

实验报告

课程名称: 电力系统分析实验 实验名称: 实验一: 潮流分析实验

专业-班级: 电气3班 学号: _____ 姓名: _____

实验日期: 2025 年 11 月 25 日 同组人: _____

报告总分数: _____

教师评语:

教师签字: _____

日 期: _____

一、实验目的

- 1、掌握复杂电力系统潮流计算原理；
- 2、了解 MATPOWER 及 Powergui 对潮流进行分析的方法；
- 3、掌握并编写牛顿拉夫逊潮流计算算法；

二、实验预习题

1. 在潮流计算中，电力网络的节点分几类？各类节点的已知量和待求量是什么？

电力网络的节点分为三类：PQ 节点，PV 节点和参考节点。

PQ 节点：节点有功功率 P_i 和无功功率 Q_i 已知，需要求得节点电压 e_i 和 f_i 或者 U_i 和 δ_i 。

PV 节点：节点有功功率 P_i 和节点电压幅值 U_i 已知，需要求得节点的无功功率 Q_i 和节点电压相位 δ_i 。

平衡节点：节点的电压相位 δ_i 和电压幅值 U_i 已知，需要求得节点的有功功率 P_i 和无功功率 Q_i 。

2. 潮流计算的方法有几种？简要介绍各种算法的优缺点？

高斯-赛德尔迭代法：收敛速度慢，迭代次数随网络节点增加而上升，往往会发生收敛困难。

阻抗法：改善了收敛性，占用内存大，计算量大。

牛顿-拉夫逊法：收敛性好，内存要求、计算速度都优于阻抗法。

P-Q 分解法：计算速度优于牛顿-拉夫逊法，同时计算精度和牛顿-拉夫逊法一致，占用内存小，计算速度快，但是有超高压电网的前提。

三、实验设备及元器件

Matlab/Simulink 仿真软件

四、实验原理

潮流计算是电力系统分析中的一种最基本的计算，它的任务是对给定运行条件确定系统运行状态，如各母线上的电压（幅值及相角）、网络中的功率分布及功率损耗等。潮流计算的结果是电力系统稳定计算和故障分析的基础。

1. 电力网络的节点

电力系统把节点分成三类：

PQ 节点：节点功率（P、Q）已知，待求的未知量是节点电压向量（U、 θ ），属于这一类节点的有按给定有功无功功率发电的发电厂母线和没有其他电源的变电所母线。

PV 节点：节点的有功功率和电压幅值 U 已知，待求的是该节点的无功功率 Q 及电压相角 θ 。有一定无功

功率储备的发电厂和一定无功功率电源的变电所母线都可选作为 PV 节点。

平衡节点：在潮流计算中，这类节点通常只设一个。给定其电压值，在计算中该节点电压向量的方向作为参考轴，即给定该点电压向量角度为零。担负调整系统频率任务的发电厂母线往往被选作为平衡节点。例如可以选择出线数多或者靠近电网中心的发电厂母线作平衡节点。

进行计算时，平衡节点是不可少的；PQ 节点是大量的；PV 节点较少，甚至可能没有。

2. 节点电压方程和导纳矩阵

电力网络的节点电压方程为： $I_B = Y_B U_B$

I_B ：节点注入电流列向量，注入电流有正有负，注入网络的电流为正而流出网络的电流为负。根据这个规定，电源节点的注入电流为正，而负荷节点为负。无电源无负荷的联络节点为零。

U_B ：节点电压列向量，由于节点电压是对称于参考节点而言的，因此需要先选定参考节点。在电力系统中通常选大地为参考节点。如果网络中无接地支路，则需要选定某一节点为参考点。

I_B 、 U_B 均为 $n \times n$ 列向量， Y_B 为 $n \times n$ 阶节点导纳矩阵。

3. 牛顿-拉夫逊法潮流计算原理

牛顿拉夫逊法是潮流计算中最普遍的一种计算方法。指在每一次迭代过程中，对非线性方程组通过线性化处理逐步近似，从而求解非线性方程组。牛顿-拉夫逊法计算潮流是以导纳矩阵为基础，利用其对称性、稀疏性和节点编号顺序等技巧，使此种计算方法具有很好的收敛性，且占用内存小，计算速度快。

