

Matpower在多节点电力系统潮流计算中的应用

Matpower是解决电力潮流和优化潮流的软件，为验证Matpower在电力系统潮流的可靠性和准确性，选取支路含有变压器的4节点电力系统进行潮流分析，同时运用成熟的经典牛顿法对同一模型进行计算，将两者的计算结果进行对比。结果表明，Matpower潮流计算软件潮流计算结果准确可靠，各节点电压的幅值误差控制在5%以内，角度误差都控制在10%以内，平衡节点功率误差控制在6%以内。最后通过Matpower解决14节点系统的潮流问题。

吴海东 任晓明/上海电机学院电气学院



吴海东/硕士研究生

关键词/Keywords

牛顿法 ·
潮流仿真软件 ·
潮流计算 ·
节点电压 ·

Matpower是一个基于Matlab M文件的软件包，用来解决电力潮流和优化潮流的问题。Matpower作为开源软件，设计理念是用简单、易懂和可更新的代码来实现最优秀的功能。文献[1]介绍了Matpower的基本操作方法，并通过实际分析和计算，说明了Matpower在电力系统分析中的优越性，同时介绍了Matpower应用简易、计算准确度高、准确快速和直观明了等特点，并以西南油气田某采气场配电网井区3号线为例来对其电网潮流情况进行分析。文献[2]介绍了一种基于逐步倒推法结合Matpower潮流计算的地市级电网网架规划方法，应用逐步倒推法，结合Matpower软件进行潮流分析，用有效性指标的比较来确定最终网架规划方案，使其满足经济性、安全性，并利用该方法对2015年荆门市电网220 kV主网架进行规划分析，实践证明该方法具有可行性。牛顿法作为潮

上海市自然科学基金(12ZR1411700)，上海市教委
优秀项目(ZZSDJ12003)。

流计算传统方法，而牛顿二阶法和快速解耦法是牛顿法在直角坐标和极坐标下发展最成功的两种算法，其中牛顿二阶法是包含二阶导数的牛顿-拉夫逊潮流算法，称为准确修正方程计算法，该算法较快速解耦法用于解决牛顿法的初值问题更具优点，因为它与牛顿法的连接非常方便，且编程简单^[3]。文献[4]提出了电流注入型牛顿潮流新算法，是在传统牛顿法思想的基础上，经过变形得到的一种新方法，它保留了牛顿-拉夫逊法二阶收敛的性质，雅克比矩阵以导纳阵为基础，迭代过程中只需要更新主对角线上的元素，在很大程度上提高了传统牛顿法的运算速度。本文对支路含有变压器4节点的电力系统潮流问题进行分析，并通过Matpower软件里的牛顿法解决4节点电力系统潮流问题，最终通过和经典牛顿法比较，表明Matpower软件潮流计算结果准确可靠，并指出Matpower软件中的改进之处，最后利用Matpower解决14节点系统的潮流实际问题。

Matpower软件介绍

Matpower是一个用Matlab的M文件编写，用来解决电力系统潮流计算和优化潮流计算的软件包，目前最新版本是Matpower4.1。Matpower是以经典的潮流算法为软件基础编写代码，提供M文件格式，只要根据算例的信息输入就可以算出结果。但Matpower也存在不足之处，在运算方面只能计算静态潮流，对于风力系统中时变系统无法计算随

着时间变化的潮流，在以后的工作中有待开发、更新。

在进行潮流计算之前，首先要设置电网的各种参数（如基准容量、母线、线路和发电机等）写成Matpower所用的数据文件格式。每一个电网用变量名为“mpc”的结构体（Structures）来定义，mpc的不同字段用Base、Bus、Branch和Gen等来定义和返回电网的具体参数。Bus矩阵用来设置电网中各母线，参数如表1所示。Gen矩阵用来设置接入电网中的发电机参数，如表2所示。Branch矩阵用来设置电网中各支路参数，如表3所示。

