

# 无功优化分解协调计算的节点分区方法

陈灿旭, 刘明波

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641)

**摘要:** 无功优化分解协调算法中, 根据电压-无功灵敏度对电力系统进行分区, 使得各区域节点间电压无功耦合最弱, 这样有利于提高该算法的计算效率和实用价值。求出正常运行状态下的节点间电压-无功灵敏度, 应用阈值搜索分区算法对系统节点进行分区, 用节点分裂法将系统分解为几个较小规模的子网络。IEEE118节点系统和两个实际系统(538节点和1133节点)的无功优化计算表明, 该分区算法能改善算法的收敛性, 从而提高其计算效率。

**关键词:** 无功优化; 分解协调算法; 电压-无功灵敏度; 阈值搜索分区算法

## A bus partition approach applied to decomposition and coordination algorithm for reactive power optimization

CHEN Can-xu, LIU Ming-bo

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** Based on sensitivities between voltage and reactive power, a power system is partitioned so that the coupling between voltage and reactive power among buses of sub-areas is weakest in decomposition and coordination algorithm of reactive power optimization. Hence, its computational efficiency and practical value can be enhanced. This paper calculates sensitivities between voltage and reactive power at normal state firstly, then partitions buses using threshold search algorithm, and finally decomposes a power system into several small subsystems by node tearing. Results on IEEE 118-bus system and two practical systems such as 538-bus and 1133-bus systems validate that this novel partition algorithm can improve the convergence of decomposition and coordination algorithm and promote its efficiency.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.50777021).

**Key words:** reactive power optimization; decomposition and coordination algorithm; sensitivity between voltage and reactive power; partition algorithm based on threshold search

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)17-0001-06

## 0 引言

随着电力需求日益增加, 电力系统规模不断增加, 集中优化计算方法在计算速度和内存需求方面均难以满足大电网在线计算和实时控制的要求。高效的分解算法或并行算法<sup>[1-6]</sup>的研究已经成为该领域的一个发展方向。这些算法通常将系统按实际的地理位置分解, 使各区域独立求解, 最终能最大程度地模拟和逼近系统的实际最优状态, 同时能得到各区域及整个系统最优解。但分解协调方法需要考虑不同子区域间节点之间的耦合度, 其整体性能受到分区效果影响<sup>[1]</sup>。因此, 寻找恰当合理的系统分

区方法是改善算法性能的重要途径。

近年来, 人们对电网分区进行了较多的探索, 已经提出了多种解决方法, 其中较有代表性的有: 基于专家知识的向上分级分区法<sup>[7]</sup>, 聚类分区法<sup>[8-10]</sup>, 基于慢相关技术的分区法<sup>[11]</sup>等。近年来, 图论方法也开始应用于电网分区<sup>[12]</sup>, 其基本思想是: 用一个无向图来表示电网节点之间的耦合关系, 图中的节点与电网中的节点相对应, 连接两个节点之间的边表示它们之间的关系, 它们之间的耦合程度用赋予对应边的权重系数表示。然后给定一个耦合度阈值 $\alpha$ , 消去图中那些权重小于 $\alpha$ 的边, 并对完成消去操作后图的节点进行重新安排, 将其中不相连的各个子图区分出来, 则这些子图实际上就表示相互间耦合强度小于或等于门槛值 $\alpha$ 的子系统, 这一方法不需要进行特征值的分析, 计算速度快,

基金项目: 国家自然科学基金项目(50777021)

对于大系统效果更为明显。

本文就是借鉴图论分区方法,对系统进行分区,并应用基于对角加边的分解协调算法<sup>[1]</sup>进行优化计算,以 IEEE 118 节点系统和两个实际系统(538 节点和 1133 节点)作为算例,验证分区方法的有效性。

## 1 电压-无功灵敏度计算

对于一个  $n$  个节点电力系统,假设节点  $n$  为平衡节点,则其潮流方程为:

$$\begin{cases} P_{is} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \\ Q_{is} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (i=1,2,L,n) \quad (1)$$

