

一种多分区互联电网分布式无功优化算法

赵晋泉, 吉跃瑾, 戴则梅

(教育部可再生能源发电技术研究中心(河海大学), 江苏 南京 210098)

摘要: 电网互联进程不断加快和系统规模的不断扩大对互联电网无功优化计算提出了更高的要求。提出了一种基于子网边界节点等值注入功率的多分区互联电网无功优化分布式协调优化算法。基于电网监控分层分区的特点, 通过建立保留分区间联络线的简化外网模型, 将子网间边界向量相等的耦合约束转化为边界节点注入功率修正方程的等式约束。构造边界节点电压加权修正的外层协调环节, 依靠等值注入功率和对应边界节点电压向量的数值更新与传递实现全网无功优化问题的分布式求解。该方法有效地降低了协调层的参与度, 进一步提高了子网无功优化的独立性, 符合无功优化和控制的本地性要求。对多个 IEEE 试验系统进行了数值仿真测试与分析, 结果表明方法具有良好的有效性和适用性。

关键词: 最优潮流; 无功优化; 分布式计算; 简化外网模型; 等值注入功率

A distributed reactive power optimization method for multi-area interconnected power grid

ZHAO Jin-quan, JI Yue-jin, DAI Ze-mei

(Research Center for Renewable Energy Generation Engineering, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: This paper presents a distributed optimization method to solve the optimal reactive power flow (ORPF) problem for multi-area interconnected power grid. A simplified external network equivalence method is used to implement the regional ORPF calculation of each sub-grid, and the inter-area coupling constraint is transformed into equality constraints of boundary bus as injection power modified equation afterwards. Therefore, the distributed solution of multi-area ORPF problem can be realized through the update and transfer process of equivalent injection power and its corresponding boundary bus voltage vector. The proposed method omits the tedious process of network equivalence and reduces the burden of coordination layer, which accord with the local feature of reactive power optimization and control properly. The numerical simulation results of several IEEE cases show that the proposed method is effective and suitable for online application.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51077042).

Key words: optimal power flow; reactive power optimization; distributed power flow computation; simplified equivalent network model; equivalent injection power

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)23-0009-07

0 引言

随着三峡水电、西电东送等大型工程的建设以及特高压、远距离交直流输电技术的应用, 我国电网互联进程不断加快、系统规模不断扩大, 对电力系统的安全稳定和经济运行提出了新的挑战^[1-2]。多分区(如各省)互联电网广域分布而资源异构, 尤其

在电力市场环境下, 各分区电网调度机构间的信息壁垒将进一步阻碍系统内数据和信息的共享。因此, 研究适应电网发展的无功优化计算模式具有重要的现实意义。

多分区互联电网分布式无功优化的基本思路是设法将大系统优化问题有效分解为一系列子问题, 并进行分布式求解和协调优化。除采用并行处理方式的智能算法外, 其实现方法目前大致有三类: 第一类方法先基于最优化问题的 Karush Kuhn Tucker (KKT)条件得到全网的系统修正方程, 再运用对角加边模型、近似牛顿方向等矩阵理论对该系统修正方程进行解耦^[3-5]。但该类方法计算效率受制于子网

基金项目: 国家自然科学基金项目(51077042); 高等学校博士学科点专项科研基金(20120094110008); 清华大学“电力系统及发电设备控制与仿真”国家重点实验室开放课题(SKLD11KZ02)

间的耦合度、区域分解的数目，且存在协调层负担重等问题，更适用于同地分布式并行计算的场景。第二类方法基于拉格朗日松弛理论，将子网间的耦合约束松弛至目标函数中并采用一定的分解算法实现其可分性^[6-9]。以基于辅助问题原理(Auxiliary Problem Principle, APP)的分解算法为例，该经典方法通过构造辅助函数，将原鞍点问题分化为可独立求解的极值问题。但是该类算法收敛效果受对偶变量、罚参数初始化及更新时的参数设置影响，因而降低了其对不同系统模型的适应度，且对协调层的依赖仍然很大。第三类方法通过对外部网络进行等值，进行各分区无功优化的独立求解，并引入简单的外层协调环节实现全网的无功优化^[10-12]。该类方法计算效率不受互联电网系统规模和子网间耦合度的影响，其协调层的参与程度较低，子网间仅需交换少量数据即可实现协调优化。但其子网在进行本地计算时需要相邻子网的运行参数以进行外网等值，影响了子网优化计算的独立性，且该等值参数的计算和更新相对繁琐^[13]。