表1 Bus矩阵

Bus_i	type	P_d	Q_d	Base/kV	V_m	V_a
母线编号	母线类型	母线注入有功功率	母线注入无功功率	基准电压	母线电压幅值	母线相角初值

表2 Gen矩阵

Bus	P_g	Q_g	V_g	mBase	Status
电源母线编号	电源有功功率	电源无功功率	电源工作电压	电源功率基准	电源工作状态

表3 Branch矩阵

fBus	tBus	R, X, B	Ratio	Angle	Status
支路起点	支路终点	电阻，电抗，电纳	支路电压比	相位角	支路工作状态

设置完成后，要采用向量“mpoption”来达到对选项的控制。选项向量中有潮流计算方法如牛顿法、快速解耦法（XB版本和BX版本）和高斯—赛德尔法，变量名是PF_ALG。通过Matpower选用牛顿法对案例进行潮流计算。通过变量名“PF_MAX_IT”设置牛顿法的迭代次数，本案例设置迭代次数为5次。

算例分析

本文引用了4节点系统^[5-8]，如图1所示。各元件参数的标幺值，如表4所示。系统中，节点功率、电压参数和节点类型，如表5所示。误差系数 $\varepsilon = 10^{-5}$ 。

4节点系统在Matpower各项参数按上述方法设置，电网中各母线参数如表6所示。接入电网中的发电机参数如表7所示。电网中各支路参数如表8

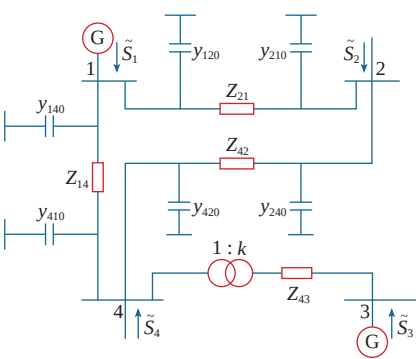


图1 4节点系统图

表4 支路元件参数

支路	阻抗	导纳	电压比
1—2	$0.08 + j0.40$	$j0.014\ 13$	1
1—4	$0.12 + j0.50$	$j0.019\ 20$	1
2—4	$0.10 + j0.40$	$j0.015\ 28$	1
3—4	$j0.3$	0	1.1

表5 节点功率和电压参数

节点	类型	有功功率	无功功率	电压	相角
1	平衡			1.05	0
2	PQ	-0.55	-0.13		
3	PV	0.5		1.10	
4	PQ	-0.30	-0.18		

所示。基准容量为100 MV·A。

表6 Bus矩阵

节点	型号	有功功率	无功功率	电压幅值	相角
1	平衡	0	0	1.05	0
2	PQ	55	13	1	0
3	PV	0	0	1.10	0
4	PQ	30	18	1	0

表7 Gen矩阵

节点	P	Q	发电机工作电压	mBase（功率基准）
1	0	0	1.05	100
3	50	0	1.1	100

表8 Branch矩阵

线路	R	X	B	支路电压比	支路相角
3—4	0	0.247 9	0	1.1	0
4—2	0.1	0.4	0.030 56	0	0
4—1	0.12	0.5	0.038 4	0	0
1—2	0.08	0.4	0.028 26	0	0

通过运行得出结果如表9所示。

表9 Matpower运行结果

节点	幅值	角度	1节点功率
$\dot{U}_1$	1.050	0	$0.367\ 9 + j0.264\ 7$
$\dot{U}_2$	0.965	-6.450	
$\dot{U}_3$	1.100	6.731	
$\dot{U}_4$	0.985	-0.500	

在设置支路矩阵时，由于3节点到4节点支路存在电压比1：1.1，根据Matpower设置格式要将 Z_{43} 换算到支路左侧才能确保软件对系统的正确运行。

牛顿法验证实现

对于n节点电力系统，运用牛顿型潮流计算是根据节点功率方程式 $U_i \sum_{j=1}^n Y_{ij} U_j^* = P_i + jQ_i$ 经过化简和对电压求偏导得出修正方程式。而潮流计算的核心问题是修正方程式的建立和求解^[9-11]。修正方程式为

$$\begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta P \\ \Delta U^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H & N \\ J & L \\ H & N \\ R & S \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta f \\ \Delta e \\ \Delta f \\ \Delta e \end{pmatrix} \quad (1)$$