其中:  $P_{is} = P_{Gi} - P_{LDi}$ ,  $Q_{is} = Q_{Gi} - Q_{LDi}$ , 分别为节点  $i$  的注入有功和无功功率;  $P_{Gi}$  和  $Q_{Gi}$  分别是节点  $i$  发电机有功和无功功率;  $P_{LDi}$  和  $Q_{LDi}$  分别是节点  $i$  负荷有功和无功功率,为已知值。

在无功优化计算中,除平衡机外,其他发电机有功功率为已知值,所有发电机无功功率是未知的。将式(1)线性化,并将平衡节点注入有功功率增量作为变量移到方程右边,则有:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{1s} \\ M \\ \Delta P_{(n-1)s} \\ 0 \\ \Delta Q_{1s} \\ M \\ \Delta Q_{ns} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P_1}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial \delta_{n-1}} & 0 & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial V_n} \\ M & & M & M & M & & M \\ \frac{\partial \Delta P_{n-1}}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial \Delta P_{n-1}}{\partial \delta_{n-1}} & 0 & \frac{\partial \Delta P_{n-1}}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial \Delta P_{n-1}}{\partial V_n} \\ \frac{\partial \Delta P_n}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial \Delta P_n}{\partial \delta_{n-1}} & -1 & \frac{\partial \Delta P_n}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial \Delta P_n}{\partial V_n} \\ \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial \delta_{n-1}} & 0 & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial V_n} \\ M & & M & M & M & & M \\ \frac{\partial \Delta Q_n}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial \Delta Q_n}{\partial \delta_{n-1}} & 0 & \frac{\partial \Delta Q_n}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial \Delta Q_n}{\partial V_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_1 \\ \dots \\ \Delta \delta_{n-1} \\ \Delta P_{ns} \\ \Delta V_1 \\ \dots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

写成分块矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} H & N \\ K & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (3)$$

令  $\Delta P = \mathbf{0}$ , 并消去  $\Delta X$ , 就可推出节点注入无功功率与节点电压之间的增量关系:

$$\Delta Q = (\mathbf{KH}^{-1}\mathbf{N} - \mathbf{L})\Delta V \quad (4)$$

令  $\mathbf{S} = (\mathbf{KH}^{-1}\mathbf{N} - \mathbf{L})^{-1}$ , 得到节点电压与节点注入无功功率之间的增量关系:

$$\Delta V = \mathbf{S}\Delta Q \quad (5)$$

其中:  $\mathbf{S}$  是  $n \times n$  阶矩阵,包含了所有节点电压-无功灵敏度信息,  $\mathbf{S}$  的元素  $s_{ij}$  表示节点  $j$  处的无功功率注入变化一个单位时,节点  $i$  的电压变化量,即反映了节点  $i$  和  $j$  之间的无功电压电气耦合度,  $s_{ij}$  和  $s_{ji}$  相同或者相差不大。考虑到两节点的电气耦合的对称性,定义电压无功耦合矩阵  $\mathbf{S}'$ , 其元素表示为<sup>[13]</sup>:

$$s'_{ij} = s'_{ji} = \sqrt{s_{ij}^2 + s_{ji}^2} \quad (6)$$

## 2 基于阈值搜索的分区算法

将一个  $n \times n$  阶电压无功耦合矩阵  $\mathbf{S}'$  用一个无向图来表示,图中的节点与电网中的节点相对应,连接两个节点 ( $i$  和  $j$ ) 之间的边表示它们之间的关系,它们之间的耦合程度用赋予对应边的权重系数 ( $s'_{ij}$ ) 表示。基于阈值搜索电网分区就是建立在这个图论思想之上的<sup>[14]</sup>。假设目标分区数为  $N$ ,  $N_k$  为第  $k$  次划分的分区结果,找出  $\mathbf{S}'$  中最大的元素记为  $d = \max_{i,j} (s'_{ij})$ , 对  $\mathbf{S}' = [s'_{ij}]_{n \times n}$  规格化得到矩阵  $\mathbf{M}$ , 即  $\mathbf{M} = [m_{ij}]_{n \times n} = [s'_{ij} / d]_{n \times n}$ , 其元素  $m_{ij} \leq 1$ , 并将  $\mathbf{M}$  用一个图来表示。然后,按从小到大的顺序,对  $\mathbf{M}$  的元素进行排序,得  $pm_1 < pm_2 < \dots < pm_l$ , 其中  $pm_1$  为最小的元素,  $pm_l$  为最大的元素,其余类推;  $t \leq (n(n-1)/2)$ 。具体步骤如下:

(1) 令  $k = 1$ 。

(2) 令  $\alpha_k = pm_k + \varepsilon / 2$ ,  $\varepsilon$  取  $pm_k, pm_2, \dots, pm_l$  中任意两个数之差的最小值。

(3) 构造一个与  $\mathbf{M}$  相对应的约化关联矩阵  $\mathbf{C} = [c_{ij}]_{n \times n}$ , 并满足以下要求: (a) 如果  $m_{ij} = 0$ , 则表示节点  $i$  和  $j$  之间没有连接, 则  $c_{ij} = 0$ ; (b) 如果  $|m_{ij}| \leq \alpha_k$ , 则矩阵  $\mathbf{M}$  的弱连接被切断, 令  $c_{ij} = 0$ ; (c) 对于其它  $m_{ij}$ , 令  $c_{ij} = 1$ ; (d) 置  $c_{ii} = 1$ 。

(4) 将关联矩阵  $\mathbf{C}$  进行分簇<sup>[15]</sup>, 使其变成  $N_k$  个分块对角子阵:  $\mathbf{C} = \text{diag}[\mathbf{C}_q]$ ,  $q = 1, 2, \dots, N_k$ 。

(5) 将矩阵  $\mathbf{M}$  重新排列,写成分块形式,每个子块与矩阵  $\mathbf{C}_q$  的行和列对应。

(6) 如果分区个数  $N_k = N$ , 则分区过程停止, 否则  $k = k + 1$ , 转 (2)。

由第 (5) 步得到的重置矩阵  $\mathbf{M}$  称为  $\mathbf{M}$  的  $\alpha$  解耦。对角块的个数 (或簇数) 依赖于  $\alpha$  取值的大小和网络的特征。在以上步骤中,关键问题是如何分簇,即在约化关联矩阵中找到互相解耦的簇,其详细过程可见文献<sup>[15]</sup>。

若系统较大时, 在  $\alpha$  的取值顺序上, 我们可以先从中取一组, 即取  $\alpha = \alpha_{k/2+1}$  按上述方法对图进行化简, 若划分区域数大于给定值, 说明  $\alpha$  值取得过大, 则取  $k/2+1$  与 1 之间中间一组, 即取  $\alpha = \alpha_{k/4+1}$ ; 若划分区域数小于给定值, 说明  $\alpha$  值取得过小, 则取  $k/2+1$  与  $k$  之间中间一组, 即取  $\alpha = \alpha_{(3k+2)/4}$ , 依此类推, 直到找到满足要求的  $\alpha$  值为止, 这样可以提高分区速度, 节省分区时间。

在根据上述算法获得电网分区后, 还需要根据电网拓扑结构合并节点数少的分区, 并且要避免将变压器支路作为联络线, 得到最终节点分区结果。最后, 再用节点分裂法<sup>[16]</sup>划分各个分区的边界, 从而将原系统分解成若干个规模较小的子系统和一个边界子系统。

### 3 算例分析

以 IEEE118 节点系统和两个实际系统 (538 节点和 1133 节点) 作为试验系统, 检验分区算法的有效性, 该算法在 Visual C++ 环境下实现。

#### 3.1 分区结果

为了与文献[1]的无功优化结果进行比较, 将 IEEE118 节点系统最终分区数调整为 3 个。当  $\alpha = 0.170\ 67$  时, 每个区域所包含的节点数目及节点编号如表 1 所示。表 2 列出了文献[1]给出的 IEEE 118 节点系统每个区域所包含的节点数目及节点编号。