本文提出一种基于子网边界节点等值注入功率的多分区互联电网分布式无功优化算法。该方法通过建立保留子网间联络线的简化外网模型^[14]实现全网优化问题的解耦，依靠等值注入功率和对应边界节点电压向量的数值更新与传递以子网内优化、子网间协调的方式实现无功优化的分布式求解。该算法无需进行外网等值参数的计算和更新，进一步提高了子网优化计算的独立性，有效降低了协调层的参与程度；在实现电力系统无功资源优化配置、降低网损的同时，其分解协调思想亦较好地满足了无功优化和控制的本地性要求，适用于解决大规模互联电网在线无功优化及实时控制问题。

1 多区域控制中心模型分解

目前我国电网依据统一调度、分级管理的原则进行调度机构的设置和层级划分。图 1 给出了分层分区电力系统的结构示意图。

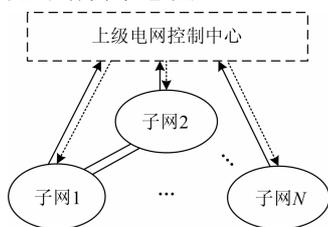


图 1 电力系统分层分区结构图

Fig. 1 Structure of power system partition

图1中上级电网控制中心承担了各子网的优化和调控任务，而多控制中心无功优化分布式算法要求尽可能保留各分区电网计算独立性的同时获得全网统一的优化结果。考虑电网分层分区特点的系统分解方法是实现电力系统优化问题分布式求解的基础^[15-16]，为论述方便这里以图 2 所示的两分区互联电网为例阐述其原理。

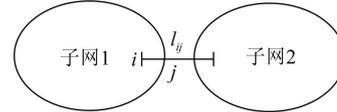


图 2 两分区互联示意图

Fig. 2 Power system of two interconnected area

由图 2 可知，子网1、子网2通过连接相邻区域边界节点的联络线 l_{ij} 相联系。传统分解协调法在进行网络分解时，常选取联络线上某一点 b 为虚拟节点，对该虚拟节点进行分裂处理，使之成为分别隶属于区域1和区域2的边界节点 b_1 和 b_2 。若使分解后的系统与原系统等值，则节点 b_1 的电流量 x_{b_1} 与节点 b_2 的电流量 x_{b_2} 需满足式(1)。

$$[P_{b_1}, Q_{b_1}, V_{b_1}, \theta_{b_1}] = [-P_{b_2}, -Q_{b_2}, V_{b_2}, \theta_{b_2}] \quad (1)$$

式中： P_{b_1} 、 Q_{b_1} 为各子网虚拟节点的等值注入； V_{b_1} 、 θ_{b_1} 为其电压幅值及相角。

该子网间耦合约束常被处理为二次罚函数项添加进各子网目标函数的增广拉格朗日函数中，由于该二次项破坏了各子网间的可分性，需采用 APP 等适当的分解算法将其转化为可分解的问题。因此，该类方法不论是虚拟节点的引入还是二次罚函数项的可分性处理均相对繁琐。

本文在进行网络分解时，将联络线在各子网中重复建模形成简化等值模型。考虑到若求解的联络线功率等于真值，则子网内潮流即与全网统一计算同解，进而实现全网无功优化问题的解耦。定义联络线靠近内网侧和外网侧的端点分别为内边界和外边界节点，以上述两区域互联系统为例，其分解模型如图 3 所示。

