



基于图分割的潮流计算中的节点优化编号

唐灿¹ 郭睿² 顾黎强² 董树锋¹

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 国网上海浦东供电公司, 上海 200122)

摘要:随着社会的发展, 电网的拓扑结构变得越来越复杂, 电力系统潮流计算的维数也越来越大, 适当的节点优化编号能够有效地加速电力系统的潮流计算。电力网络作为一种无标度的网络, 可以抽象成图来表示各个节点之间的拓扑关系, 为了解决电力系统潮流计算中的节点优化编号问题, 提出了基于图分割算法中的多层次嵌套排序算法进行节点优化编号的方法, 大幅提高了节点优化编号的速度, 能够有效地加速大规模系统的潮流计算, 并以 IEEE14 节点算例为例, 介绍了所提方法的流程。算例结果验证了该算法无论是在速度上还是在内存占用均优于传统方法, 能够更有效地满足大规模电网潮流计算的需求。

关键词:节点优化编号; 图分割; 电力系统计算; 多层次嵌套排序

中图分类号: TM744

文献标志码: A

DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.2017.04.052.07

0 引言

电力系统是一种高维数的无向无标度网络^[1-4]。但是相对于总节点数来说, 电力系统网络的平均节点度相对较低, 其节点平均度通常在 1.80~5.82 之间, 只有极少数节点度很高的节点, 是一种非常稀疏的网络。因此, 在电力系统计算中运用稀疏技术可以大大提高计算速度^[5]。而在对稀疏矩阵进行三角分解时, 往往会产生注入元, 注入元的产生削弱了矩阵的稀疏性, 使得计算的速度变慢。在稀疏矩阵进行 LU 分解或者高斯消去时, 如果能对矩阵进行完美的节点优化编号, 即不产生任何注入元, 那么其计算的时间将大致与矩阵阶数和矩阵非零元数量的乘积成正比。而如果不对其进行节点优化编号, 最坏的情况下, 矩阵的稀疏性将会被完全破坏, 耗时将大大增加, 变成与矩阵阶数的三次方成正比。

目前, 用于节点优化编号的经典的方法有 3 种^[6-7], 即静态优化法 (Tinney-1)、半动态优化法 (Tinney-2)、动态优化法 (Tinney-3)。其他的常见方法还有近似最小度法 (AMD)^[8]、最小度最小长度算法 (minimum degree-minimum length, MD-ML)^[9]、最小度最少前导节点数算法 (minimum degree

minimum number of predecessors algorithm, MD-MNP)^[10]等。另外, 蚁群算法^[11]和遗传算法^[12-13]作为 2 种常见的算法, 也能被运用到节点优化编号中。在配电网中, 还有逆流编号法^[14-15]、树状编号法^[16]、分层编号法^[17-18]等算法可以使用。

在实际工程应用中, 半动态优化法应用最广泛, 对于中小规模的电网而言, 既拥有较好的性能, 又有较快的优化速度。但是由于半动态节点优化法在优化过程中需要进行大量插入和查找的操作, 应用于超大规模的电网时往往出现优化时间过长的问题。其他方案也存在着许多的问题。AMD、MD-ML 和 MD-MNP 本质上与动态或半动态优化法相同, 都存在编号效果与时间的矛盾。蚁群算法和遗传算法虽然拥有较好的效果, 但是在对大型系统进行节点优化编号时, 耗时过长^[19-20]。而逆流编号法虽然不会产生注入元, 但是却只适合于配电网, 应用范围受到很大限制。

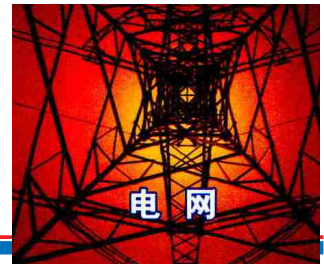
随着电力网络维数不断加大, 省地一体化、地县一体化的进程不断加深, 电力系统潮流计算所需求解方程的阶数大大增加, 有时甚至需要求解数十万阶的潮流方程, 超过了 PSS/E 等很多商业化潮流计算软件所允许的最大阶数。

图分割算法作为图论算法的一种, 无论是在

收稿日期: 2016-11-01

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 资助项目 (2014AA051901); 国家自然科学基金资助项目 (51207136)