要建立系数矩阵（雅可比矩阵）先要确定系统的Y矩阵，再将电压初始值代入就可以求出雅可比矩阵中H、N、J、L、R和S矩阵。由已知 PQ节点和PV节点的注入有功功率，PQ节点的注入无功功率，PV节点的电压大小，求出注入功率和节点电压平方的不平衡量 ΔP_i 、 ΔQ_i 和 ΔU_i^2 。

最后通过高斯消去法求得各节点电压实部和虚部的变化量，与程序初始所设置的迭代准确度进行比较，未达到将修正前各节点电压加上电压变化量得出修正后电压重新迭代，达到准确度要求，最后求得各节点的电压大小和角度，如图2所示。

通过 $\tilde{S}_s = U_s \sum_{j=1}^{j=n} Y_{sj} U_j^*$ 可以求得各节点的注入功率，在Matlab中编写程序可以求得各节点注入功率，如图3所示。平衡节点无功功率、有功功率和各节点电压结果如表10所示。

误差分析

由表11可以看出，Matpower算出各节点电压

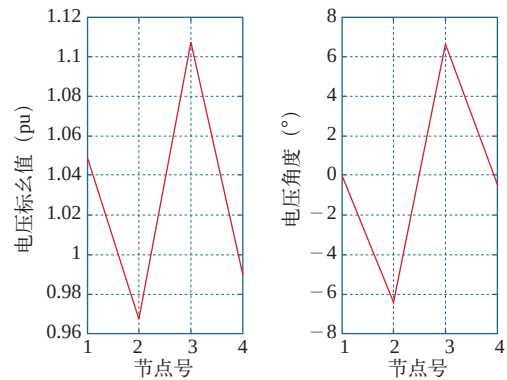


图2 牛顿法节点电压结果

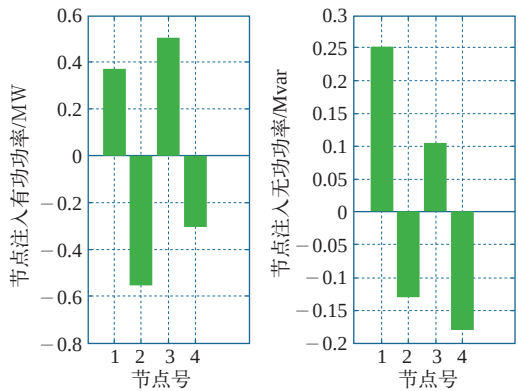


图3 牛顿法节点注入功率

表10 牛顿法运行结果

	幅值	角度	平衡节点功率
$\dot{U}_1$	1.050 0	0	
$\dot{U}_2$	0.966 9	-6.449 5	$0.367\ 5 + j0.251\ 1$
$\dot{U}_3$	1.107 3	6.600 5	
$\dot{U}_4$	0.988 6	-0.554 9	

表11 Matpower与经典牛顿方法比较误差

(单位：%)

节点	电压幅值	电压角度	有功功率	无功功率
1	0	0	1.088	5.416
2	0.197	0.008		
3	0.659	1.977		
4	0.364	9.894		

结果误差很小，都控制在10%以内。4节点相角和1节点的无功功率误差比较大，是由于无功较小，所以误差波动较大。误差的原因还与Matpower在每次迭代过程中结果取到3位小数有关，所以准确度不够，有待提高。由此可以得出，Matpower在潮流计算方面的准确可靠性，为多节点的复杂电