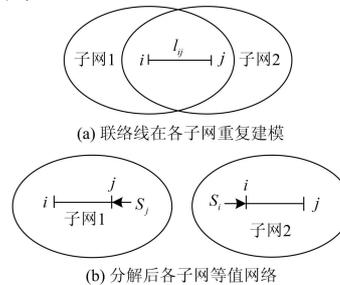


图 3 两区域互联电网的分解模型

Fig. 3 Decomposition model of two-area power grid

以子网 1 线路 l_{ij} 的 j 侧线路功率 $S_{ji(1)}$ 为例, 其数值与节点 j 等值注入功率 S_j 大小相等, 该等值注入解耦后的有功和无功功率分别为

$$P_j = P_{ji}(V_{i(1)}, \theta_{i(1)}, V_{j(1)}, \theta_{j(1)}) \quad (2)$$

$$Q_j = Q_{ji}(V_{i(1)}, \theta_{i(1)}, V_{j(1)}, \theta_{j(1)}) \quad (3)$$

式中: P_j 、 Q_j 分别为子网 1 外边界节点 j 的注入有功和无功; P_{ji} 、 Q_{ji} 分别为联络线 l_{ij} 的 j 侧线路有功及无功; $V_{i(1)}$ 、 $\theta_{i(1)}$ 和 $V_{j(1)}$ 、 $\theta_{j(1)}$ 分别为子网 1 节点 i 和 j 的电压幅值及相角。

式(2)、式(3)表明联络线的线路功率与边界节点等值注入存在对应关系, 而该注入功率又是边界节点电压相量的函数, 因此子网间联络线功率相等这一耦合约束的判据可转化为相邻子网边界节点电压向量满足设定的收敛精度 ε , 即

$$\left| V_{i(1)} - V_{i(2)} \right| \leq \varepsilon, \left| \theta_{i(1)} - \theta_{i(2)} \right| \leq \varepsilon \quad (4)$$

$$\left| V_{j(1)} - V_{j(2)} \right| \leq \varepsilon, \left| \theta_{j(1)} - \theta_{j(2)} \right| \leq \varepsilon \quad (5)$$

因此, 对于边界节点等值注入功率, 一方面, 可将其修正方程内化为边界节点有功、无功不平衡量的等式约束参与子网本地无功优化; 另一方面, 由修正方程计算出的边界节点电压向量又可加权更新, 并返回各子网进一步修正该注入功率^[17-18]。

可见, 本文算法规避了传统方法中耦合约束二次罚函数项的可分性处理; 同时, 由于协调环节无需进行 APP 等算法中耦合约束对应拉格朗日乘子的数值更新, 子网本地优化计算的独立性显著提高。体现了本文无功优化分布式算法在网络分解及耦合约束处理方面的优势。

2 无功优化分布式协调计算

2.1 各子网网损优化计算

本文以网损最小为系统的优化目标, 以子网 1 为例, 其无功优化的数学模型为

$$\min f(x_{(1)}) \quad (6)$$

$$\text{s.t. } g(x_{(1)}) = 0 \quad (7)$$

$$h(x_{(1)}) \leq 0 \quad (8)$$

其中: $x_{(1)}$ 为子网 1 内的变量, 包含节点电压幅值/相角、发电机/无功补偿装置出力、可调变压器变比等; f 为系统网损的目标函数; g 和 h 分别为系统的等式和不等式约束。

对于子网 1 外边界节点而言, 其等式约束构成与内部节点、内边界节点的节点注入功率方程不同, 而是以其注入功率修正方程作为对应的等式约束。

对于图 3 中子网 1 外边界节点 j , 其第 k 次外层迭代更新的有功和无功注入分别为

$$P_j^{(k+1)} = P_{ji}(\tilde{V}_i^{(k)}, \tilde{\theta}_i^{(k)}, \tilde{V}_j^{(k)}, \tilde{\theta}_j^{(k)}) \quad (9)$$

$$Q_j^{(k+1)} = Q_{ji}(\tilde{V}_i^{(k)}, \tilde{\theta}_i^{(k)}, \tilde{V}_j^{(k)}, \tilde{\theta}_j^{(k)}) \quad (10)$$

