（EMS）进行电网在线安全分析应用，以保证电网的安全运行。

本发明的潮流匹配具体实现方法如图 2 所示，通过节点撕裂，把上下级电网之间的联络线靠近下级电网侧的端节点定义成边界节点，将它分裂成两个虚拟节点，接在下级电网侧的为下级电网边界节点，接在上级电网侧的为上级电网边界节点，从而把上级电网（如图 2 b）的 2）与下级电网（如图 2 b）的 1）隔离开；调整下级电网潮流，使得下级电网边界节点处的电压和注入功率与上级电网实时潮流在上级电网边界节点处相应量值相等，实现两个电网潮流模型的无扰动合并。

本发明调节下级电网潮流方法有两种实施方式，分别详细说明如下：

实施例 1：采用调节下级电网内部节点注入有功功率 P 和无功功率 Q，具体包括以下步骤：

(1) 把下级电网边界节点（如图 2 b）的 i, j, k）设置为 $V\theta$ 给定节点，该节点集合定义为 S，其电压幅值 V 和电压相角 θ 设置成上级电网调度中心给出的上级电网实时潮流中上级电网边界节点的相应量值（图 2 b）的 3）；将下级电网中其他节点设置为 PQ 节点，该 PQ 给定电量值设置为下级电网中原有潮流结果值，进行下级电网的多 $V\theta$ 节点潮流计算，得到下级电网边界节点的注入有功功率 P_S 和无功功率 Q_S ，该值与上级电网实时潮流中上级电网边界节点的相应量值之间存在偏差 ΔP_S 和 ΔQ_S ；

(2) 根据所述 $V\theta$ 给定节点有功功率偏差量 ΔP_S ，计算下级电网负荷或发电的有功功率调节量 ΔP_M ，通过调节 ΔP_M 以消除下级电网边界节点有功功率偏差量 ΔP_S ；M 是参与有功功率调整的节点集合；

利用灵敏度方法，建立下级电网边界节点的注入有功功率偏差量 ΔP_S 和下级电网内部节点注入有功功率调整量 ΔP_M 之间的灵敏度关系：

$$\Delta P_S = D_{SM} \Delta P_M$$

式中， D_{SM} 是 $S \times M$ 阶（无量纲）灵敏度矩阵，其第 j 列元素表示 M 集合第 j 个可调节节点的注入有功功率改变一个单位量时，S 集合中各节点的注入有功功率变化量的大小；它的计算方法如下：

$$D_{SM} = \tilde{B}'_{SM} \tilde{B}'^{-1}_{MM}$$

\tilde{B}' 表示快速分解法潮流计算（有功—相角迭代）中的 B' 矩阵（ $N \times N$ 阶）保留 S 和 M 集合节点，消去其他不参与有功功率调整的节点后的浓缩矩阵，下标 S 和 M 分别表示 \tilde{B}' 中与 S 和 M 集合有关的部分；

利用伪逆法计算下级电网内部节点注入有功功率调节量：

$$\Delta P_M = \tilde{D}_{MS} \Delta P_S$$

式中 $\tilde{\mathbf{D}}_{MS}$ 是 $\Delta \mathbf{P}_M$ 和 $\Delta \mathbf{P}_S$ 之间的分布因子矩阵，用下式计算

$$\tilde{\mathbf{D}}_{MS} = \begin{cases} \mathbf{D}_{SM}^T (\mathbf{D}_{SM} \mathbf{D}_{SM}^T)^{-1}, & \text{如果 } M > S \\ \mathbf{D}_{SM}^{-T}, & \text{如果 } M = S \\ (\mathbf{D}_{SM}^T \mathbf{D}_{SM})^{-1} \mathbf{D}_{SM}^T, & \text{如果 } M < S \end{cases}$$

式中矩阵的上标 T 表示矩阵的转置；最后用 $\Delta \mathbf{P}_M$ 修正 M 集合节点的注入有功功率来减小边界节点注入有功功率偏差 $\Delta \mathbf{P}_S$ ，以实现 V θ 给定节点有功潮流匹配；

(3) 根据上述 V θ 给定节点注入无功功率偏差量 $\Delta \mathbf{Q}_S$ ，计算下级电网发电机节点（可包括负荷节点）注入无功功率调节量 $\Delta \mathbf{Q}_R$ ，调节 $\Delta \mathbf{Q}_R$ 以消除 V θ 给定节点注入无功功率偏差量 $\Delta \mathbf{Q}_S$ ；R 是参与注入无功功率调整的节点集合，R 集合可以和第 (2) 步中的 M 集合相同或不同；具体做法是：