同理, 将 538 节点系统最终分区数调整为 4 个, 当  $\alpha = 0.038\ 554\ 3$  时, 每个区域所包含的节点数目及节点编号如表 3 所示。表 4 列出了文献[1]给出的 538 节点系统每个区域所包含的节点数目及节点编号; 同时将 1133 节点系统最终分区数也调整为 4 个, 当  $\alpha = 0.027\ 153\ 1$  时, 每个区域所包含的节点数目及节点编号如表 5 所示。表 6 列出了文献[1]给出的 1133 节点系统每个区域所包含的节点数目及节点编号。

表 1 118 节点系统分区结果

Tab.1 Partition result of IEEE 118-bus system

区域名称	区域包含节点数	区域所包含的节点
区域 1	48	1-44, 113-115, 117
区域 2	35	45-77, 116, 118
区域 3	35	78-112
区域 4	9	119-127
(边界子系统)		

表 2 文献[1]定义的 118 节点系统分区结果

Tab.2 Partition result of IEEE 118-bus system in reference [1]

区域名称	区域包含节点数	区域所包含的节点
区域 1	35	1-32, 113-115, 117
区域 2	35	33-67
区域 3	48	68-112, 116, 118
区域 4	7	119-125
(边界子系统)		

表 3 538 节点系统分区结果

Tab.3 Partition result of 538-bus system

区域名称	区域包含节点数	区域所包含的节点
区域 1	356	1-22, 27-43, 46-60, 64-67, 71-72, 80, 82, 90-91, 99, 101, 112-115, 129-130, 133-134, 150, 156, 161, 167, 185-186, 191-279, 281, 284, 286, 288, 291, 293, 296-297, 302-303, 306-352, 354-355, 357-360, 363-403, 408, 413-414, 423-491, 525-535
区域 2	76	23-26, 44-45, 61-63, 68-70, 73-79, 81, 83-89, 92-98, 100, 102-111, 116-128, 131-132, 135-146, 514, 516, 518, 520
区域 3	62	280, 282-283, 285, 287, 289-290, 292, 294-295, 298-301, 304-305, 353, 356, 361-362, 404-407, 409-412, 415-422, 498-508, 509, 510, 511, 512-513, 515, 517, 519, 521-522, 523, 524, 536-538
区域 4	44	147-149, 151-155, 157-160, 162-166, 168-184, 187-190, 492-497
区域 5 (边界子系统)	13	539-551

表 4 文献[1]定义的 538 节点系统分区结果

Tab.4 Partition result of 538-bus system in reference[1]

区域名称	区域包含节点数	区域所包含的节点
区域 1	364	12-34, 39-47, 52-54, 57-59, 61-63, 65, 67-190, 208-248, 251-256, 259-265, 270-307, 351-362, 390-422, 437-452, 464, 485-524, 529, 536-538
区域 2	71	1-6, 37-38, 49-51, 56, 363-389, 457-463, 465-484, 525-528, 530
区域 3	64	11, 35-36, 55, 249-250, 257-258, 266-269, 308-350, 453-456, 531-535
区域 4	39	7-10, 48, 60, 64, 66, 191-207, 423-436
区域 5 (边界子系统)	11	539-549

表 5 1133 节点系统分区结果  
Tab.5 Partition result of 1133-bus system

区域名称	区域包含节点数	区域所包含的节点
区域 1	639	7-12, 61-125, 127, 145-150, 152-169, 176-189, 206-286, 304, 306, 309, 364-365, 398-405, 407-409, 411-842
区域 2	134	4-6, 46-60, 141-144, 151, 190-205, 308, 903-996
区域 3	158	13-28, 126, 128-132, 296-303, 305, 307, 310-313, 997-1118
区域 4	202	1-3, 29-45, 133-140, 170-175, 287-295, 314-363, 366-397, 406, 410, 843-902, 1119-1133
区域 5 (边界子系统)	16	1134-1149