式中: $\tilde{V}_i^{(k)}$ 、 $\tilde{\theta}_i^{(k)}$ 和 $\tilde{V}_j^{(k)}$ 、 $\tilde{\theta}_j^{(k)}$ 分别为第 k 次外层迭代加权修正后边界节点 i 和 j 的电压幅值及相角。

子网 1 进行本地优化计算时, 其外边界节点 j 的注入功率修正方程为

$$\Delta P_j^{(n)} = P_j^{(k+1)} - P_{ji}(V_i^{(n)}, \theta_i^{(n)}, V_j^{(n)}, \theta_j^{(n)}) = 0 \quad (11)$$

$$\Delta Q_j^{(n)} = Q_j^{(k+1)} - Q_{ji}(V_i^{(n)}, \theta_i^{(n)}, V_j^{(n)}, \theta_j^{(n)}) = 0 \quad (12)$$

式中: $V_i^{(n)}$ 、 $\theta_i^{(n)}$ 和 $V_j^{(n)}$ 、 $\theta_j^{(n)}$ 分别为子网 1 内部优化计算时第 n 次内层迭代步对应的节点 i 和 j 的电压幅值及相角; $\Delta P_j^{(n)}$ 和 $\Delta Q_j^{(n)}$ 分别为节点 j 的有功和无功不平衡量。

本文在初始化边界节点等值注入功率时, 以全网基态下潮流计算或分布式潮流计算得到的边界节点电压幅值和相角代入式(9)、式(10)计算得到其初值。

本文采用非线性原对偶内点法进行子网本地优化计算, 逐步优化系统网损, 该过程即为内层迭代阶段。

2.2 边界节点电压加权修正

以图 3 中边界节点 j 为例, 子网 1、2 本地优化计算完成后, 通过通信交换边界节点电压相量 $V_{j(1)}^{(k)} \angle \theta_{j(1)}^{(k)}$ 、 $V_{j(2)}^{(k)} \angle \theta_{j(2)}^{(k)}$ 。若两者相等, 则计算结束; 否则需要进行电压加权修正的外层协调环节。

本文采用加权修正模式对子网独立计算得到的边界节点电压幅值和相角进行更新, 第 k 次外层迭代时的电压修正方程为

$$\tilde{V}_j^{(k)} = \lambda_{B'} V_{j(1)}^{(k)} + (1 - \lambda_{B'}) V_{j(2)}^{(k)} \quad (13)$$

$$\tilde{\theta}_j^{(k)} = \lambda_B \theta_{j(1)}^{(k)} + (1 - \lambda_B) \theta_{j(2)}^{(k)} \quad (14)$$

式中, $\lambda_{B'}$ 、 λ_B 分别为电压幅值及电压相角的权重系数。本文沿用文献[18]的权重系数求取方法, 即以系统无功、有功解耦模型中两侧子网戴维南等值电压前的系数分别作为电压幅值及电压相角的合并参数。求解该系数所需的节点阻抗矩阵对角元在准备阶段由子网边界间通信交换所得。

2.3 多平衡节点处理

除原平衡节点所在子网外, 其余各子网选取某一 PV 节点为其平衡节点。由于平衡节点选择的不同, 各子网在本地修正电压相角前需要首先对外网通信传递的边界节点电压相角进行折算。这里以图 2 所示两区域互联系统为例, 第 k 次外层迭代时, 子

网2计算所得节点 j 的电压相角 $\theta_{j(2),in}^{(k)}$ 在传递给子网 1 参与其边界节点电压相角加权修正前需做如式(15)处理^[18]。

$$\theta_{j(2)}^{(k)} = \theta_{j(2),in}^{(k)} + \frac{1}{n_{B_{12}}} \sum_{i \in B_{12}} (\theta_{i(1)}^{(k)} - \theta_{i(2),in}^{(k)}) \quad (15)$$

式中: B_{12} 为子网 1、2 相同边界节点集合; $n_{B_{12}}$ 为其所含节点个数; $\theta_{i(1)}^{(k)}$ 、 $\theta_{i(2),in}^{(k)}$ 分别为 k 次外层迭代时子网 1、子网 2 本地计算所得边界节点 i 的电压相角; $\theta_{j(2)}^{(k)}$ 为折算后的节点 j 电压相角, 可用于子网 1 边界节点电压相角的加权修正。