作者简介: 唐灿 (1992—), 男, 湖南衡阳人, 硕士研究生, 从事电力系统并行计算研究。E-mail: tangcan@live.cn



分割效果还是速度上都取得了令人满意的效果^[21]。本文将图分割算法中的多层次嵌套排序引入到电力系统潮流计算中的节点优化编号，用于加速潮流计算，取得了较好的效果。

1 基于图分割的优化编号

在电力系统潮流计算中，无论是采用直角坐标下的牛拉法还是极坐标下的牛拉法，计算时所产生的 Jacobian 矩阵的非零元都具有对称性。因此，Jacobian 矩阵可以用一个无向图 V 进行描述。在对 Jacobian 矩阵进行高斯消去时，每消去一行，都对无向图 V 消去一个顶点。当无向图中的一个顶点被消除后，与之相邻的顶点之间将会形成一个完全的子图，这个完全子图中边的数量与顶点消去前，这些顶点间边的数量之差就是对矩阵使用高斯消去法消去一行所产生的注入元。逐一消去各个顶点，计算每步消去时多产生的边的数量，将它们相加，就是高斯消去法所产生的注入元数量。相比较于高斯消去法，LU 分解法是更常用的求解线性方程组的方法，但与高斯消去法原理相同，将产生数量和位置相同的注入元。因此在对矩阵进行节点优化编号时，可以将它转换为所对应的图，然后使用图论算法进行优化编号。

在图论算法中，最小度排序、极小消去排序、多层次嵌套排序都可以对图进行节点优化编号。最小度排序法与半动态节点优化编号基于相同原理，在面对大规模系统时，需要消耗大量的时间。极小消去排序需构建三角图，在面对极度稀疏的 Jacobian 矩阵时，需要增加很多的边来完成三角化，会破坏原矩阵的稀疏性，大幅降低优化的速度。而多层次嵌套排序相比较之前的 2 种办法，拥有如下优势：(1)能够充分利用 Jacobian 矩阵的稀疏性，优化速度十分理想；(2)非常适合并行处理，在将图分割成子图时，每个子图都相互独立，可以并行优化。因此，选择多层次嵌套排序对潮流计算的 Jacobian 矩阵进行节点优化编号。

2 潮流计算中的多层次嵌套排序

2.1 针对 Jacobian 矩阵的节点优化编号

在电力系统潮流计算中，求解所需的 Jacobian 矩阵的每个 2×2 小矩阵块的稀疏结构与导纳阵相

似，为了加速优化的速度，简化优化的过程，通常是根据导纳阵来进行编号。这种方法可以减少节点优化编号的时间，但是在减少注入元方面并没有做到最优。主要问题有 2 个：(1)若将矩阵的每个元素用 2×2 的小矩阵块代替后，LU 分解时将产生 4 倍于之前的注入元，并非最优，重新编号可减少注入元。(2)不同类型节点所对应的方程数量不同，Jacobian 矩阵的每个 2×2 小矩阵块的稀疏结构与导纳矩阵并不完全相同。考虑节点类型的节点优化方法^[22]虽然考虑了 PV、PQ 和平衡节点间的不同，但是仍然只是根据原电力系统网络拓扑来进行编号，相比较传统方法提升有限。

经过算例验证，对 Jacobian 矩阵的节点优化编号效果要比对导纳矩阵的节点优化编号所产生的注入元少。

由于 Jacobian 矩阵阶数更高，需要一种优化速度非常快的算法，对 Jacobian 矩阵进行节点优化编号时不会浪费太多时间，并且在编号效果上能够满足需求。

Jacobian 矩阵在每次潮流计算的迭代中其非零元的位置不会发生变化，可以直接通过导纳矩阵计算出 Jacobian 矩阵的非零元位置，在潮流计算迭代求解前，就完成对 Jacobian 矩阵的节点优化编号。