直角坐标下潮流计算的流程：

- (1)形成节点导纳矩阵；
- (2)给各节点电压赋初始值；
- (3)将节点电压初值代入，求出修正方程式的常数项向量；
- (4)将节点电压初值代入，求出雅可比矩阵元素；
- (5)求解修正方程式，求出变量的修正向量；
- (6)求出节点电压的新值；
- (7)如有 PV 节点，则检查该类节点的无功功率是否越限；

(8)检查是否收敛，如不收敛则以各节点电压的新值作为初值从第三步重新进行迭代，否则计算支路功率分布、PV 节点无功功率和平衡节点注入功率，最后输出结果。

4. MATPOWER

MATPOWER 是一个用 MATLAB 的 M 文件编写，用来解决电力潮流和优化潮流的问题的软件包。

MATPOWER 的特点是简单、易懂而且代码公开，为电力系统专业学生深入学习和理解掌握潮流计算中的难点（如节点导纳矩阵、算法及迭代过程等）提供了一个开放、便捷的平台。

编写基准容量 baseMVA，母线参数 bus，发电机参数 gen，支路参数 branch 形成输入文件作为输入，经过潮流计算指令即可得到结果。

5. Powergui

在 Simulink 中，Powergui 模块是用于 Simscape Electrical Specialized Power Systems 模型的环境块。允许用户选择不同的求解方法，如连续、离散、连续相量或离散相量。Powergui 模块不仅用于求解电路，还提供了工具来分析稳态和仿真结果，以及进行高级参数设计。Powergui 可以进行电力系统的潮流计算仿真。

实验原始数据和过程记录

原始数据审核：_____

1. MATPOWER 潮流计算

表 1-1 matpower 潮流计算结果

节点号	电压幅值 (p.u.)	电压角度 (°)
1	0.862	-4.779
2	1.078	17.854
3	1.036	-4.282
4	1.050	21.843
5	1.050	0

2. Powergui 潮流计算

表 1-2 2 机 5 节点电力系统涉及模块

参数值	线路 12	线路 23	线路 31
R1	5.29	10.58	13.225
L1	0.105	0.126	0.147
C1	1.2034×10^{-5}	1.2034×10^{-5}	0

表 1-3 powergui 潮流计算结果

节点号	电压幅值 (p.u.)	电压角度 (°)	幅值与 MATPOWER 计算结果差值
1	0.872	-4.73	-0.01
2	1.079	17.13	-0.001
3	1.039	-4.23	-0.003
4	1.05	21.09	0
5	1.05	0	0