经过上述处理的电压相角 $\theta_{j(2)}^{(k)}$ 方可参与子网 1 本地电压加权修正。同理, 子网 2 在进行本地边界节点电压更新前亦需进行外网边界节点电压相角的折算。

此外, 分布式无功优化过程中系统有功不平衡量默认由各子网平衡节点自动分摊, 而集中式优化时该有功缺额统一由原平衡节点分摊。以图 2 互联电网为例, 已知原平衡节点在子网 1, 则需要对分布式计算时子网 2 平衡节点自动分摊的部分重新分配给子网 1 平衡节点。为此, 第 k 次外层迭代后子网 1 外边界等值注入有功 $P_{BE(1)}^{(k+1)}$ 和子网 2 外边界等值注入有功 $P_{BE(2)}^{(k+1)}$ 分别进行如下处理。

$$P_{BE(1)}^{(k+1)'} = P_{BE(1)}^{(k+1)} - [P_{Gsl(2)}^{(k)} - P_{Gsl(2)}^{(0)} - \Delta P_{Gsl(2)}] / n_{BE(1)} \quad (16)$$

$$P_{BE(2)}^{(k+1)'} = P_{BE(2)}^{(k+1)} + [P_{Gsl(2)}^{(k)} - P_{Gsl(2)}^{(0)} - \Delta P_{Gsl(2)}] / n_{BE(2)} \quad (17)$$

式中: $P_{BE(1)}^{(k+1)'}$ 、 $P_{BE(2)}^{(k+1)'}$ 分别为第 k 次外层迭代考虑有功出力重新分配后再次修正的子网 1、子网 2 外边界等值注入有功; $P_{Gsl(2)}^{(k)}$ 为第 k 次外层迭代时子网 2 平衡节点实际有功出力; $P_{Gsl(2)}^{(0)}$ 为该节点有功出力初始值; $\Delta P_{Gsl(2)}$ 为其应当分担的有功缺额, 此处即为零; $n_{BE(1)}$ 、 $n_{BE(2)}$ 分别为子网 1、子网 2 外边界节点数目。

通过外层电压加权修正环节式(13)、式(14)的合并过程, 边界节点电压不断更新, 而通过式(9)、式(10)计算的各子网外边界节点等值注入功率也不断修正而趋于真值, 最终实现多区域互联电力系统的分布式无功优化。

3 计算流程

基于子网边界节点等值注入功率的多区域互联电网分布式协调无功优化算法计算流程如下:

(1) 准备阶段。基于替代原理将联络线在各子网

中重复建模实现电网分解, 子网间交换边界节点阻抗矩阵对角元以形成电压合并的权重系数。

(2) 内层迭代阶段。各子网进行本地无功优化计算, 获得子网内网损的优化结果以及各节点的状态变量更新值。

(3) 收敛判别。计算各子网间相同边界节点电压幅值差 ΔV 和电压相角差 $\Delta \theta$, 并判断它们是否满足外层收敛判据, 如果满足则整个计算结束, 否则转入第(4)步。

(4) 外层协调阶段。用式(13)、式(14)加权修正边界节点电压, 并用式(9)、式(10)进一步修正外边界节点等值注入功率, 然后转第(1)步。

4 算例分析

为验证本文算法的有效性, 分别对多个 IEEE 标准算例进行了测试并与全网集中式网损优化所得的计算结果进行了比较分析。所用收敛判据为: 内层子网 OPF 计算的对偶间隙小于 10^{-5} (p.u.), 外层边界节点间最大电压幅值差及最大电压相角差小于 10^{-4} (p.u.)。图 4 所示为 IEEE 39 节点系统三分区示意图。