2.1.1 极坐标下 Jacobian 矩阵所对应的无向图

在极坐标下的牛拉法潮流计算中，每个 PQ 节点有 2 个变量 $\Delta\theta_i$ 和 ΔU_i 待求，对应 2 个方程；每个 PV 节点有一个变量 $\Delta\theta_i$ 待求，对应一个方程；平衡节点无待求变量，无对应方程。在对应到无向图时，每个 PQ 节点对应无向图中的 2 个节点，每个 PV 节点对应无向图中的一个节点，而平衡节点由于电压和相角已知，将不对应无向图中的节点。Jacobian 矩阵所对应的图可以由原系统简化图转换得到。转换方法为：(1)去掉平衡节点以及与平衡节点相连的边；(2)在每个 PQ 节点边新建一个新的节点，并将该节点与原 PQ 节点以及原 PQ 节点相连的节点相连。

2.1.2 直角坐标下 Jacobian 矩阵所对应的无向图

在直角坐标下的牛拉法潮流计算中，每个 PQ 节点有 2 个变量 Δe_i 和 Δf_i 待求，对应 2 个方程；每个 PV 节点也有 2 个变量 Δe_i 和 Δf_i 待求，对应 2 个方程；平衡节点无待求变量，无对应方程。在对应到无向图时，每个 PQ 和 PV 节点对应无向图



中的 2 个节点,平衡节点不对应无向图中的节点。由于每个 PQ 节点所对应的 Jacobian 矩阵的 2 行所对应的非零元所在列相同,Jacobian 矩阵所对应的图,可以由原系统简化图转换得到。转换方法为:(1)去掉平衡节点以及与平衡节点相连的边;(2)在每个 PQ 和 PV 节点边新建一个节点,并将该节点与原节点以及与原节点相连的节点相连。

以 IEEE14 节点为例,IEEE14 节点系统的简化图如图 1 所示,而 IEEE14 节点在进行极坐标下的牛拉法潮流计算时的 Jacobian 矩阵对应的图如图 2 所示。

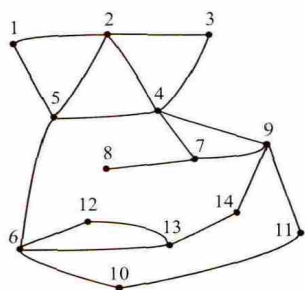


图 1 IEEE14 节点系统简化图

Fig.1 Simplified connective graph of IEEE 14 buses system

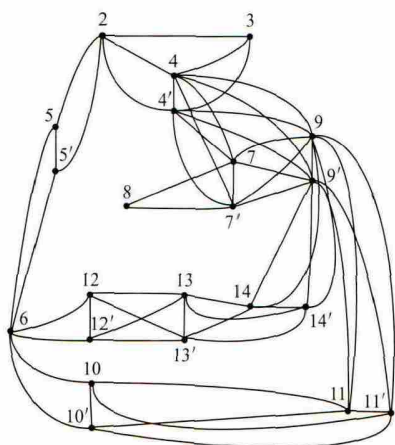


图 2 IEEE14 节点极坐标下 Jacobian 矩阵对应的无向图

Fig.2 The corresponding undirected graph of the Jacobian matrix of IEEE 14 buses system under the polar coordinate

2.2 多层次嵌套排序算法

多层次嵌套排序算法的主要原理是:寻找图的顶点分割子,将顶点分割子以及与之相邻的边去掉之后,图将被分成不相连的 2 部分。此时对这 2 个不相连的 2 个部分中的任意一个部分中的顶点进行消去时,都不会在另一部分中产生新的

边。因此应该先对不相连的 2 个部分中的顶点进行编号,最后对顶点分割子进行编号,以减少注入元数量。而在对不相连的 2 部分进行编号时,同样可以递归调用多层次嵌套排序。

多层次嵌套排序的主要算法如下。

(1) 利用满足最小顶点覆盖的 2 路顶点分割算法将图分割成子图 V_1 和子图 V_2 , 确定顶点分割子(Vertex Separator) V_s , 使顶点分割子数量最少。