表 6 文献[1]定义的 1133 节点系统分区结果  
Tab. 6 Partition result of 1133-bus system in reference[1]

区域名称	区域包含节点数	区域所包含的节点
区域 1	642	1-3, 7-8, 61-125, 145-150, 152-170, 176, 184-195, 206-286, 310-313, 342-385, 398-401, 414-626, 631-634, 639-642, 663-674, 683-742, 747-762, 767-842, 1033-1036, 1120-1123, 1126-1133
区域 2	155	9-28, 126-132, 296-303, 305, 307, 997-1032, 1037-1118
区域 3	205	4-6, 39-60, 138-144, 151, 177-183, 196-202, 204, 308, 627-630, 635-638, 643-662, 675-682, 743-746, 763-766, 877-888, 897-996
区域 4	131	29-38, 133-137, 171-175, 287-292, 294-295, 314-341, 386-389, 391-397, 402-413, 843-876, 889-896, 1119, 1124-1125
区域 5 (边界子系统)	17	1134-1150

从分区结果可以看出，每个区域内都有足够数量的无功储备。此外，这一方法并不需要进行复杂的特征分析，计算速度很快，但随着系统的增大，这种方法容易产生孤立节点。因此，寻求较好的处理孤立节点的方法值得做进一步研究。

值得注意的是， $\alpha$  值的选取并不是连续的，即当  $\alpha = \alpha_i$ 、 $\alpha = \alpha_{i+1}$ 、 $\alpha = \alpha_{i+l}$  时得到的分区是相同的。直到  $\alpha = \alpha_{i+l+1}$  时，分区情况才发生变化，也就是说，并不是每一次  $\alpha$  值的改变都引起分区结果的改变，只有  $\alpha$  取值从一个临界值变为另一个临界值时，才能发生变化。

### 3.2 计算结果比较

按照分区方案的不同，称根据文献[1]给出分区的无功优化计算全过程为 BBDF1，由本文分区的无功优化计算全过程为 BBDF2。所有无功优化算法均采用文献[1]中的分解算法 2。从表 7、表 8、表 9 可以看出，由 BBDF1 和 BBDF2 得到的三个系统的优化结果相差很小。

为了增加清晰度，图 1 和图 2 的纵坐标均取以 10 为底的对数值。其中图例 BBDF1-538 表示根据文献[1]分区方案给出的 538 节点系统的无功优化计算，BBDF2-118 表示根据本文分区方案给出的 118 节点系统的无功优化计算，其他依此类推。

表 7 118 节点系统两种分区方案的优化结果比较

Tab.7 Comparison of optimization results between two partition schemes in 118-bus system

	BBDF1	BBDF2	偏差量
有功损耗	1.167 73	1.171 88	0.004 15
节点 107 的电压幅值	1.024 31	1.024 86	0.000 55
节点 72 的电压相角	-9.006 48	-8.976 24	0.030 24
发电机 61 的无功出力	-0.015 15	-0.017 14	0.001 99
电容 35 的无功出力	0.076 225	0.075 007	0.001 22
变压器 63 的变比	1.013 56	1.012 51	0.001 05

注：表中第一列是从基于两种不同的分区方案得到的各项优化结果中选出的偏差最大的变量；最后一列是第二、三列之差的绝对值，表 8、9 同理。

表 8 538 节点系统两种分区方案的优化结果比较

Tab.8 Comparison of optimization results between two partition schemes in 538-bus system

	BBDF1	BBDF2	偏差量
有功损耗	1.496 36	1.494 12	0.002 24
节点 89 的电压幅值	1.075 71	1.074 36	0.001 35
节点 164 的电压相角	-13.490 9	-13.456 24	0.034 66
发电机 20 的无功出力	1.454 34	1.456 63	0.002 29
电容 91 的无功出力	0.875 29	0.873 68	0.001 61
变压器 524 的变比	1.045	1.032 5	0.012 5