建立 S 集合 V θ 给定节点注入无功功率变化量 $\Delta \mathbf{Q}_S$ 与 R 集合节点注入无功功率调整量 $\Delta \mathbf{Q}_R$ 之间的灵敏度关系：

$$\Delta \mathbf{Q}_S = \mathbf{S}_{SR} \Delta \mathbf{Q}_R$$

式中， \mathbf{S}_{SR} 是 $S \times R$ 阶（无量纲）灵敏度矩阵，其第 j 列元素表示 R 集合第 j 个节点注入无功功率改变一个单位量时，S 集合中各节点注入无功功率变化量的大小；并有

$$\mathbf{S}_{SR} = \tilde{\mathbf{B}}_{SR}'' \tilde{\mathbf{B}}_{RR}''^{-1}$$

$\tilde{\mathbf{B}}''$ 表示快速分解法潮流计算（无功—电压迭代）中的 \mathbf{B}'' 矩阵（ $N \times N$ 阶）保留 S 和 R 集合节点，消去其他不参与调整的节点集合后的浓缩矩阵，下标 S 和 R 分别表示 $\tilde{\mathbf{B}}''$ 中与 S 和 R 集合有关的部分；

利用伪逆法，计算节点注入无功功率调节量：

$$\Delta \mathbf{Q}_R = \tilde{\mathbf{S}}_{RS} \Delta \mathbf{Q}_S$$

式中 $\tilde{\mathbf{S}}_{RS}$ 是 $\Delta \mathbf{Q}_R$ 和 $\Delta \mathbf{Q}_S$ 之间的分布因子矩阵，用下式计算

$$\tilde{\mathbf{S}}_{RS} = \begin{cases} \mathbf{S}_{SR}^T (\mathbf{S}_{SR} \mathbf{S}_{SR}^T)^{-1}, & \text{如果 } R > S \\ \mathbf{S}_{SR}^{-T}, & \text{如果 } R = S \\ (\mathbf{S}_{SR}^T \mathbf{S}_{SR})^{-1} \mathbf{S}_{SR}^T, & \text{如果 } R < S \end{cases}$$

式中矩阵的上标 T 表示矩阵的转置；最后用 $\Delta \mathbf{Q}_R$ 修正 R 集合节点的注入无功功率来减小 V θ 给定节点注入无功功率偏差 $\Delta \mathbf{Q}_S$ ，以实现 V θ 给定节点无功潮流的匹配；

(4)（由于潮流方程的非线性，不能够利用上述线性化公式计算出的调节量一次消除偏差，因此调节过程是一个迭代计算的过程。）修正了 M 集合节点的注入有功功率和 R 集合节点的注入无功功率，重新返回 (1) 做多 V θ 节点潮流计算，计算中，下级电网边界节

点 S 集合的 $V\theta$ 给定值仍使用上级电网实时潮流中上级电网边界节点的相应值；重复步骤 (1) — (3)，直到下级电网边界节点的有功功率和无功功率与上级电网实时潮流中上级电网边界节点的相应值相等，即偏差 ΔP_S 和 ΔQ_S 均为零；此时两个电网潮流匹配，可以将它们无扰动合并；合并后的全局电网潮流模型中，相应于上级电网部分的潮流与合并前的相同。

实施例 2：调节下级电网内部节点注入有功功率 P 和节点电压幅值 V 的方法。具体做法是：

(1)、把下级电网边界节点（如图 2 b）的 i, j, k）设置为 $Q\theta$ 给定节点，该节点集合定义为 S，其节点注入无功功率 Q 和节点电压相角 θ 设置成上级电网实时潮流中上级电网边界节点的相应值（图 2 b）的 3），并采用下式约束方程计算潮流：

$$\begin{cases} \theta_i^{sp} = \theta_i \\ Q_i^{sp} = V_i \sum_{j \in S} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases}$$