(2) 先对子图 V_1 进行编号, 再对子图 V_2 进行编号, 最后对顶点分割子 V_s 进行编号。

(3) 对子图 V_1 和子图 V_2 进行编号时, 同样递归调用多层次嵌套排序, 分别找出子图 V_1 和子图 V_2 的顶点分割子。

3 优化过程

为了验证多层次嵌套排序算法在节点优化编号上的效果, 本文以 IEEE14 节点系统为例, 演示多层次嵌套排序的过程。

(1) 对 IEEE14 节点系统进行 2 路顶点分割, 其中, 满足使顶点分割子数量最少的划分如图 3 所示。其中顶点分割子 $V_{s1}=\{6\}$, $V_{s2}=\{9, 9'\}$, $V_1=\{10, 10', 11, 11', 12, 12', 13, 13', 14, 14'\}$, $V_2=\{2, 3, 4, 4', 5, 5', 7, 7', 8\}$ 。在进行编号时, 子图 V_1 和子图 V_2 应优先编号, 节点 6, 9', 9 应最后编号, 分别将他们编号为 20, 21, 22。

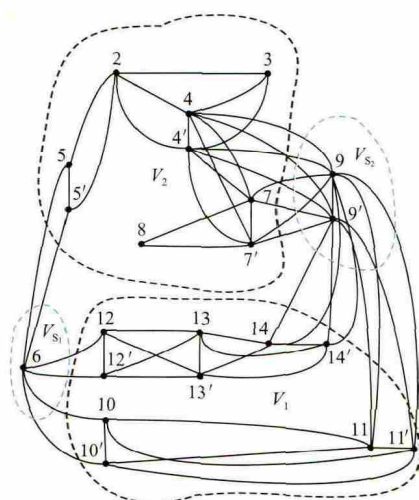
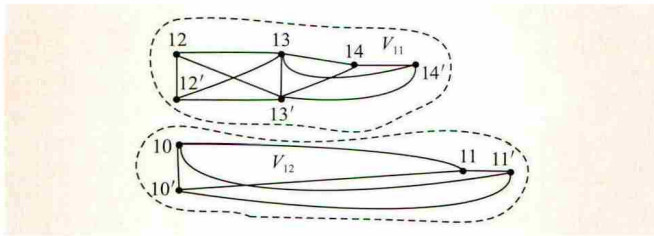
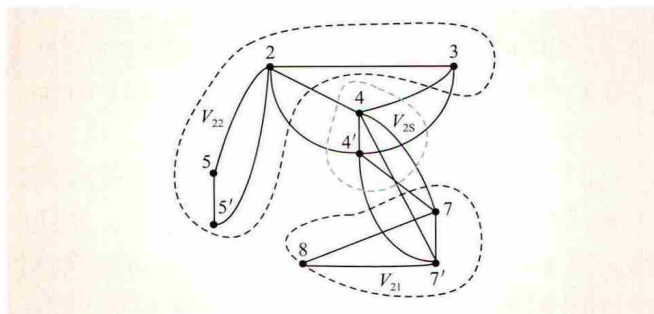


图 3 IEEE14 节点系统极坐标下 Jacobian 矩阵对应图的 2 路顶点分割结果

Fig.3 2-way vertex partition result of the graph corresponding to Jacobian matrix of IEEE 14 buses system under the polar coordinate



(2) 分别对子图 V_1 和子图 V_2 进行图分割。其中的 V_1 分割结果如图 4 所示, V_2 分割结果如图 5 所示。对于子图 V_1 , 无需去掉顶点分割子就已经是相互分离的两部分, 故可以直接得到子图 V_{11} 和子图 V_{12} 。对于子图 V_2 应当先编子图 V_{21} 和子图 V_{22} , 最后编 V_{25} 。 V_{25} 包括节点 4, 4', 应编号为 18, 19。

图 4 子图 V_1 顶点分割结果Fig.4 Vertex partition result of subgraph V_1 图 5 子图 V_2 顶点分割结果Fig.5 Vertex partition result of subgraph V_2

(3) 继续对子图 V_{11} 、 V_{12} 、 V_{21} 、 V_{22} 进行多层次嵌套排序, 最终结果如表 1 所示。

表 1 IEEE14 节点系统多层次嵌套排序结果

Table 1 Nested dissection ordering result of IEEE 14 buses system

初始编号	2	3	4	4'	5	5'	6	7
新编号	17	16	18	19	15	14	20	13
初始编号	7'	8	9	9'	10	10'	11	11'
新编号	12	11	22	21	6	5	7	8
初始编号	12	12'	13	13'	14	14'		
新编号	3	4	10	9	1	2		