表 9 1133 节点系统两种分区方案的优化结果比较

Tab.9 Comparison of optimization results between two partition schemes in 1133-bus system

	BBDF1	BBDF2	偏差量
有功损耗	5.421 42	5.430 65	0.009 23
节点 372 的电压幅值	1.146 63	1.143 6	0.003 03
节点 641 的电压相角	-10.186	-10.432 14	0.246 14
发电机 111 的无功出力	0.066 539 5	0.067 256	0.000 716 5
电容 263 的无功出力	0.712 886	0.721 68	0.008 794
变压器 216 的变比	0.988 807	0.974 828	0.013 979

从图 1 和图 2 可以看出, BBDF1-118 经过 22 次迭代收敛, 但 BBDF2-118 经过 19 次迭代收敛; BBDF1-538 经过 50 次迭代收敛, 但 BBDF2-538 经过 43 次迭代收敛; BBDF1-1133 经过 60 次迭代收敛, 但 BBDF2-1133 经过 49 次迭代收敛。经过本文分区算法的无功优化计算同根据文献[1]给出分区的无功优化计算的计算效率的对比详见表 10。

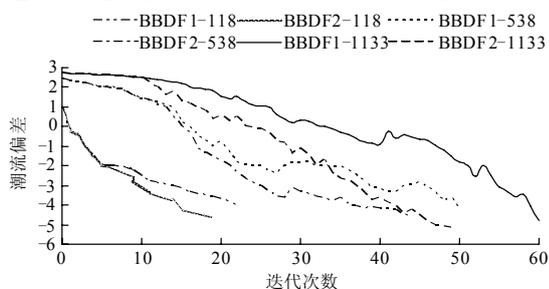


图 1 最大潮流偏差变化轨迹

Fig.1 Trajectories of maximum power-flow mismatch

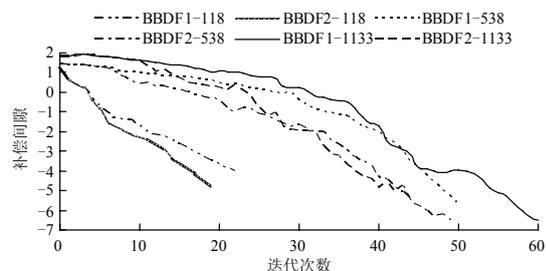


图 2 补偿间隙变化轨迹

Fig.2 Trajectories of complementary gap

表 10 基于两种分区方案的优化计算的效率比较

Tab.10 Comparison of optimization efficiency between two partition schemes

	BBDF1 / 次	BBDF2 / 次	减少的迭代 次数 / 次	提高的 效率 / %
118 节点系统	22	19	3	13.6
538 节点系统	50	43	7	14
1133 节点系统	60	49	11	18.3

注: 表中第二、三列是基于两种不同的分区方案的优化计算收敛时的迭代次数; 第四列是第二列跟第三列的差; 最后一列则是第四列占第二列的百分比。

由表 10 可以得到: 随着系统规模的扩大, 本文提出的分区算法能更好改善算法的收敛性, 从而更明显提高其计算效率, 取得更好效果。

同时也可以清楚地看到: 本文分区算法在一定程度上提高了无功优化计算的效率, 但没有大幅度地提高其效率, 其中重要的原因是为了便于同文献[1]的优化结果作比较, 分区结果一定程度牺牲了子系统间的弱耦合性, 即这样分出来的不同子系统的节点之间并不一定是耦合最弱的。子系统之间耦合较弱时, 显然能更好地提高其收敛性, 但是在这种情况下可能会出现规模比较大的子系统, 所以求解修正方程的时间会增加, 因为总的计算时间主要由边界系统求逆和各个子系统修正方程求解的时间决定。因此, 如何兼顾各分区之间的弱耦合与各子系统的规模, 使得总计算时间最小, 仍然值得做进一步研究。