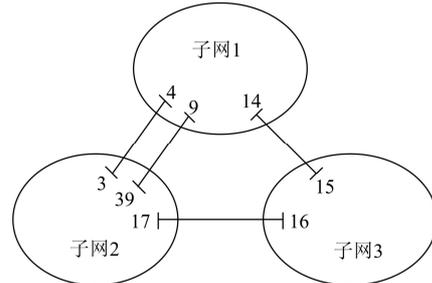


图 4 IEEE 39 节点系统三分区示意图

Fig. 4 Diagram of three sub-grids in IEEE 39 bus system

4.1 分布式网损优化结果

将 IEEE 14、30、39 和 118 节点系统按其联络线进行子网划分, 根据潮流计算结果确定边界节点等值注入功率初值, 比较分析本文所用分布式无功优化算法与全网集中式算法的系统网损优化结果。测试结果如表 1 所示。

表 1 分布式网损优化结果

Table 1 Results from distributed method

| 系统 | 联络线 | 收敛 步数 | 网损/p.u. | |
|----------|-------------------------|----------|---------|---------|
| | | | 集中式 | 本文 |
| IEEE 14 | 4-7,4-9,5-6 | 7 | 0.019 4 | 0.019 6 |
| IEEE 30 | 4-12,6-10,6-9,28-27 | 10 | 0.047 3 | 0.047 4 |
| IEEE 39 | 见图 4 | 8 | 0.377 6 | 0.378 2 |
| IEEE 118 | 15-33,19-34,30-38,23-24 | 7 | 1.300 6 | 1.301 0 |

由表 1 数据可知, 本文的分布式无功优化算法具有良好的收敛性能: 以较少的主循环迭代次数实现了多区域互联电网网损优化问题的分布式求解, 显著降低了系统的网损, 其优化结果与全网集中式优化算法相比仅存在少量误差。

与基于外网等值技术的无功优化分解协调算法相比, 本文算法中的简化外网模型不需要相邻子网的具体运行参数, 也不必进行外部网络的等值。图 5 给出了表 1 中 IEEE 14 节点系统采用简化外网模型和 Ward 等值时各子网有功不平衡量和系统网损随外层迭代次数的变化曲线; 图 6 给出了 IEEE 30 节点系统两种外网模型下各子网最大电压幅值偏差和系统网损随外层迭代次数的变化曲线。

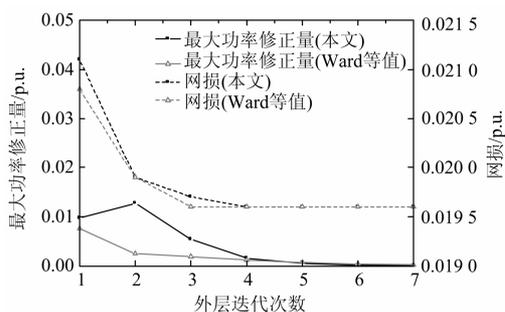


图 5 IEEE 14 节点系统迭代过程

Fig. 5 Iteration of IEEE 14 bus system

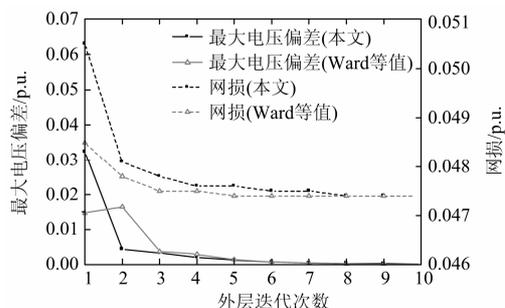


图 6 IEEE 30 节点系统迭代过程

Fig. 6 Iteration of IEEE 30 bus system

由图 5、图 6 可知: 虽然在外层迭代初始阶段本文算法中子网最大功率修正量及边界节点电压幅值偏差略高于基于 Ward 等值分解协调算法的对应值, 但随着外层协调电压加权修正及边界节点等值注入功率的更新, 上述功率修正量及电压偏差显著降低, 系统网损亦逐步优化, 体现了本文算法良好的收敛性能。