对 IEEE14 节点在极坐标下的牛拉法潮流计算时的 Jacobian 矩阵进行多层次嵌套排序后, 其非零元位置如图 6 所示。进行 LU 分解时, 以 U 矩阵为例, 注入元位置如图 7 所示。

由图 7 可知, 采用多层次嵌套排序可以有效地减少注入元的数量。

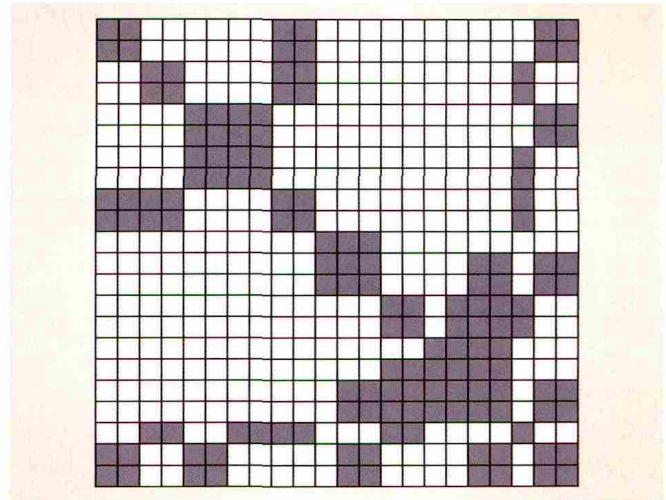


图 6 IEEE14 节点系统多层次嵌套排序后非零元位置

Fig.6 The non-zero elements location of IEEE 14 buses system after optimized by nested dissection ordering algorithms

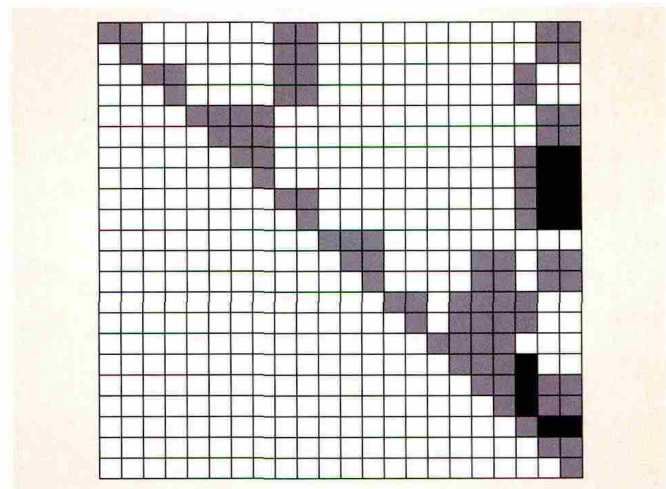


图 7 IEEE14 节点系统进行多层次嵌套排序后, 其注入元的位置

Fig.7 Input elements location of IEEE 14 buses system after optimized by nested dissection ordering algorithm

4 算例分析

4.1 针对 Jacobian 矩阵和原系统简化图进行节点优化编号

表 2 统计了对不同系统简化图和其 Jacobian 矩阵对应的图进行多层次嵌套排序后, 在进行 LU 分解时的注入元数量。其中算例 CASE1648 和 CASE7917 来自 PSS/E 软件, 其余均来自 IEEE。从表 2 可以看出, 对潮流计算进行节点优化编号时, 针对 Jacobian 矩阵对应的图进行优化编号, 其效果好于对系统简化图的节点优化编号, 能够



表 2 对系统简化图和 Jacobian 矩阵进行优化编号时的注入元数量

Table 2 The number of input number when the connective simplified graph and the Jacobian matrix optimized

算例	节点数	Jacobian 矩阵维数	注入元数量		注入元减少比例/%
			对系统简化图进行优化	对 Jacobian 矩阵对应图进行优化	
CASE4	4	5	0	0	0
CASE14	14	22	16	13	18.75
CASE30	30	53	70	60	14.28
CASE57	57	106	296	215	27.36
CASE118	118	181	255	212	16.86
CASE300	300	530	1 250	1 093	12.56
CASE1648	1 648	2 982	19 663	15 846	19.41
CASE7917	7 917	14 508	94 347	78 737	16.54