五、实验过程

1. MATPOWER 潮流计算

(1) 创建数据文件 case5_01.m

```
function mpc=case5_01
% MATPOWER Case Format:Version 2
mpc.version='2';
%% Power Flow Data %%
%% system MVA base 系统基准容量
mpc.baseMVA=100; % 100MVA
%% bus data
% bus_i 设置母线编号(正整数)
% type 设置母线类型, 1 为 PQ 节点母线, 2 为 PV 节点母线, 3 为平衡节点母线, 4 为孤立节点母线
% Pd Qd 设置母线注入负荷的有功功率和无功功率
% Gs Bs 设置与母线并联电导和电纳
% baseKV 设置该母线基准电压
% Vm Va 设置母线电压的幅值、相位初值
% Vmax Vmin 设置工作时母线最高、最低电压幅值
% area zone 设置电网断面号和分区号, 一般都设置为 1
% bus_i type Pd Qd Gs Bs area Vm Va baseKV zone Vmax Vmin
mpc.bus=[ 1 1 160 80 0 0 1 1 0 100 1 1.1 0.94;
          2 1 200 100 0 0 1 1 0 100 1 1.1 0.94;
          3 1 370 130 0 0 1 1 0 100 1 1.1 0.94;
          4 2 0 0 0 0 1 1.05 0 100 1 1.1 0.94;
          5 3 0 0 0 0 1 1.05 0 100 1 1.1 0.94;];
%% generator data
% bus 设置接入发电机(电源)的母线编号
% Pg Qg 设置接入发电机(电源)的有功功率和无功功率
% Pmax Pmin 设置接入发电机(电源)的有功功率最大、最小允许值
% Qmax Qmin 设置接入发电机(电源)的无功功率最大、最小允许值
% Vg 设置接入发电机(电源)的工作电压
% mBase 设置接入发电机(电源)的功率基准,如果为默认值,就是 baseMVA 变量的值
% status 设置发电机(电源)工作状态, 1 表示投入运行, 0 表示退出运行
% bus Pg Qg Qmax Qmin Vg mBASE status Pmax Pmin
mpc.gen=[ 4 500 0 99990 -9999 1.050 100 1 600 0;
          5 0 0 99990 -9999 1.050 100 1 600 0; ];
%% branch data
% fbus tbus 设置该支路由起始节点(母线)编号和终止节点(母线)编号
% r,x,b 设置该支路的电阻、电抗和充电电纳
% rateA,rateB,rateC 设置该支路长期、短期和紧急允许功率
% ratio 设置该支路的变比, 如果支路元件是导线,那么 ratio 为 0; 如果支路元件为变压器, 则该变比为 fbus 侧母线的基准电压与 tbus 侧母线的基准电压之比
% angle 设置支路的相位角度, 如果支路元件为变压器(或移相器), 就是变压器(或移相器)的转角;
```

如果支路元件是导线，相位角度则为 0° 。

% status 设置支路工作状态，1 表示投入运行，0 表示退出运行

% angmin,angmax 设置支路相位角度的最小和最大差值

% fbus tbus r x b rateA rateB rateC ratio angle status agmin agmax

```
mpc.branch=[ 2 1 0.04 0.25 0.5 0 0 0 0 1 -360 360;
```

```
3 1 0.1 0.35 0 0 0 0 0 1 -360 360;
```

```
3 2 0.08 0.3 0.5 0 0 0 0 1 -360 360;
```

```
3 5 0 0.03 0 0 0 0 1.05 0 1 -360 360;
```

```
2 4 0 0.015 0 0 0 0 1.05 0 1 -360 360;];
```

```
return;
```