4.2 子网本地网损优化

无功优化和控制具有本地性, 各子网单独进行本地的网损优化时, 若其邻网无功优化(ORPF)程序

未启动而仅进行普通潮流(PF)计算, 此时的系统网损优化结果需做进一步分析。按各子网启动程序不同, 定义三种计算模式如表 2 所示。

表 2 各计算模式定义

Table 2 Definition of each computation mode

| 执行程序 | 模式 1 | | 模式 2 | | 模式 3 | |
|------|------|------|------|------|------|------|
| | 子网 1 | 子网 2 | 子网 1 | 子网 2 | 子网 1 | 子网 2 |
| | ORPF | PF | PF | ORPF | ORPF | ORPF |

以表 1 中 IEEE 118 两分区系统为例, 其子网 1 以节点 15、19、30 和 23 为内边界, 子网 2 以节点 33、34、38、24 为内边界。各子网优化前的网损数据与三种计算模式下的测试结果一并由表 3 给出。

表 3 各计算模式下网损优化结果比较

Table 3 Comparison of regional network loss optimization results in each mode

| | 子网 1 网损/p.u. | 子网 2 网损/p.u. | 总网损/p.u. |
|------|--------------|--------------|----------|
| 优化前 | 0.386 6 | 1.229 3 | 1.615 9 |
| 模式 1 | 0.345 0 | 1.222 7 | 1.567 7 |
| 模式 2 | 0.386 4 | 1.008 1 | 1.394 5 |
| 模式 3 | 0.325 0 | 0.976 0 | 1.301 0 |

由表 3 中数据可知, 单个子网进行本地无功优化时, 该子网系统网损降低显著, 而其邻网虽只进行普通潮流计算, 但其网损也有一定程度的降低。由于本文算法各子网间无需进行 APP 等算法中拉格朗日乘子的交换, 子网本地优化计算的独立性大大提高, 仅需在协调环节交换电压向量即可。因而各区域可自由选取优化方法, 甚至仅依靠相邻子网普通潮流下的边界节点数据亦可获得较为理想的优化结果。

当子网进行本地网损优化而相邻子网无功优化程序未启动时, 本文算法亦可给出较理想的本地网损优化结果, 符合无功优化和控制的本地性要求, 易于实现子网控制中心与上级控制中心的协调和配合, 有助于指导运行人员设定运行方式和进行电网无功优化的规划。

5 结语

本文提出了一种求解多区域互联电网无功优化问题的分布式协调优化算法。在计及系统各运行参数约束通过对控制变量的优化实现系统网损优化的同时, 充分考虑了我国电网分层分区的特点, 建立了互联电力系统无功优化分布式求解模型。该算法无需建立外网等值模型, 避免了繁琐的等值参数的计算与更新; 各子网的本地优化计算独立性高, 可根据现实需要满足各子系统优化计算的差异性需求自由选择优化模型及算法, 具有很好的灵活性; 参

与协调计算的各区域控制中心仅需交换少量的边界节点信息,降低了协调层的参与度和优化问题的复杂度;协调互联电网无功优化、实现无功资源优化配置、有效降低系统网损,符合无功优化和控制的本地性要求,有利于实现大规模电力系统的在线无功优化和实时控制。