减少 12.56%~27.36%的注入元。

4.2 多层次嵌套排序优化效果

图 8 统计了在对不同算例进行极坐标下潮流计算时的 Jacobian 矩阵在分别进行半动态节点优化编号与多层次嵌套排序之后的注入元数量。使用算例仍然来自 IEEE 标准算例以及 PSS/E。从图 8 可以看出，多层次嵌套排序的注入元数量与算例的节点数基本成正比，并且与半动态节点优化编号效果接近。

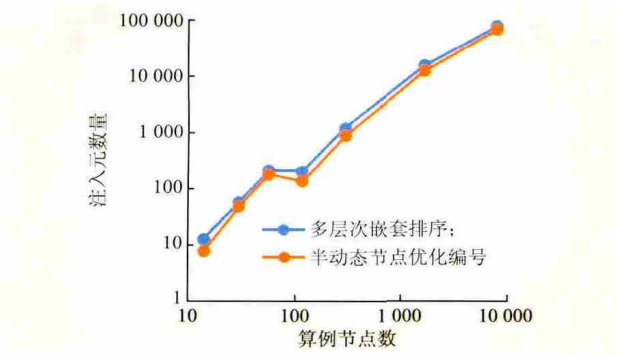


图 8 多层次嵌套排序与半动态节点优化编号注入元数量对比

Fig.8 The input number of Jacobian matrix after optimized by nested dissection ordering and Tinney-2

4.3 多层次嵌套排序优化速度

为了测试多层次嵌套排序的优化速度，同样选取上述算例进行测试并与半动态节点优化编号进行对比。为了充分比较二者应用于大规模系统时的速度差异，还将多个 IEEE300 节点的平衡节

点拼合在一起组成高阶系统测试该算法的表现。CASE29901 与 CASE89701 分别由 100 个和 300 个 IEEE300 节点算例拼合而成。测试环境如下：CPU Intel(R) Core(TM) i7 5820K 3.3 GHz，内存 16 GB，操作系统 Windows Sever 2012R2，编译环境 Visual Studio 2013，使用的是 C++ 编译的串行版的程序，所消耗的时间如图 9 所示。

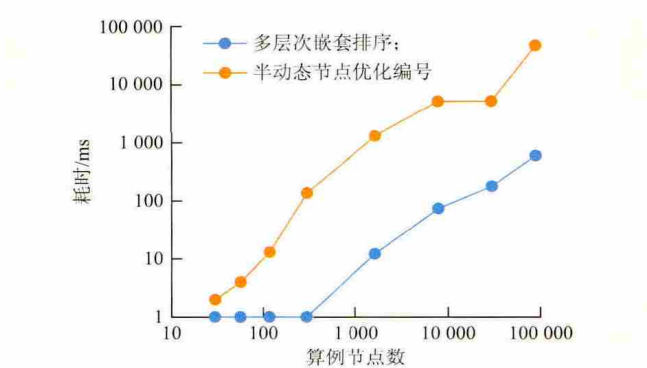


图 9 多层次嵌套排序与半动态节点优化编号所消耗时间
Fig.9 The time cost of nested dissection ordering and Tinney-2

由图 9 可知，本文所提方法计算速度相比较于半动态节点优化编号有着明显的优势，并且在高阶算例上表现更为出色，即使对 89 701 阶的系统进行节点优化编号，程序所消耗的时间也不过 589 ms，相对于半动态节点优化编号提升近 100 倍，并且所占用的内存仅不到 10 MB，具有较高的空间使用效率。

5 结论

将多层次嵌套排序引入到电力系统节点优化编号中，通过递归寻找顶点分割子来进行排序，不仅计算的时间复杂度低，而且非常适合并行处理，在大规模系统的节点优化编号中，拥有很大的速度优势。算例的排序结果表明：(1)与传统针对电网拓扑图的编号方法相比，针对 Jacobian 矩阵对应的无向图进行优化编号能更加有效地减少非零元数量；(2)基于多层次嵌套排序无论是计算速度、内存占用还是排序效果都能满足大规模电网潮流计算的要求，具有工程应用的潜力。