(2) 在命令行中输入指令：

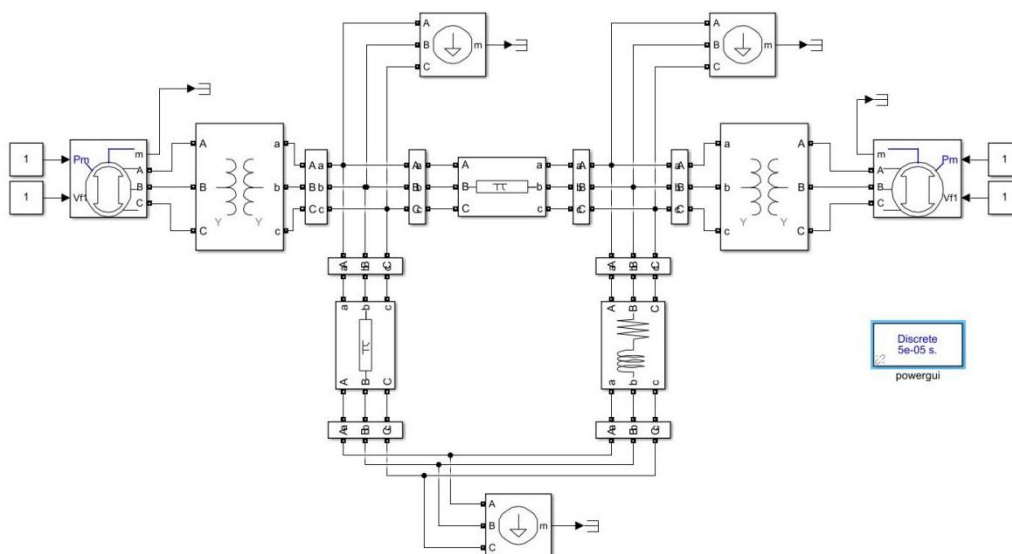
```
runpf('case5_01');
```

(3) 得到潮流计算结果见表 1-1；

2. Powergui 潮流计算

(1) 创建 simulink 仿真模型，各元件参数如下图所示：

simulink 仿真图：



发电机参数：

Block Parameters: Synchronous Machine pu Standard1	Block Parameters: Synchronous Machine pu Standard2
Synchronous Machine (mask) (link) Implements a 3-phase synchronous machine modelled in the dq rotor reference frame. Stator windings are connected in wye to an internal neutral point.	
Configuration Parameters Advanced Load Flow	
Nominal power, line-to-line voltage, frequency [Pn(VA) Vn(Vrms) fn(Hz)]: [1e+08 10500 50]	
Reactances [Xd Xd' Xd'' Xq Xq' Xq'' Xl] (pu): [2.24 0.17 0.12 1.02 0.13 0.08]	
Time constants d axis: Open-circuit q axis: Short-circuit [Tdo' Tdo'' Tq''] (s): [4.49 0.0681 0.0513]	
Stator resistance Rs (pu): 0.037875	
Inertia coefficient, friction factor, pole pairs [H(s) F(pu) p()]: [0.1028 0.02056 2]	
Initial conditions [dw(%) th(deg) ia,ib,ic(pu) pha,phb,phc(deg) Vf(pu)]: [0 0 0 0 0 0 1]	
<input checked="" type="checkbox"/> Simulate saturation Plot	
[ifd: vt] (pu): [0.9956, 1.082, 1.19, 1.316, 1.457, 0.7, 0.7698, 0.8872, 0.9466, 0.9969, 1.046, 1.1, 1.151, 1.201]	

变压器参数:

Block Parameters: Three-Phase Transformer (Two Windings)1

Three-Phase Transformer (Two Windings) (mask) (link)

This block implements a three-phase transformer by using three single-phase transformers. Set the winding connection to 'Yn' when you want to access the neutral point of the Wye.

Click the Apply or the OK button after a change to the Units popup to confirm the conversion of parameters.

ConfigurationParametersAdvanced

Units pu

Nominal power and frequency [Pn(VA) , fn(Hz)] [100e6 , 50]

Winding 1 parameters [V1 Ph-Ph(Vrms) , R1(pu) , L1(pu)] [10.5e3 , 0.0002 , 0]

Winding 2 parameters [V2 Ph-Ph(Vrms) , R2(pu) , L2(pu)] [121e3 , 0.0002 , 0.015]

Magnetization resistance Rm (pu) 500

Magnetization inductance Lm (pu) 500

Saturation characteristic [i1 , phi1 ; i2 , phi2 ; ...] (pu) 0.0024,1.2 ; 1.0,1.52

Initial fluxes [phi0A , phi0B , phi0C] (pu) [0.8 , -0.8 , 0.7]

OKCancelHelpApply

Block Parameters: Three-Phase Transformer (Two Windings)2

Three-Phase Transformer (Two Windings) (mask) (link)

This block implements a three-phase transformer by using three single-phase transformers. Set the winding connection to 'Yn' when you want to access the neutral point of the Wye.

Click the Apply or the OK button after a change to the Units popup to confirm the conversion of parameters.

ConfigurationParametersAdvanced

Units pu

Nominal power and frequency [Pn(VA) , fn(Hz)] [100e6 , 50]

Winding 1 parameters [V1 Ph-Ph(Vrms) , R1(pu) , L1(pu)] [10.5e3 , 0.0002 , 0]

Winding 2 parameters [V2 Ph-Ph(Vrms) , R2(pu) , L2(pu)] [121e3 , 0.0002 , 0.03]

Magnetization resistance Rm (pu) 500

Magnetization inductance Lm (pu) 500

Saturation characteristic [i1 , phi1 ; i2 , phi2 ; ...] (pu) 0.0024,1.2 ; 1.0,1.52

Initial fluxes [phi0A , phi0B , phi0C] (pu) [0.8 , -0.8 , 0.7]

OKCancelHelpApply

负荷参数:

Block Parameters: Three-Phase Dynamic Load1

Three-Phase Dynamic Load (mask) (link)

Implements a three-phase, three-wire dynamic load. Active power P and reactive power Q absorbed by the load vary as function of positive-sequence voltage V.