式中 θ_i^{sp} 和 Q_i^{sp} 是下级电网边界节点 i 给定的电压相角和注入无功功率， G_{ij} ， B_{ij} 分别是节点导纳矩阵第 i 行 j 列元素的实部和虚部； θ_{ij} 是节点 i 和节点 j 之间的节点电压相角差； V_i ， V_j 是节点 i 和节点 j 的电压幅值。将下级电网中需要参与电压调整的节点设置为 PV 节点，其他节点设置为 PQ 节点，其 PQ 和 PV 给定电量值设置为下级电网中原有潮流结果值，进行下级电网的多 $Q\theta$ 节点潮流计算，得到下级电网边界节点的注入有功功率 P_S 和节点电压幅值 V_S ，该值与上级电网实时潮流中上级电网边界节点的相应量值之间存在偏差 ΔP_S 和 ΔV_S 。

(2)、根据上述边界 $Q\theta$ 节点注入有功功率偏差量 ΔP_S ，用下面方法计算下级电网负荷或发电的有功功率调节量 ΔP_M ，通过调节 ΔP_M 以消除下级电网边界节点有功功率偏差量 ΔP_S ；M 是参与有功功率调整的节点集合；

利用灵敏度方法，建立下级电网边界节点的注入有功功率偏差量 ΔP_S 和下级电网内部节点注入有功功率调整量 ΔP_M 之间的灵敏度关系：

$$\Delta P_S = D_{SM} \Delta P_M$$

式中， D_{SM} 是 $S \times M$ 阶（无量纲）灵敏度矩阵，其第 j 列元素表示 M 集合第 j 个可调节节点的注入有功功率改变一个单位量时，S 集合中各节点的注入有功功率变化量的大小；它的计算方法如下：

$$D_{SM} = \tilde{B}'_{SM} \tilde{B}'^{-1}_{MM}$$

\tilde{B}' 表示快速分解法潮流计算（有功—相角迭代）中的 B' 矩阵（ $N \times N$ 阶）保留 S 和 M 集合节点，消去其他不参与有功功率调整的节点后的浓缩矩阵，下标 S 和 M 分别表示 \tilde{B}' 中

与 S 和 M 集合有关的部分；

利用伪逆法计算下级电网内部节点注入有功功率调节量：

$$\Delta P_M = \tilde{D}_{MS} \Delta P_S$$

式中 \tilde{D}_{MS} 是 ΔP_M 和 ΔP_S 之间的分布因子矩阵，用下式计算

$$\tilde{D}_{MS} = \begin{cases} D_{SM}^T (D_{SM} D_{SM}^T)^{-1}, & \text{如果 } M > S \\ D_{SM}^{-T}, & \text{如果 } M = S \\ (D_{SM}^T D_{SM})^{-1} D_{SM}^T, & \text{如果 } M < S \end{cases}$$

式中矩阵的上标 T 表示矩阵的转置；最后用 ΔP_M 修正 M 集合节点的注入有功功率来减小边界节点注入有功功率偏差 ΔP_S ，以实现 Q0 给定节点有功潮流匹配；

(3)、根据上述边界 Q0 节点电压幅值偏差量 ΔV_S ，计算下级电网参与电压调整的节点的电压幅值调节量 ΔV_R ，调节 ΔV_R 以消除边界节点电压幅值偏差量 ΔV_S ；R 是参与电压调整的节点集合，R 集合可以和第 (2) 步中的 M 集合相同或不同；具体做法是：

建立 S 集合节点电压幅值变化量 ΔV_S 与 R 集合节点电压幅值调节量 ΔV_R 之间的灵敏度关系：

$$\Delta V_S = R_{SR} \Delta V_R$$

上式中， R_{SR} 是 $S \times R$ 阶（无量纲）灵敏度矩阵，其第 j 列元素表示 R 集合第 j 个电压可调节节点的电压幅值改变一个单位量时，S 集合中各 Q0 节点电压幅值变化量的大小；并有

$$R_{SR} = -\tilde{B}_{SS}^{-1} \tilde{B}_{SR}''$$

\tilde{B}'' 表示快速分解法潮流计算（无功—电压迭代）中的 B'' 矩阵（ $N \times N$ 阶）消去不参与电压调整的节点后的浓缩矩阵，下标 S 和 R 分别表示 \tilde{B}'' 中与 S 和 R 集合有关的部分；

利用伪逆法，计算节点电压幅值的调节量：

$$\Delta V_R = \tilde{R}_{RS} \Delta V_S$$

式中 \tilde{R}_{RS} 是 ΔV_R 和 ΔV_S 之间的灵敏度，用下式计算

$$\tilde{R}_{RS} = \begin{cases} R_{SR}^T (R_{SR} R_{SR}^T)^{-1}, & \text{如果 } R > S \\ R_{SR}^{-T}, & \text{如果 } R = S \\ (R_{SR}^T R_{SR})^{-1} R_{SR}^T, & \text{如果 } R < S \end{cases}$$