参考文献：

[1] 史进,涂光瑜,罗毅. 电力系统复杂网络特性分析与模型改进



- [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 93-98.
- SHI Jin, TU Guangyu, LUO Yi. Complex network characteristic analysis and model improving of the power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(25): 93-98.
- [2] 陈国章, 向兵, 姜炜超, 等. 基于无标度网络的电力系统模型及优化[J]. 电测与仪表, 2010, 47(S1): 39-42.
- CHEN Guozhang, XIANG Bing, JIANG Weichao, *et al.* A collaboration model of power system based on scale-free networks [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2010, 47 (S1): 39-42.
- [3] 王光增, 曹一家, 包哲静, 等. 一种新型电力网络局域世界演化模型[J]. 物理学报, 2009, 58(6): 3597-3602.
- WANG Guangzeng, CAO Yijia, BAO Zhejing, *et al.* A novel local-world evolving network model for power grid [J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(6): 3597-3602.
- [4] 丁理杰, 曹一家, 刘美君. 复杂电力网络的连锁故障动态模型与分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(4): 641-646.
- DING Lijie, CAO Yijia, LIU Meijun. Dynamic modeling and analysis on cascading failure of complex power grids [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2008, 42(4): 641-646.
- [5] 颜伟, 黄正波, 余娟, 等. 牛顿法潮流计算的高效综合稀疏技术[J]. 中国电力, 2010, 43(7): 19-23.
- YAN Wei, HUANG Zhengbo, YU Juan, *et al.* Integrated sparse technique of Newton power flow calculation [J]. Electric Power, 2010, 43(7): 19-23.
- [6] ALSAC O, STOTT B, TINNEY W F. Sparsity-oriented compensation methods for modified network solutions [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, 102(5): 1050-1060.
- [7] TINNEY W F. Citation classic-direct solutions of sparse network equations by optimally ordered triangular factorization[J]. Current Contents/Engineering Technology & Applied Sciences, 1979(18): 12.
- [8] DAVIS T A, GILBERT J R, LARIMORE S I, *et al.* A column approximate minimum degree ordering algorithm [J]. ACM Transactions on Mathematical Software, 2004, 30(3): 353-376.
- [9] GOMEZ-EXPOSITO A, FRANQUELO L G. An efficient ordering algorithm to improve sparse vector methods [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(4): 1538-1544.
- [10] BETANCOURT R. An efficient heuristic ordering algorithm for partial matrix refactorization [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(3): 1181-1187.
- [11] 彭春华, 徐雪松. 基于蚁群算法的电力网络节点编号多方案优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(2): 60-65.
- PENG Chunhua, XU Xuesong. Electric power network node numbering multi-scheme optimization based on ant colony algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2007, 19(2): 60-65.
- [12] 罗军, 于歆杰. 基于遗传算法的稀疏节点优化编号方法[J]. 电网技术, 2006, 30(22): 54-58.
- LUO Jun, YU Xinjie. Sparsity node ordering technology based on genetic algorithms [J]. Power System Technology, 2006, 30(22): 54-58.
- [13] 王立峰, 武哲. 单亲遗传算法在有限元网格节点编号优化问题中的应用[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(3): 456-460.
- WANG Lifeng, WU Zhe. Optimal scheme of node labels in finite element mesh by partheno-genetic algorithm [J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(3): 456-460.
- [14] 蔡中勤, 郭志忠. 基于逆流编号法的辐射型配电网牛顿法潮流[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 14-17.
- CAI Zhongqin, GUO Zhizhong. Newton load flow for radial distribution network based on upstream labeling technique [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 14-17.
- [15] 蔡中勤, 郭志忠, 陈学允. 辐射状配电网的逆流编号法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(24): 16-19.
- CAI Zhongqin, GUO Zhizhong, CHEN Xueyun. Upstream bus-labeling technique for radial distribution networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(24): 16-19.
- [16] LUO G X, SEMLYEN A. A efficient load flow for large weakly meshed networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(4): 1309-1316.
- [17] SHIRMOHAMMADI D, HONG H W, SEMLYEN A, *et al.* A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(2): 753-762.
- [18] ZHANG F, CHENG C S. A modified Newton method for radial distribution system power flow analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(1): 389-396.
- [19] 杨启文, 蒋静坪, 张国宏. 遗传算法优化速度的改进[J]. 软件学报, 2001, 12(2): 270-275.
- YANG Qiwen, JIANG Jingping, ZHANG Guohong. Improving optimization speed for genetic algorithms [J]. Journal of Software, 2001, 12(2): 270-275.
- [20] 黄翰, 郝志峰, 吴春国, 等. 蚁群算法的收敛速度分析[J]. 计算机学报, 2007, 30(8): 1344-1353.
- HUANG Han, HAO Zhifeng, WU Chunguo, *et al.* The convergence speed of ant colony optimization [J]. Chinese Journal of Computers, 2007, 30(8): 1344-1353.