## 4 结论

在求出节点电压-无功灵敏度基础上, 用基于阈值搜索的分区算法对系统进行分区, 能较好地得到几个规模适当、区域之间耦合较弱的子系统。并应用对角加边的无功优化分解协调算法验证了所提出的分区方案能够进一步提高无功优化计算的效率。

## 参考文献

- [1] 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, MIAO Nan-lin. A decomposition algorithm for multi-area reactive-power optimization based on block bordered diagonal model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (4): 25-29.
- [2] 陈颖, 沈沉, 梅生伟. 基于改进 Jacobian Free Newton-GMRES (m) 的电力系统分布式潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (9): 5-8.  
CHEN Ying, SHEN Chen, MEI Sheng-wei. Distributed power flow calculation based on an improved Jacobian Free Newton-GMRES (m) method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (9): 5-8.
- [3] 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.

- [4] 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.
- [5] 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.  
CHENG Xin-gong, LI Ji-wen, CAO Li-xia, et al. Distributed and parallel optimal power flow solution of electric power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (24): 23-27.
- [6] 程新功, 厉吉文, 曹立霞, 等. 基于电力系统分布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 system[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (10): 109-113.
- [7] 王耀瑜, 张伯明, 孙宏斌, 等. 一种基于专家知识的电力系统电压 / 无功分级分布式优化控制分区方法[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18 (3): 221-224.  
WANG Yao-yu, ZHANG Bo-ming, SUN Hong-bin, et al. An expert knowledge based subarea division method for hierarchical and distributed electric power system voltage / VAR optimization and control[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18 (3): 221-224.
- [8] 刘大鹏, 唐国庆, 陈珩. 基于 Tabu 搜索的电压控制分区[J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (6): 18-22.  
LIU Da-peng, TANG Guo-qing, CHEN Heng. Tabu search based network partition for voltage control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (6): 18-22.
- [9] 郭庆来, 孙宏斌, 张伯明, 等. 基于无功源控制空间聚类分析的无功电压分区[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (10): 36-40.  
GUO Qing-lai, SUN Hong-bin, ZHANG Bo-ming, et al. Power network partition based on clustering analysis in MVAR control space[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (10): 36-40.
- [10] 杨秀媛, 董征, 唐宝, 等. 基于模糊聚类分析的无功电压控制分区[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (22): 6-10.  
YANG Xiu-yuan, DONG Zheng, TANG Bao, et al. Power network partitioning based on fuzzy clustering analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (22): 6-10.
- [11] Yusof S B, Rogers G J, Alden R T H. Slow coherency based network partitioning including load buses[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8 (3): 1375-1382.
- [12] Schlueter R A, Hu I, Changm W, et al. Methods for determining proximity to voltage collapse[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6 (1): 285-292.
- [13] 丁晓群, 黄伟, 章文俊, 等. 基于电压控制区的主导节点电压校正方法[J]. 电网技术, 2004, 28(14): 44-48.  
DING Xiao-qun, HUANG Wei, ZHANG Wen-jun, et al. A pilot bus voltage correction method based on voltage control area[J]. Power System Technology, 2004, 28 (14): 44-48.
- [14] 张忠静, 陈刚, 关仲, 等. 基于阈值搜索和动态分散的电压/无功分区算法[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2006, 29 (12): 52-55.  
ZHANG Zhong-jing, CHEN Gang, GUAN Zhong, et al. Network partitioning based on threshold search and dynamic scatter for voltage / Var control[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2006, 29 (12): 52-55.
- [15] Zarborszky J, Whang Keh-Wen, Huang Garng M, et al. A clustered dynamic model for a class of linear autonomous systems using simple enumerative sorting[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems, 1982, 29 (11): 747-757.
- [16] 张伯明, 陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.  
ZHANG Bo-ming, CHEN Shou-sun. Advance power system analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996.

收稿日期: 2009-10-03; 修回日期: 2009-10-25

作者简介:

陈灿旭 (1982-), 男, 助理工程师, 硕士研究生, 主要从事高压直流输电运行及维护工作; E-mail: chencanxu@sina.com

刘明波 (1964-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统优化、运行与控制。