参考文献

- [1] 李兴源,魏巍,王渝红,等. 坚强智能电网发展技术的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(17): 1-7.
LI Xing-yuan, WEI Wei, WANG Yu-hong, et al. Study on the development and technology of strong smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(17): 1-7.
- [2] 颜伟,文旭,余娟,等. 智能电网环境下电力市场面临的机遇与挑战[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 224-230.
YAN Wei, WEN Xu, YU Juan, et al. Opportunities and challenges faced by electricity market in smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 224-230.
- [3] 赵维兴,刘明波. 基于近似牛顿方向的多区域无功优化解耦算法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(25): 18-23.
ZHAO Wei-xing, LIU Ming-bo. A decomposition algorithm applied to multi-area reactive-power optimization based on approximate Newton directions[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(25): 18-23.
- [4] 赵维兴,刘明波,缪楠林. 基于对角加边模型的多区域无功优化分解算法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(4): 25-29.
ZHAO Wei-xing, LIU Ming-bo, MIU Nan-lin. A decomposition algorithm for multi area reactive-power optimization based on the block bordered diagonal model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(4): 25-29.
- [5] YAN Wei, WEN Li-li, LI Wen-yuan, et al. Decomposition coordination interior point method and its application to multi-area optimal reactive power flow[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2011, 33(1): 55-60.
- [6] KIM B H, BALDICK R. Coarse-grained distributed optimal power flow[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(2): 932-939.
- [7] BALDICK R, KIM B H, CHASE C, et al. A fast distributed implementation of optimal power flow[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3): 858-864.
- [8] 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.
CHENG Xin-gong, LI Ji-wen, CAO Li-xia, 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.
- [9] 朱小军,陈刚,蒋燕. 基于电网分区的并行最优潮流算法实用化研究[J]. 继电器, 2007, 35(6): 25-29.
ZHU Xiao-jun, CHEN Gang, JIANG Yan. Practical researches of paralleled optimal power flow algorithm based on subarea division of the power system[J]. Relay, 2007, 35(6): 25-29.
- [10] 刘志文,刘明波. 基于Ward等值的多区域无功优化分解协调算法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(14): 63-69.
LIU Zhi-wen, LIU Ming-bo. A decomposition and coordination algorithm for multi-area reactive power optimization based on Ward equivalent[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(14): 63-69.
- [11] 刘志文,刘明波,林舜江. REI等值技术在多区域无功优化计算中的应用[J]. 电工技术学报, 2011, 26(11): 191-200.
LIU Zhi-wen, LIU Ming-bo, LIN Shun-jiang. Research on application of REI equivalent technique into multi-area reactive power optimization computing[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(11): 191-200.
- [12] 刘志文,刘明波,夏文波. 采用两种外部等值技术的多区域无功优化并行算法比较[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 56-61.
LIU Zhi-wen, LIU Ming-bo, XIA Wen-bo. Comparison of multi-area reactive power optimization parallel algorithms using two kinds of external equivalent technique[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 56-61.
- [13] 刘志文,刘明波. 基于支路等值注入功率模型的外部网络等值修正方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 219-226.
LIU Zhi-wen, LIU Ming-bo. A corrected external equivalent approach using branch equivalent injection power model[J]. Power System Protection and Control, 2012, 38(21): 219-226.
- [14] 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 Jin-quan, XU Peng, GAO Zong-he, 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.
- [15] 谢国辉, 张粒子, 舒隽, 等. 求解互联电网经济调度的层级协调方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 176-182.
- XIE Guo-hui, ZHANG Li-zi, SHU Jun, et al. Economic dispatching of interconnected power systems based on hierarchy coordination method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 176-182.
- [16] 喻洁, 黄学良, 夏安邦. 基于分区协调优化的环境经济调度策略[J]. 电工技术学报, 2010, 25(1): 129-136.
- YU Jie, HUANG Xue-liang, XIA An-bang. Environmental economic dispatch based on sub-area coordinated optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(1): 129-136.
- [17] 张海波, 张伯明, 孙宏斌. 基于异步迭代的多区域互联系统动态潮流分解协调计算[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(24): 1-5.
- ZHANG Hai-bo, ZHANG Bo-ming, SUN Hong-bin. A decomposition and coordination dynamic power flow calculation for multi-area interconnected system based on asynchronous iteration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(24): 1-5.
- [18] 张海波, 张伯明, 孙宏斌. 分布式潮流计算异步迭代模式的补充和改进[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(2): 12-16.
- ZHANG Hai-bo, ZHANG Bo-ming, SUN Hong-bin. Supplement and improvement of asynchronous iteration mode for distributed power flow between multi-control-centers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(2): 12-16.

收稿日期: 2014-03-06; 修回日期: 2014-09-07

作者简介:

赵晋泉(1972-), 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统优化运行、电压稳定分析与控制和电力市场等方面的研究工作;

吉跃瑾(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分布式计算; E-mail: jiyuejin@126.com

戴则梅(1973-), 女, 博士研究生, 主要从事电力系统调度自动化、优化运行与控制等方面的研究工作。