- [21] 林济铿,王旭东,李胜文,等. 基于含连通图约束的背包问题的图分割方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(10): 134–141.

LIN Jikeng, WANG Xudong, LI Shengwen, *et al.* Graph partitioning method based on connected graph constrained knapsack problem [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(10): 134–141.

- [22] 韩平,刘嘉超,周欢,等. 考虑节点类型的节点优化方法改进[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(11): 50–54.

HAN Ping, LIU Jiachao, ZHOU Huan, *et al.* Improvement of node optimizing with node type considered [J]. Power System and Clean Energy, 2010, 26(11): 50–54.

(责任编辑 李博)

Node Ordering in Power Flow Calculation Based on Graph Partitioning Algorithm

TANG Can¹, GUO Rui², GU Liqiang², DONG Shufeng¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. State Grid Shanghai Pudong Electric Power Supply Company, Shanghai 200122, China)

Abstract: With the development of society, the topology of power grid is becoming more and more complex, and the dimension of power flow calculation is growing accordingly. Against this background, appropriate node ordering is needed to effectively accelerate the power flow calculation. As a scale-free network, the power system network can be abstracted into a graph to represent the topological relations between the various nodes. To solve the problem of node ordering, this paper presents a method based on dissection ordering algorithms to optimize node number, which can accelerate the speed of node ordering and power flow calculation of large scale system. Based on an example of IEEE 14-bus system, the process of the proposed method is described. The simulation results show that the speed and effectiveness of the proposed algorithm can satisfy online computing requirements.

This work is supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2014AA051901) and National Natural Science Foundation of China (No. 51207136).

Keywords: node ordering; graph partitioning; power system calculation; nested dissection ordering algorithms

(上接第 16 页)

ZENG Ming, MA Xiangchun, YANG Lingling. Design and analysis of adjustable carbon emissions allocation mechanism in electricity market [J]. Power System Technology, 2010, 34(5): 141–145.

- [7] 张森林,孙延明. 基于节能发电调度的两部制上网电价机制设计[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1304–1310.

ZHANG Senlin, SUN Yanming. Design of two-part grid purchase price mechanism based on energy conservation generation dispatching[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1304–1310.

(责任编辑 辛培裕)

Mechanism Design of on-Grid Electricity Considering Carbon Emissions

LIU Dingyi¹, YE Ze², ZHANG Xinhua²

(1. Central China Grid Company Limited, Wuhan 430074, China;

2. Changsha University of Science & Technology, School of Economics & Management, Changsha 410014, China)

Abstract: The existing quantity of on-grid electricity of electricity suppliers is mainly determined according to the proportion of its generation capacity, but the on-grid electricity tariff is the unified benchmark price. Based on the principle of minimum total generation cost under the constraint of carbon emissions, this paper designs the allocation mechanism of on-grid electricity quantity and its tariff mechanism in oligopoly power market, and makes a comparison with the existing on-grid electricity mechanism. The results show that: (1) the new mechanism can encourage electricity suppliers to report their true cost types to ensure the implementation of the minimum total generation cost under the constraint of carbon emissions; (2) compared to the existing mechanisms, the new mechanism can help to reduce carbon dioxide emissions, and save the total generation cost at the same level of carbon emissions; (3) the new mechanism gives priority to low-emission electricity suppliers, which can help to make the high-emission units gradually exit the market.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 71271033) and Major Projects of the National Social Science Fund (No. 12&ZD051).

Keywords: on-grid mechanism; carbon emission reduction; mechanism design; electricity market