式中矩阵的上标 T 表示矩阵的转置；用 ΔV_R 修正 R 集合发电机节点的电压幅值，以使 ΔV_S 减小，最后实现边界节点电压幅值的匹配。

(4)(由于潮流方程的非线性,不能够利用线性化公式计算出的调节量一次消除偏差,因此调节过程是一个迭代计算的过程。)修正了M集合节点的有功注入功率和R集合节点电压幅值,重新返回(1)做多 Q^0 节点潮流计算,计算中,下级电网边界节点S集合的 Q^0 给定值仍使用上级电网实时潮流中上级电网边界节点相应的值;重复步骤(1)一(3),直到下级电网边界节点的有功功率和电压幅值与上级电网实时潮流中上级电网边界节点的相应量值相等,即偏差 ΔP_s 和 ΔV_s 均为零;此时两个电网潮流匹配,可以将它们无扰动合并;合并后的全局电网潮流模型中,相应于上级电网部分的潮流与合并前的相同。

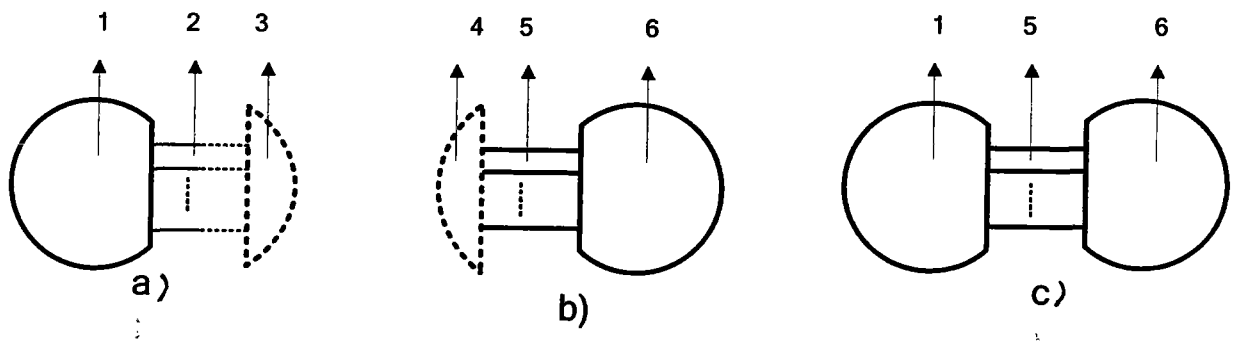


图 1

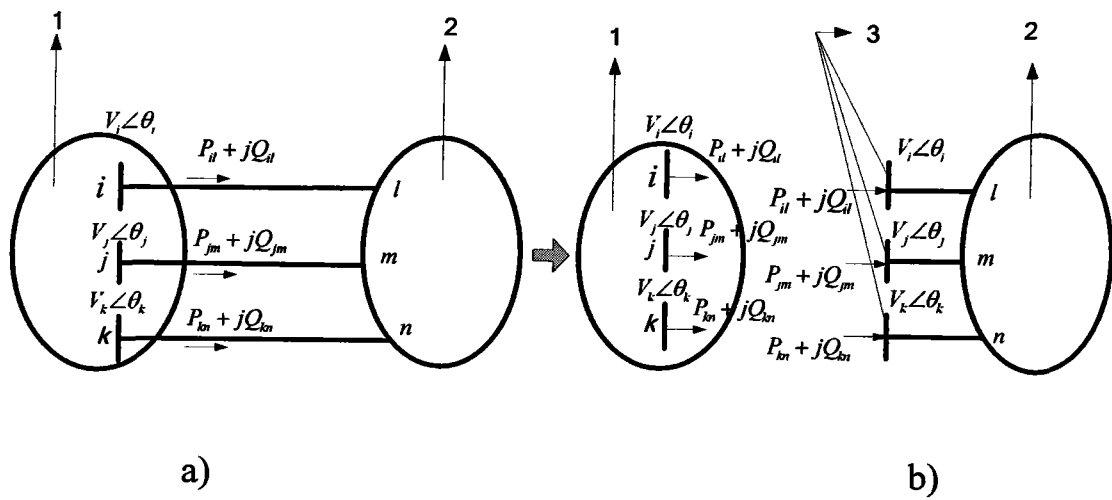


图 2