力系统潮流计算做好验证工作。

实例运用

通过上述含有变压器4节点系统验证Matpower解决潮流计算具有准确性和可靠性，可运用Matpower解决多节点复杂电力系统问题。对于多节点系统潮流问题运用Matlab编写程序比较复杂，而Matpower操作简单，流程清晰，免去了编程问题。以下使用Matpower解决如图4所示的14节点电力系统的潮流问题。图4中，所有支路的变压器电压比均为1。

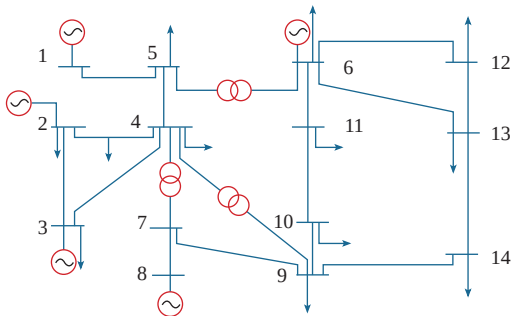


图4 14节点电力系统

节点功率、电压、注入功率和各支路元件参数如表12、表13所示。

表12 节点功率、电压和注入功率参数

节点	类型	有功功率	无功功率	电压	相角	注入有功功率	注入无功功率
1	平衡	0	0	1.06	0	232.4	-16.9
2	PV	21.7	12.7	1.045		40	42.4
3	PV	94.2	19	1.01		0	23.04
4	PQ	47.8	-3.9				
5	PQ	7.6	1.6				
6	PV	11.2	7.5	1.07		0	12.2
7	PQ	0	0				
8	PV	0	0	1.09		0	17.4
9	PQ	29.5	16.6				
10	PQ	9	5.8				
11	PQ	3.5	1.8				
12	PQ	6.1	1.6				
13	PQ	13.5	5.8				
14	PQ	14.9	5				

按照上述Matpower设置要求输入节点功率、电压、注入功率和支路元件数据，可以得出表14

表13 支路元件参数

支路	阻抗	导纳	支路	阻抗	导纳
1-2	0.019 38+j0.059 17	j0.052 8	6-11	0.094 98+j0.198 9	0
1-5	0.054 03+j0.223 04	j0.019 20	6-12	0.122 91+j0.255 81	0
2-3	0.046 99+j0.197 97	j0.015 28	6-13	0.066 15+j0.130 27	0
2-4	0.058 11+j0.176 32	j0.034	7-8	j0.176 15	0
2-5	0.056 95+j0.173 88	j0.034 6	7-9	j0.110 01	0
3-4	0.067 01+j0.171 03	j0.012 8	9-10	0.031 81+j0.084 5	0
4-5	0.013 35+j0.042 11	0	9-14	0.127 11+j0.270 38	0
4-7	j0.209 12	0	10-11	0.082 05+j0.192 07	0
4-9	j0.556 18	0	12-13	0.220 92+j0.199 88	0
5-6	j0.252 02	0	13-14	0.170 93+j0.348 02	0

中各节点的电压幅值和角度。

表14 Matpower运行结果

节点	幅值	角度	节点	幅值	角度
1	1.06	0	8	1.09	-13.360
2	1.045	-4.983	9	1.056	-14.939
3	1.01	-12.725	10	1.051	-15.097
4	1.018	-10.313	11	1.057	-14.791
5	1.02	-8.774	12	1.055	-15.076
6	1.07	-14.221	13	1.05	-15.156
7	1.062	-13.360	14	1.036	-16.034

结果表明，Matpower运算方便简洁，结果清晰可见，在解决多节点复杂的电力系统时比算法方便简洁，不需要修改算法，从而节约工作时间和减少工作量，尤其在复杂的多节点系统中运用更加方便，结果准确可靠。