Parameters

Nominal L-L voltage and frequency [Vn(Vrms) fn(Hz)]: [115e3 50]

Active and reactive power at initial voltage [Po(W) Qo(var)]: [2e+08 1e+08]

Initial positive-sequence voltage Vo [Mag(pu) Phase (deg.)]: [1.07863 17.1296]

☐ External control of PQ

[np, nq]: [0 0]

Time constants [Tp1 Tp2 Tq1 Tq2] (s): [0 0 0 0]

Minimum voltage Vmin (pu): 0.7

Filtering time constant (s): 1e-4

OKCancelHelpApply

Block Parameters: Three-Phase Dynamic Load2

Three-Phase Dynamic Load (mask) (link)

Implements a three-phase, three-wire dynamic load. Active power P and reactive power Q absorbed by the load vary as function of positive-sequence voltage V.

Parameters

Nominal L-L voltage and frequency [Vn(Vrms) fn(Hz)]: [115e3 50]

Active and reactive power at initial voltage [Po(W) Qo(var)]: [3.7e+08 1.3e+08]

Initial positive-sequence voltage Vo [Mag(pu) Phase (deg.)]: [1.03887 -4.22953]

☐ External control of PQ

[np, nq]: [0 0]

Time constants [Tp1 Tp2 Tq1 Tq2] (s): [0 0 0 0]

Minimum voltage Vmin (pu): 0.7

Filtering time constant (s): 1e-4

OKCancelHelpApply

Block Parameters: Three-Phase Dynamic Load3

Three-Phase Dynamic Load (mask) (link)

Implements a three-phase, three-wire dynamic load. Active power P and reactive power Q absorbed by the load vary as function of positive-sequence voltage V.

Parameters

Nominal L-L voltage and frequency [Vn(Vrms) fn(Hz)]: [115e3 50]

Active and reactive power at initial voltage [Po(W) Qo(var)]: [1.6e+08 8e+07]

Initial positive-sequence voltage Vo [Mag(pu) Phase (deg.)]: [0.872277 -4.72647]

☐ External control of PQ

[np, nq]: [0 0]

Time constants [Tp1 Tp2 Tq1 Tq2] (s): [0 0 0 0]

Minimum voltage Vmin (pu): 0.7

Filtering time constant (s): 1e-4

OKCancelHelpApply

线路参数:

Block Parameters: Three-Phase PI Section Line1

Three-Phase PI Section Line (mask) (link)

This block models a three-phase transmission line with a single PI section.

The model consists of one set of RL series elements connected between input and output terminals and two sets of shunt capacitances lumped at both ends of the line.

RLC elements are computed using hyperbolic corrections yielding an "exact" representation in positive- and zero-sequence at specified frequency only.

To obtain an extended frequency response, connect several PI section blocks in cascade or use a Distributed Parameter line.

Parameters

Frequency used for rlc specification (Hz): 50

Positive- and zero-sequence resistances (Ohms/km) [r1 r0]: [5.29 0.3864]

Positive- and zero-sequence inductances (H/km) [l1 l0]: [0.105 4.1264e-3]

Positive- and zero-sequence capacitances (F/km) [c1 c0]: [1.2034e-5 7.751e-9]

Line length (km): 1

OKCancelHelpApply

Block Parameters: Three-Phase PI Section Line2

Three-Phase PI Section Line (mask) (link)

This block models a three-phase transmission line with a single PI section.

The model consists of one set of RL series elements connected between input and output terminals and two sets of shunt capacitances lumped at both ends of the line.

RLC elements are computed using hyperbolic corrections yielding an "exact" representation in positive- and zero-sequence at specified frequency only.

To obtain an extended frequency response, connect several PI section blocks in cascade or use a Distributed Parameter line.