结束语

主要对4节点电力系统进行潮流计算，通过Matpower软件对4节点电力系统进行计算分析。最后通过经典牛顿算法计算验证Matpower软件运行并得出结果，结果显示误差很小，可忽略不计。因此得出Matpower软件潮流计算结果准确可靠，最后运用Matpower解决14节点系统的潮流计算，为今后的工作做好理论验证基础。最后得出结论：Matpower作为开源软件，功能强大，操作方便，只要根据算例的信息输入就可以算出，不需要编程，在解决多节点复杂系统中尤为方便，但是Matpower也存在不足之处，即运算方面只能计
(下转第43页)

成本与排放成本的权重系数相同,等效成本为二者之和,此时优先安排等效总成本最小的DG出力。

参考文献

- [1] Molderink A, Bakker V, Bosman MGC, et al. A three-step methodology to improve domestic energy efficiency [C]. Innovative Smart Grid Technologies, 2010: 1-8.
- [2] Gomez San Román T, Rivier Abad J. Assessment of energy distribution losses for increasing penetration of distributed generation [J]. IEEE Transactions Power Systems, 2006, 21 (2): 533-540.
- [3] Hawkes A D, Leach M A. Modelling high level system design and unit commitment for a microgrid [J]. Applied Energy, 2009, 86 (7): 1253-1265.
- [4] 王锐, 顾伟, 吴志. 含可再生能源的热电联供型微电网经济运行优化 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35 (8): 22-27.
- [5] 丁明, 张颖媛, 茆美琴, 等. 集中控制式微电网系统的稳态建模与运行优化 [J]. 电力系统自动

化, 2009, 33 (24): 78-82.

- [6] 李今朝. 国产300 MW火电机组调峰方式的研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2005.
- [7] Dong H, Ajith A, Jae H. A hybrid genetic algorithm and bacterial foraging approach for global optimization [J]. Journal of Information Science, 2007 (18): 3918-3937.
- [8] 刘小龙, 赵奎领. 基于免疫算法的细菌觅食优化算法 [J]. 计算机应用, 2012, 32 (3): 634-637.
- [9] Farhat I A, El-Hawary M E. Dynamic adaptive bacterial foraging algorithm for optimum economic dispatch with valve-point effects and wind power [J]. IET generation, transmission & distribution, 2010, 4 (9): 989-999.
- [10] Bhuvaneswari R, Edrington C S, Cartes D A, et al. Online economic environmental optimization of a microgrid using an improved fast evolutionary programming technique [C]. North American Power Symposium (NAPS), 2009: 1-6.

(收稿日期: 2014-05-21) EA

(上接第37页)

算静态潮流,对于风力发电系统中时变系统无法计算随着时间变化的动态潮流,在以后的工作中有待开发、更新。

参考文献

- [1] 徐恒娇, 王洪诚, 胡江航, 等. 基于Matpower的潮流计算方法 [J]. 物联网技术, 2013 (1): 43-45.
- [2] 吕莎. 基于逐步倒推法结合Matpower潮流计算的地市级电网网架规划方法 [J]. 湖北电力, 2012, 14 (14): 10-12.
- [3] 康丽, 陈丽丹, 刘欣, 等. 电力系统潮流计算的牛顿二阶法新解 [J]. 河海大学学报, 2013, 42 (3): 277-282.
- [4] 栗超. 电流注入型牛顿法潮流计算的研究及其应用 [D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
- [5] 陈珏. 电力系统稳态分析 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

- [6] 于群, 曹娜. Matlab/Simulink电力系统建模与仿真 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [7] Zimmerman Ray Daniel, Thomas Robert John. Matpower: steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26 (1): 1-4.
- [8] 纪建伟. 电力系统分析 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [9] 张立梅, 唐巍计. 计及分布式电源的配电网前推回代潮流计算 [J]. 电工技术学报, 2010, 25 (8): 123-129.
- [10] Yan Sun, Nan Shan Hang. Power flow calculation method for islanded power network [C]. Power and Energy Engineering Conference, 2009: 1-5.
- [11] 陈亚宁, 李晓明. 基于Ybus法的配电网改进牛顿潮流算法 [J]. 浙江电力, 2008 (3): 13-16.

(收稿日期: 2014-06-10) EA