Parameters

Frequency used for rlc specification (Hz): 50

Positive- and zero-sequence resistances (Ohms/km) [r1 r0]: [10.58 0.3864]

Positive- and zero-sequence inductances (H/km) [l1 l0]: [0.126 4.1264e-3]

Positive- and zero-sequence capacitances (F/km) [c1 c0]: [1.2034e-5 7.751e-9]

Line length (km): 1

OKCancelHelpApply

Block Parameters: Three-Phase Series RLC Branch

Three-Phase Series RLC Branch (mask) (link)

Implements a three-phase series RLC branch.

Use the 'Branch type' parameter to add or remove elements from the branch.

Parameters

Branch type RL

Resistance R (Ohms): 13.225

Inductance L (H): 0.147

Measurements None

OKCancelHelpApply

(2) 得到潮流计算结果见表 1-3;

六、思考题

1、节点导纳矩阵和雅各比矩阵的特点，并简要分析？

节点导纳矩阵：

节点导纳矩阵是一个对称矩阵，通常较稀疏而且对角占优。这些特点使得节点导纳矩阵直观的反映了各节点之间的连接关系并且易于收敛，便于进行潮流计算。

Jacobi 矩阵：

(1) 直角坐标系下的 Jacobi 矩阵不是对称阵且为 $2(n-1)$ 阶方阵，在使用牛顿-拉夫逊法迭代进行潮流计算的过程中，各元素在每次迭代时均发生变化，计算量和存储空间占用大，同时 Jacobi 矩阵的子块和节点导纳矩阵相对应，为稀疏矩阵，使得 Jacobi 矩阵易于收敛。

(2) 极坐标系下的 Jacobi 矩阵不是对称阵且为 $2(n-1)-r$ 阶方阵，在使用牛顿-拉夫逊法迭代进行潮流计算的过程中，各元素在每次迭代时均发生变化，计算量和存储空间占用大，同时 Jacobi 矩阵的子块和节点导纳矩阵相对应，为稀疏矩阵，使得 Jacobi 矩阵易于收敛。

2、牛顿-拉夫逊潮流分析的基本流程？

(1) 输入原始数据形成节点导纳矩阵 Y，并输入给定节点电压(e,f 或者 U, δ)的迭代初值。节点的编号按照 PQ->PV->V δ 的顺序进行编号。

(2) 开始迭代：

1. 计算每个节点的功率/电压偏移量，如果小于一定值则判定为收敛，此时使用 e,f(U, δ)计算线路的潮流；
2. 如果不收敛，计算 Jacobi 矩阵，通过 Jacobi 矩阵解修正方程从而得到节点电压修正量，加入修正量修正节点电压，迭代次数+1；
3. 重复步骤 1；

3. 对比 MATPOWER 和 Powergui 潮流计算结果，对比分析影响差值的因素为什么？

MathPower 和 Powergui 潮流计算的结果差异不大，可以认为潮流计算的结果均正确，但是仍然存在一定的差值。影响差值的因素主要有：

MathPower 在参数设置时仅仅输入的元件的基本参数，其建立的等值电路模型相对简单（仅仅设置支路的电阻、电抗和充电电纳），计算得到的结果相对精确性不高，计算结果偏向于理论计算情况。

Powergui 在参数设置时更加复杂，不仅考虑了输入元件的基本参数，还需要设置元件的其他参数（比如发电机的 dq 轴电抗），计算得到的结果相对更接近真实情况，精确性较高。

同时，二者差异还可能与采用的数值算法，仿真步长和仿真精度设置等方面的区别有关。

七、实验体会与建议

实验室电脑很不好用，2018b 也没有 2022b 或 2024b 好用。实验指导书在很多容易犯错的点并没有写清楚，比如参数设置很多没有写清楚，且不同版本的 powergui 的符号和参数详情页不完全相同，对此指导书并没有说明清楚具体的设置规则。

实验设计可以考虑给出 simulink 仿真文件，通过修改模型参数观察潮流计算结果的不同，体会电力系统各元件参数对电力系统整体的影响，这比枯燥地抄图搭模型然后到处找错误来的有意义。